

# Analisis Kestabilan Lubang Buka dan *Pillar* saat Proses *Mining Blok Development* pada Penambangan Bawah Tanah Metoda *Room and Pillar* PT. Allied Indo Coal (AIC) Jaya

Alfi Rahman<sup>1\*</sup>, Bambang Heriyadi<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang

\*alfierachman@gmail.com

\*\*bambang\_heriyadi@yahoo.com

**Abstract.** Determination of the mining geometry in the room and pillar underground mining method is a fairly complex job. This research was conducted by analyzing the stress on the coal pillar and the coal pillar strength to obtain its safety faktor. Stress determination on the pillars is calculated based on the theory of tributary area loading with the stress working on the pillars is 6.775 MPa. Meanwhile, the coal pillar strength is obtained using empirical equations with the pillar strength of 17.6 MPa. Thus, the pillar safety faktor based on analytical calculations is 2.62 (stable) with mining recovery around 40%. Rock mass characterization is carried out based on rock mass classification Rock Mass Rating (RMR) System. The value of the RMR for coal is 56, where this rock is included in class III rock with a stand up time recommendation for 580 hours and maximum span 6.5 m. Modeling using Phase2 shows the direction of stress transfer tends to be centered on the mining blok area with average mean stress 4.2 MPa and strength factor 2.53. Evaluation of mining geometry is obtained through simulation calculations for several pillar sizes with the results in the form of recommendations for the ideal pillar dimensions 7 m x 7 m with estimated recovery around 55% and safety faktor 1.53.

**Keywords:** *Pillar Dimensions, Tributary Area, Safety Faktor, Recovery, RMR System.*

## 1. Pendahuluan

Operasi produksi batubara terus dilakukan dalam rangka memenuhi kebutuhan sumber energi. Sampai saat ini, sebagian besar tambang batubara menerapkan sistem tambang terbuka karena lebih mudah dan murah dibandingkan tambang bawah tanah. Sistem tambang terbuka menjadi tidak ekonomis lagi untuk diterapkan setelah mencapai batas kedalaman tertentu sehingga untuk menambang batubara yang lebih dalam perlu diterapkan sistem tambang bawah tanah<sup>[1][12]</sup>.

Salah satu metode tambang batubara bawah tanah yang umum digunakan adalah *room and pillar*. Sesuai nama metodenya, penambangan cadangan batubara dilakukan dengan menyisakan *pillar-pillar* untuk mencegah keruntuhan atap dan subsidens (penurunan permukaan tanah)<sup>[2][14]</sup>. Pengembangan metode ini yaitu dengan melakukan penambangan sebagian *pillar* batubara pada area yang sudah selesai ditambang dengan arah kemajuan sebaliknya, disebut dengan istilah *retreat mining*. Penerapan metode ini memberikan tingkat perolehan batubara yang lebih tinggi, namun potensi

terjadinya *failure* akan meningkat dan akan mempengaruhi kestabilan lubang bukaan.

*Pillar* merupakan salah satu elemen penting dalam menjaga kestabilan lubang bukaan pada tambang bawah tanah dengan sistem *room & pillar*. Hal ini dikarenakan, *pillar* harus mampu menahan beban di atasnya (*overburden*) dari kemungkinan keruntuhan (*failure*) atap lubang bukaan dan *pillar* itu sendiri<sup>[3]</sup>. Selain itu analisa mengenai kestabilan lubang bukaan dan karakteristik massa batuan pada area suatu blok penambangan juga diperlukan untuk menjamin kondisi kerja yang aman dari kemungkinan terjadinya keruntuhan (*failure*).

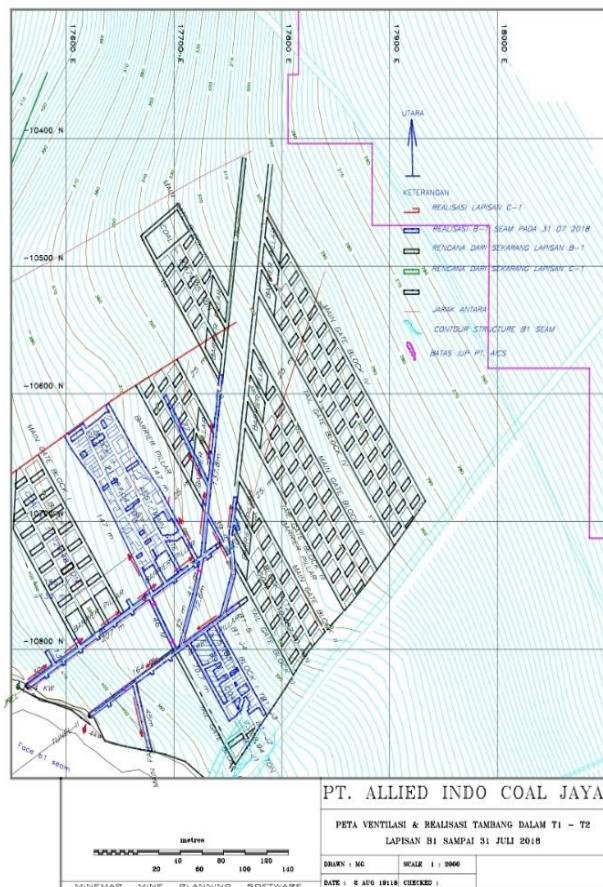
PT. Allied Indo Coal Jaya (AICJ) merupakan salah satu perusahaan tambang batubara yang menggunakan sistem penambangan *Room & Pillar* pada proses kegiatan tambang bawah tanahnya. Saat ini PT. AIC Jaya mengoperasikan beberapa blok penambangan dengan 8 buah *tunnel* menuju seluruh *front* penambangan dan blok penambangan. Aktivitas penambangan batubara dilakukan pada lapisan B-1, C, dan C1 dengan kemiringan lapisan berkisar antara 12<sup>0</sup> – 17<sup>0</sup>.

Tahapan mining blok *development* dimulai dari penggalian 4 buah *local shaft* dengan spasi 12 m. Setelah mencapai batas rencana penambangan, setiap *local shaft* digali menuju *local shaft* disebelahnya membentuk *panel entries* dan *pillar-pillar (panel pillar)* yang saling berhubungan. Geometri *pillar* yang terbentuk adalah persegi dengan ukuran *pillar* 12 m x 12 m. Kajian geoteknis sangat diperlukan pada tahap ini untuk menjamin kondisi kerja yang aman dari kemungkinan terjadinya *failure* dan produksi batubara yang optimal selama proses *development*.

Beberapa *front* penambangan pada blok-blok penambangan sudah mulai kritis dan mengalami *failure*. Hal ini dapat dilihat dari kondisi penyanggaan (baja dan kayu) di beberapa tempat sudah mulai bengkok dan patah. Selain itu, di beberapa lokasi banyak ditemukan batuan yang menggantung (baji) pada bagian atap lubang bukaan yang dapat dilihat diantara barisan penyanggaan. Hal ini mengindikasikan terjadinya perubahan tegangan yang cukup signifikan disekitar lubang bukaan dan *pillar* batubara.

## 2. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Tambang Bawah Tanah PT. Allied Indo Coal (AIC) Jaya yang terletak di Desa Parambahan, Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto, Provinsi Sumatera Barat. Penelitian akan difokuskan pada lapisan batubara *seam* B1, khususnya pada blok II yang terdapat di *tunnel* I. Lokasi ini berjarak sekitar 137 m dari mulut terowongan dengan kemiringan lantai rata-rata 120.



Gambar 1. Layout penambangan tunnel 1 & 2 (*seam* B1)

## 3. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada 03 September 2018 s/d 29 September 2018. Lokasi penelitian di PT. Allied Indo Coal (AIC) Jaya, Sawahlunto.

### 3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan jenis penelitian terapan (*applied research*) yaitu suatu kegiatan yang sistematis dan logis dalam rangka menemukan sesuatu yang baru atau aplikasi baru dari penelitian-penelitian yang telah pernah dilakukan selama ini. Berbeda dengan penelitian murni, penelitian terapan lebih menekankan pada penerapan ilmu, aplikasi ilmu, ataupun penggunaan ilmu untuk dan dalam masyarakat, ataupun untuk keperluan tertentu<sup>[4]</sup>.

### 3.2 Tahap Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data dimulai dengan mengambil data primer *strike & dip* perlapisan batubara, geometri lubang bukaan dan *pillar*, kedalaman penggalian, serta uji sifat fisik dan mekanik sampel batubara dan *siltstone* di laboratorium. Pengambilan data dilakukan pada blok II *tunnel* 1 yang memiliki ukuran *pillar* 12 m x 12 m dengan ketinggian penggalian 2,5 m.

### 3.3 Tahap Pengolahan Data

Pengolahan data yang dilakukan yaitu melakukan perhitungan tegangan *insitu* pada lokasi penelitian, tegangan pada *pillar*, kekuatan *pillar*, faktor keamanan, *recovery* batubara, dan klasifikasi massa batuan.

#### 3.3.1 Penentuan Tegangan Insitu

Massa batuan pada lokasi yang dalam akan mengalami tegangan *insitu* yang dihasilkan oleh berat tanah/batuan yang ada di atasnya (*gravitational stress*), tegangan akibat peristiwa tektonik (*tectonic stress*), dan tegangan sisa (*residual stress*). Tegangan *insitu* suatu titik ditentukan oleh kondisi pembebanan material yang ada di atasnya dan perubahan akibat proses geologi sebelumnya<sup>[5]</sup>.

##### 3.3.1.1 Tegangan Insitu Vertikal

Tegangan ini dapat diperkirakan dari hubungan sederhana:

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad (1)$$

Keterangan

$\sigma_v$  = tegangan *insitu* vertikal (MPa)

$\gamma$  = berat satuan massa batuan di atas elemen ( $\text{ton/m}^3$ )

$z$  = kedalaman dari permukaan (m)

##### 3.3.1.2 Tegangan Insitu Horizontal

Biasanya, rasio tegangan *insitu* horizontal terhadap tegangan *insitu* vertikal dinyatakan dengan  $k$ , sehingga:

$$\sigma_h = k \cdot \sigma_v \quad (2)$$

$$k = 0.25 + 7 \frac{E_h}{E_v} (0.001 + 1/z) \quad (3)$$

Keterangan

$\sigma_v$  = Tegangan vertikal (MPa)

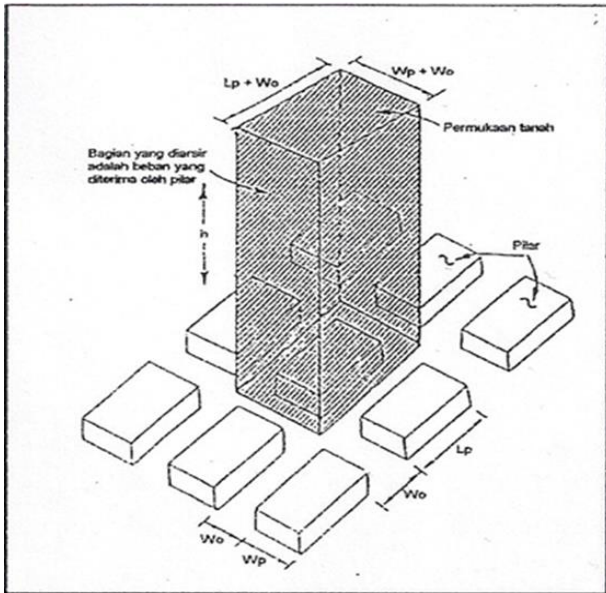
$\sigma_h$  = Tegangan horizontal (MPa)

k = Rasio  $\sigma_v$  dan  $\sigma_h$

Eh = Modulus deformasi batuan (GPa)

### 3.3.2 Perhitungan Tegangan pada Pillar

Teori pembebanan *Tributary Area* diperoleh dari analisis sederhana mengenai kesetimbangan statis.



Gambar 2. Dasar teori *Tributary Area*<sup>[6]</sup>

Berdasarkan metode *Tributary Area* setiap *pillar* akan menyangga beban di atasnya dan setengah jarak dari *pillar* di sekeliling ( $W_o + W_p$ )<sup>[6]</sup>. Untuk *pillar* yang terletak pada suatu lapisan miring, Trumbachev dan

Melkinov (1964) mengusulkan persamaan untuk tegangan normal yang bekerja pada *pillar* yaitu:

$$\sigma_p = [\sigma_v(\cos^2 \alpha + m \sin^2 \alpha)] \left[ \frac{(W_p + W_o)}{W_p} \right]^2 \quad (4)$$

Keterangan

$\alpha$  adalah sudut kemiringan lapisan terhadap horisontal dan  $m = \sigma_h / \sigma_v$ .

Hal yang menjadi perhatian dalam penambangan sebenarnya adalah *extraction ratio*, yaitu perbandingan antara daerah yang ditambang dengan total badan bijih. Untuk *pillar* persegi dengan lebar  $W_p$  memiliki persamaan *extraction ratio*:

$$r = \frac{(W_p + W_o)^2 - W_p^2}{(W_o + W_p)^2} \quad (5)$$

### 3.3.3 Perhitungan Kekuatan Pillar

Sebuah penelitian dilakukan oleh sejumlah peneliti pada tambang open stope di Kanada dan diperoleh kurva empiris untuk rib *pillar* yang mengikuti persamaan berikut<sup>[7]</sup>:

$$\frac{\sigma_{ps}}{UCS} = 0,4162 \frac{W_p}{h} \quad (6)$$

### 3.3.4 Klasifikasi Massa Batuan

Sistem *Rock Mass Rating* atau dikenal dengan *Geomechanics Classification* telah dimodifikasi berulang kali ketika informasi baru dari studi-studi kasus yang diperoleh dan menjadikannya sesuai dengan Standar Internasional dan prosedur.

Tabel 1. Pembobotan nilai RMR<sup>[8]</sup>

Parameter			Range of Values						
1	Strength of intact rock material	PLI	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - UCS test is preferred		
		UCS	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	Rating	15	12	7	4	2	1	0	
2	Drill core quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge > 5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Joint water press)/ (Major principal $\sigma$ )	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		



RMR terdiri dari 5 parameter utama dan 1 parameter pengontrol (Poin 6) untuk membagi massa batuan<sup>[8]</sup>.

- Kuat tekan uniaksial (Uniaxial Compressive Strength, UCS)
- Rock Quality Designation (RQD)
- Spasi bidang diskontinu
- Kondisi bidang diskontinu
- Kondisi Air Tanah
- Koreksi dapat dilakukan bila diperlukan untuk orientasi diskontinuitas/ kekar.

### 3.3.5 Perhitungan Numerik

Metoda elemen hingga adalah salah satu metoda numerik yang menggunakan pendekatan differensial. Metoda ini dapat digunakan untuk menganalisis kondisi tegangan dan regangan pada suatu struktur batuan yang sangat kompleks. Prinsip dasar perhitungannya adalah dengan cara membagi suatu media continum menjadi beberapa elemen yang lebih kecil (*diskretize*). Elemen yang lebih kecil ini merupakan elemen berhingga dan umumnya memiliki bentuk geometeri yang lebih sederhana dibandingkan dengan continumnya<sup>[9]</sup>.

## 3.4 Tahap Analisis Data

### 3.4.1 Sifat Fisik dan Mekanik Batuan Utuh

#### 3.4.1.1 Uji Sifat Fisik

Penentuan sifat fisik batuan utuh dilakukan dengan cara penimbangan berat sampel batuan (*coal* dan *siltstone*) berbentuk *irregular*. Sebanyak masing – masing 5 buah sampel ditimbang menggunakan neraca dengan ketelitian pengukuran 0,01 gram.

Wn = Berat percontoh asli (natural)

Wo = Berat percontoh kering (setelah dioven selama 24 jam dengan temperatur ± 900 C)

Ww = Berat percontoh jenuh (sesudah dijenuhkan dengan air selama 24 jam)

Ws = Berat percontoh jenuh yang tergantung dalam air

**Tabel 2.** Hasil pengujian sifat fisik batuan

Material	Sampel	Wn (gr)	Ww (gr)	Ws (gr)	Wo (gr)
Coal	1	40,91	41,75	10,68	39,07
	2	34,2	34,84	8,29	32,74
	3	58,27	59,13	15,48	55,72
	4	36,55	32,27	9,39	35,22
	5	40,55	41,26	10,41	40,18
Siltstone	1	58,97	59,54	36,53	58,41
	2	59,24	59,94	36,57	58,61
	3	56,01	56,87	34,65	55,48
	4	75,85	76,95	47,2	75,18
	5	56,14	56,95	35,16	55,53

#### 3.4.1.2 Uji Sifat Mekanik

Uji Point Load atau pengujian beban titik merupakan uji indeks yang digunakan untuk memprediksi nilai UCS suatu batuan secara langsung di lapangan. Pembebanan dilakukan dengan menggunakan alat penekan *Point Load*, dimana percontoh batuan ditekan diantara 2 konis penekan pada satu arah garis lurus<sup>[10][13]</sup>.

**Tabel 3.** Hasil uji sifat mekanik

Material	Sampel	D (cm)	L (cm)	P (kN)
Coal	1	2,5	4,8	0,712
	2	3,7	4,7	0,965
	3	2,4	5	0,689
	4	3,4	4,8	0,839
	5	3,4	5,1	1,115
Rata-rata				0,864
Siltstone	1	3,9	5	3,514
	2	4	5,1	4,187
	3	4,15	5,1	5,759
	4	4,05	5,01	4,441
	5	3	5	3,72
Rata-rata				4,324

### 3.4.2 Pemetaan Bidang Diskontinuitas

Pengamatan bidang *diskontinuitas* dilakukan secara langsung di lapangan pada jalur *tail gate/ local shaft* diantara *barrier pillar* yang berada di dekat jalur utama (*main shaft*). Pemetaan kekar dilakukan dengan cara membuat *scanline horizontal* sepanjang 5 m pada kedua sisi dinding lubang bukaan (*left side* dan *right side*). Berikut adalah hasil pemetaan bidang *diskontinuitas/ kekar* pada kedua sisi lubang bukaan.

**Tabel 4.** Hasil pengamatan bidang kekar pada sisi dinding bagian kiri

No. Joint	Strik e (N_E)	Dip(°)	Dip Direct ion (N_E)	Spasi (cm)	Persi stence (cm)	JRC	Pelapukan	Lebar Rong ga (cm)	Pengisi	Disko ntimitas Set	ω	Kondisi Air Tanah
1	280	43	11	33	92	8	Sedikit lapuk	2	None	1		Kering
2	258	52	34	38	116	6	Sedikit lapuk	1,2	None	1	4	Kering
3	250	74	236	11	137	6	Sedikit lapuk	5	None	1		Kering
4	280	71	189	31	119	4	Sedikit lapuk	0,7	None	2		Kering
5	248	80	160	13	136	6	Sedikit lapuk	0,5	None	2	4	Kering
6	265	23	355	53	96	4	Sedikit lapuk	0,2	None	1		Kering
7	267	31	356	27	109	4	Sedikit lapuk	0,3	None	1	4	Kering
8	246	70	337	15	99	4	Sedikit lapuk	0,3	None	1		Kering
9	220	76	296	9	67	6	Sedikit lapuk	0,8	None	1		Kering
10	200	77	298	16	82	8	Sedikit lapuk	0,4	None	1	3	Kering
11	229	80	312	74	13	4	Sedikit lapuk	1,2	None	1		Kering
12	184	78	284	20	88	4	Sedikit lapuk	3	None	1		Kering
13	192	82	114	9	81	4	Sedikit lapuk	1	None	2		Kering
14	225	77	312	21	77	6	Sedikit lapuk	2,5	None	1	5	Kering
15	222	76	146	10	94	4	Sedikit lapuk	0,7	None	2		Kering
16	221	73	145	14	109	6	Sedikit lapuk	1	None	2		Kering
17	243	57	156	22	113	6	Sedikit lapuk	0,8	None	2	4	Kering
18	230	66	143	34	146	4	Sedikit lapuk	0,3	None	2		Kering
19	246	72	156	12	76	4	Sedikit lapuk	0,4	None	2		Kering
20	195	74	304	38	85	4	Sedikit lapuk	0,6	None	1		Kering

**Tabel 5.** Hasil pengamatan bidang kekar pada sisi dinding bagian kanan.

No. Joint	Strik e (N_E)	Dip(°)	Dip Direct ion (N_E)	Spasi (cm)	Persi stence (cm)	JRC	Pelapukan	Lebar Rong ga (cm)	Pengisi	Disko ntimitas Set	ω	Kondisi Air Tanah
1	70	42	337	28	103	2	Sedikit lapuk	0,5	None	2	2	Kering
2	88	56	9	36	53	4	Sedikit lapuk	0,8	None	2		Kering
3	90	18	170	62	97	2	Sedikit lapuk	0,6	None	1	4	Kering
4	103	68	9	65	124	4	Sedikit lapuk	0,5	None	2		Kering
5	97	36	3	23	164	4	Sedikit lapuk	1,1	None	1	4	Kering
6	84	75	172	4	110	6	Sedikit lapuk	0,9	None	2		Kering
7	83	3	180	3	103	6	Sedikit lapuk	0,7	None	4		Kering
8	45	3	144	43	142	4	Sedikit lapuk	1,2	None	4	4	Kering
9	46	82	139	8	107	4	Sedikit lapuk	0,3	None	1		Kering
10	56	85	143	12	113	8	Sedikit lapuk	0,3	None	1		Kering
11	73	29	330	51	96	6	Sedikit lapuk	0,4	None	2		Kering
12	57	79	328	22	112	4	Sedikit lapuk	0,6	None	2	3	Kering
13	24	82	138	11	115	4	Sedikit lapuk	0,5	None	1		Kering
14	57	83	316	28	130	4	Sedikit lapuk	0,6	None	2		Kering
15	39	71	315	26	143	4	Sedikit lapuk	1,3	None	2		Kering
16	36	68	314	24	151	6	Sedikit lapuk	0,4	None	2		Kering
17	44	68	318	14	147	4	Sedikit lapuk	0,2	None	2	7	Kering
18	45	42	316	15	157	4	Sedikit lapuk	0,2	None	2		Kering
19	49	78	326	18	141	4	Sedikit lapuk	0,3	None	2		Kering
20	78	58	327	9	146	4	Sedikit lapuk	0,4	None	2		Kering

## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1 Kondisi Umum Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada *tunnel* 1 yang terdapat pada lapisan batubara *seam* B1. Penggalian dilakukan searah dengan *strike* and *dip* perlapisan batubara (*seam* B1) pada N 19<sup>o</sup> E / 12<sup>o</sup>. Lubang bukaan utama pada *tunnel* 1 memiliki dimensi berbentuk trapesium dengan ukuran lebar bawah 3,5 m, lebar atas 3 m, dan tinggi 2,5 m.

Objek utama penelitian adalah blok II penambangan yang berada pada 136 m dari mulut terowongan dengan kemiringan lantai rata-rata 12<sup>o</sup>. Blok II memiliki ukuran lebar 50 m dan panjang 147 m serta berada pada elevasi 374 mdpl – 358 mdpl. Saat ini, blok tersebut telah berhenti produksi dan hanya menyisakan *pillar-pillar* kecil pada sisi *gob* dan *barrier pillar* yang berada didekat lubang bukaan utama (*tunnel* 1).

### 4.2 Perhitungan Sifat Fisik dan Mekanik Batuan

Batuan mempunyai sifat-sifat tertentu yang perlu diketahui dalam mekanika batuan, yaitu sifat fisik dan mekanik. Pengetahuan mengenai sifat fisik dan mekanik batuan sangat diperlukan dalam rangka kepentingan geoteknik. Informasi yang detail pada sampel yang diuji menjadi dasar dalam penentuan karakteristik massa batuan sesungguhnya dilapangan<sup>[11]</sup>.

#### 4.2.1 Sifat Fisik Batuan

Penentuan sifat fisik batuan dilakukan untuk mengetahui nilai parameter – parameter fisik batuan tanpa merusak percontohan batuan (*non destructive test*) yang diuji di laboratorium.

**Tabel 6.** Hasil perhitungan sifat fisik batuan

Material	Sampel	Bobot isi asli (gr/cm <sup>3</sup> )	Bobot isi kering (gr/cm <sup>3</sup> )	Bobot isi jenuh (gr/cm <sup>3</sup> )	Berat jenis semu	Berat jenis asli	Kadar air asli (%)	Kadar air jenuh (%)	Derajat Kejuhan (%)	Porositas (%)	Angsa Pori
Coal	1	1,32	1,26	1,34	1,26	1,38	4,71	6,86	68,66	8,63	0,09
	2	1,29	1,23	1,31	1,23	1,34	4,46	6,41	69,52	7,91	0,09
	3	1,33	1,28	1,35	1,28	1,38	4,58	6,12	74,78	7,81	0,08
	4	1,31	1,26	1,34	1,26	1,36	3,78	5,82	64,88	7,35	0,08
	5	1,31	1,30	1,34	1,30	1,35	0,92	2,69	34,26	3,50	0,04
		<b>1,31</b>	<b>1,27</b>	<b>1,34</b>	<b>1,27</b>	<b>1,36</b>	<b>3,69</b>	<b>5,58</b>	<b>62,42</b>	<b>7,04</b>	<b>0,08</b>
Siltstone	1	2,56	2,54	2,59	2,54	2,67	0,96	1,93	49,56	4,91	0,05
	2	2,53	2,51	2,56	2,51	2,66	1,07	2,27	47,37	5,69	0,06
	3	2,52	2,50	2,56	2,50	2,66	0,96	2,51	38,13	6,26	0,07
	4	2,55	2,53	2,59	2,53	2,69	0,89	2,35	37,85	5,95	0,06
	5	2,58	2,55	2,61	2,55	2,73	1,10	2,56	42,96	6,52	0,07
		<b>2,55</b>	<b>2,52</b>	<b>2,58</b>	<b>2,52</b>	<b>2,68</b>	<b>1,00</b>	<b>2,32</b>	<b>43,17</b>	<b>5,86</b>	<b>0,06</b>

#### 4.2.2 Sifat Mekanik Batuan

Nilai kuat tekan batuan ( $\sigma_c$ ) melalui pendekatan dengan nilai *Point Load Strength Index* (IS) dapat diperoleh dengan persamaan :

$$\sigma_c = 23 \cdot I_s \quad (7)$$

Keterangan

$\sigma_c$  = Kuat tekan batuan (Kg/cm<sup>2</sup>)

$I_s$  = *Point Load Index*

Nilai  $I_s$  dapat diperoleh dari persamaan berikut :

$$I_s = F \cdot P/D^2 \quad (8)$$

Keterangan

F = Faktor koreksi

P = Beban maksimal hingga percontohan pecah (Kg)

D = Jarak antara 2 konus penekan (cm)

Sementara itu, nilai faktor koreksi dapat diperoleh dari persamaan berikut :

$$F = (D/50)^{0,45}$$

Keterangan

D = Jarak antara 2 konus penekan (mm)

Berikut adalah hasil analisis uji *Point Load Strength Index* untuk mendapatkan nilai kuat tekan uniaksial batuan (UCS).

**Tabel 7.** Hasil perhitungan sifat mekanik batuan

Material	Sampel	D (cm)	D (mm)	P (Kn)	P (Kg)	F	$I_s$	$\sigma_c$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_c$ (MPa)
Coal	1	2,5	25	0,712	72,60	0,73	8,50	100,51	9,85
	2	3,7	37	0,965	98,40	0,87	6,28	74,19	7,27
	3	2,4	24	0,689	70,26	0,72	8,77	103,62	10,15
	4	3,4	34	0,839	85,55	0,84	6,22	73,54	7,21
	5	3,4	34	1,115	113,70	0,84	8,27	97,73	9,58
				0,864	88,10	0,80	<b>7,61</b>	<b>174,97</b>	<b>8,81</b>
Siltstone	1	3,9	39	3,514	358,32	0,89	21,07	249,00	24,40
	2	4	40	4,187	426,95	0,90	24,13	283,27	27,96
	3	4,15	41,5	5,759	587,25	0,92	31,36	370,62	36,32
	4	4,05	40,5	4,441	452,85	0,91	25,11	296,81	29,09
	5	3	30	3,72	379,33	0,79	33,49	395,88	38,80
				4,324	440,94	0,88	<b>27,03</b>	<b>621,73</b>	<b>31,31</b>

### 4.3 Perhitungan Tegangan Insitu

#### 4.3.1 Tegangan Vertikal

Perhitungan tegangan *insitu* vertikal ditentukan dari berat massa batuan diatas elemen dikalikan dengan kedalaman penggalian dari atas permukaan. Lapisan *overburden* adalah material *siltstone* dengan bobot isi sebesar 2,55 gr/cm<sup>3</sup> dan kedalaman penggalian 141 m.

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \sigma \cdot z \\ &= 2,55 \text{ gr/cm}^3 \times 141 \text{ m} \\ &= 2,55 \text{ ton/m}^3 \times 141 \text{ m} \\ &= 359,55 \text{ ton/m}^2 = 3,582 \text{ MPa} \end{aligned}$$

#### 4.3.2 Tegangan Horizontal

Tegangan horizontal diperoleh dari perkalian antara tegangan vertikal dengan rasio  $\sigma_h/\sigma_v$  (k). Untuk mencari nilai k dikalikan dengan nilai modulus deformasi (Eh) material beban. Dalam hal ini jenis material beban adalah *siltstone* dengan nilai Eh 10 GPa.

$$\begin{aligned} k &= 0,25 + 7 \text{ Eh} (0,001 + 1/z) \\ k &= 0,25 + 7 \times 10 (0,001 + 1/141) \\ &= 0,25 + 70 (0,008) \\ &= 0,81 \\ \sigma_h &= 0,81 \times 3,582 \\ &= 2,901 \text{ MPa} \end{aligned}$$

#### 4.4 Perhitungan Tegangan Pillar

Penentuan tegangan yang diterima *pillar* ditentukan berdasarkan teori pembebanan *tributary area* dengan formulasi yang diusulkan Trumbachev dan Melkinov (1964) untuk pilar berukuran 12 m x 12 m dan lebar penggalian 3,5 m (h) serta kemiringan lapisan 12<sup>o</sup>.

$$\begin{aligned} \sigma_p &= [\sigma_v (\cos^2 \alpha + m \sin \alpha)] \left[ \frac{(W_p + W_o)}{W_p} \right]^2 \\ &= [3,582 (\cos^2 12^\circ + 0,81 \sin 12^\circ)] \\ &\quad \left[ \frac{(12+3,5)}{12} \right]^2 \\ &= [3,582 (0,957 + 0,81 \times 0,208)] (1,668) \\ &= [3,582 (0,957 + 0,168)] (1,668) \\ &= 3,582 \times 1,125 \times 1,668 \\ &= 6,722 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Nilai m diperoleh dari perbandingan antara tegangan horizontal dengan tegangan vertikal.

$$\begin{aligned} m &= \sigma_h / \sigma_v \\ &= 2,901 / 3,582 \\ &= 0,81 \end{aligned}$$

#### 4.5 Perhitungan Kekuatan Pillar

Kekuatan pilar batubara diperoleh dengan menggunakan persamaan empiris Potvin, dkk (1989) dengan rumus seperti berikut:

$$\begin{aligned} \sigma_{ps} &= \sigma_c \cdot 0,4162 W/h \\ &= 8,81 \cdot 0,4162 \cdot 12/2,5 \\ &= 8,81 \cdot 0,4162 \cdot 4,8 \\ &= 17,6 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dengan ukuran pilar (W) 12 m x 12 m dan ketinggian (h) penggalian (ketebalan lapisan batubara 2,5 m).

#### 4.6 Faktor Keamanan Pillar

Faktor keamanan *pillar* diperoleh dari hubungan sederhana perbandingan antara kekuatan *pillar* dengan tegangan pada *pillar*. Nilai FK dapat ditentukan seperti perhitungan berikut.

$$\begin{aligned} SF &= \sigma_{ps} / \sigma_p \\ &= 17,6 / 6,775 \\ &= 2,62 \end{aligned}$$

Berdasarkan rekomendasi nilai *safety factor* (FK > 1,5) yang diusulkan oleh Potvin, dkk (1989), *pillar* dengan dimensi 12 x 12 m dinyatakan stabil.

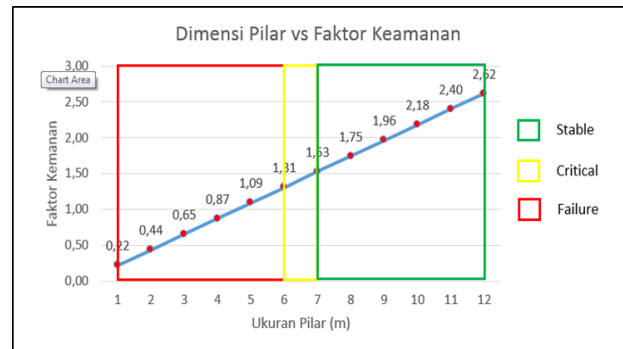
**Tabel 8.** Nilai FK untuk setiap ukuran dimensi *pillar* batubara

W (m)	H (m)	Pillar Strength (MPa)	Safety Factor
1	2,5	1,4667	0,22
2	2,5	2,9334	0,44
3	2,5	4,4001	0,65
4	2,5	5,8668	0,87
5	2,5	7,3334	1,09
6	2,5	8,8001	1,31
7	2,5	10,2668	1,53
8	2,5	11,7335	1,75
9	2,5	13,2002	1,96
10	2,5	14,6669	2,18
11	2,5	16,1336	2,40
12	2,5	17,6003	2,62

Tabel di atas menunjukkan nilai FK untuk simulasi setiap ukuran/ dimensi pilar pada tambang. Nilai FK akan meningkat seiring dengan peningkatan ukuran pilar setiap 1 meter. Dalam analisis ini, nilai FK dikelompokkan menjadi 3 kategori kemantapan untuk setiap ukuran pilar.

- Stable* : FK > 1,5 (≥ 7 meter)
- Critical*: 1,3 > FK < 1,5 (6 meter ≥ x < 7 meter)
- Failure*: FK < 1,3 (< 6 meter)

Rekomendasi ukuran pilar yang paling ideal berdasarkan klasifikasi di atas adalah 7 x 7 meter. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 3.** Variasi nilai FK untuk setiap ukuran/ dimensi *pillar* batubara

#### 4.7 Extraction Ratio

$$\begin{aligned} r &= \frac{(W_p + W_o)^2 - W_p^2}{(W_o + W_p)^2} \\ &= \frac{(12+3,5)^2 - 12^2}{(12+3,5)^2} \\ &= \frac{(15,5)^2 - 12^2}{(15,5)^2} \\ &= \frac{240,25 - 144}{240,25} \end{aligned}$$

$$= 0,400624$$

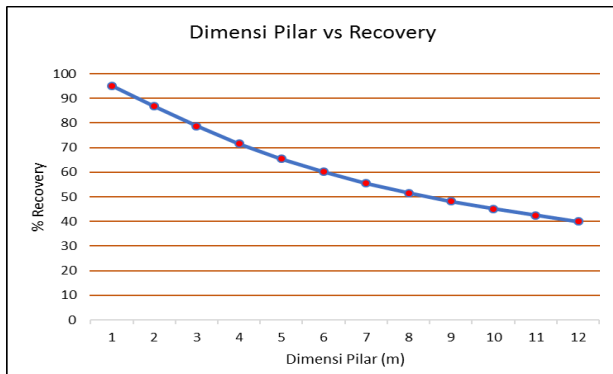
$$\% \text{ ratio} = 0,400624 \times 100\% = 40 \%$$

**Tabel 9.** Statistik perbandingan *rasio recovery* batubara dan lebar *pillar*

Wp (m)	Wo (m)	r	%
1	3,5	0,950617	95,06173
2	3,5	0,867769	86,77686
3	3,5	0,786982	78,69822
4	3,5	0,715556	71,55556
5	3,5	0,653979	65,39792
6	3,5	0,601108	60,1108
7	3,5	0,555556	55,55556
8	3,5	0,516068	51,60681
9	3,5	0,4816	48,16
10	3,5	0,451303	45,13032
11	3,5	0,424495	42,44946
12	3,5	0,400624	40,06243

Berdasarkan tabel diatas, persentase *recovery* batubara yang dapat diambil saat proses mining blok *development* adalah sekitar 40%. *Recovery* dapat dioptimalkan dengan memperluas penggalian dengan cara mereduksi ukuran *pillar* hingga 7 meter dengan *recovery* mencapai 55 %. Kenaikan *recovery* batubara untuk setiap ukuran *pillar* dapat dilihat pada grafik berikut.





Gambar 4. Grafik hubungan persentase recovery batubara dan dimensi *pillar*

#### 4.8 Klasifikasi Massa Batuan

##### 4.8.1 Rock Quality Designation (RQD)

Perhitungan RQD dilakukan dengan menggunakan persamaan Priest dan Hudson (1976) pada kedua sisi dinding terowongan. Adapun rata-rata nilai RQD pada lapisan batubara.

Tabel 10. Hasil analisis nilai RQD

Side	Scanline	Rata-rata spasi (m)	$\lambda$ (per meter)	RQD (%)
L	1	0,283	3,5398	95,0343
	2	0,270	3,7037	94,6211
	3	0,330	3,0303	96,2388
	4	0,148	6,7568	85,2605
	5	0,265	3,7736	94,4414
R	1	0,320	3,1250	96,0246
	2	0,385	2,5974	97,1577
	3	0,160	6,2500	86,9800
	4	0,280	3,5714	94,9556
	5	0,191	5,2239	90,2932
<b>Rata-rata RQD</b>				<b>93,1007</b>

##### 4.8.2 Rock Quality Designation (RQD)

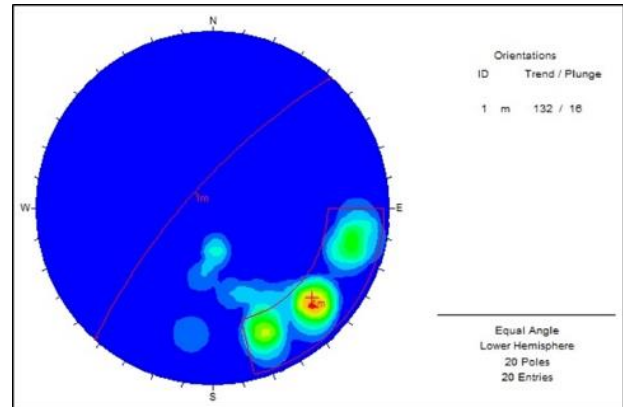
Nilai RMR adalah penjumlahan total dari bobot kuat tekan *uniaksial (Uniaxial Compressive Strength)*, *Rock Quality Designation (RQD)*, spasi *diskontinuitas*, keadaan *diskontinuitas*, keadaan air tanah dan orientasi *diskontinuitas*. Bobot masing-masing parameter RMR diperoleh dari tabel ringkasan *rock mass rating system*. Bobot yang digunakan adalah berdasarkan nilai ataupun kondisi parameter.

Untuk menentukan nilai parameter-parameter yang akan digunakan pada perhitungan RMR dilakukan perhitungan statistik sebagai berikut.

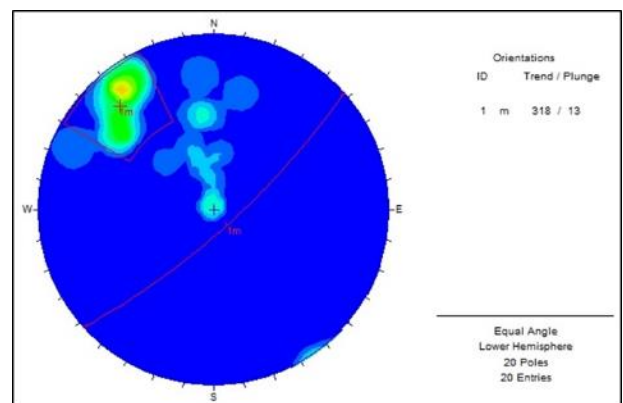
Tabel 11. Statistik data RMR

Parameter	Jumlah	Rata-rata	Max	Min	Mod	Med
$\lambda$ (m pangkat -1)	41,572	4,157	6,757	2,60	-	3,638
RQD (%)	931,00	93,10	97,15	85,2	-	94,78
Spasi (mm)	10000	250	740	30	-	215
Persistence (m)	43,89	1,10	1,64	0,13	-	1,10
JRC	190	5	8	2	4	4
Lebar Rongga (mm)	347	9	50	2	3	6
Material Pengisi	-	-	-	-	None	-
Pelapukan	-	-	-	-	Sedikit Lapuk	-
Kondisi Air	-	-	-	-	Kering	-

Analisis kinematik dilakukan untuk menentukan *orientasi diskontinuitas/ kekar* pada kedua dinding terowongan dengan menggunakan *software Dips V5*.



Gambar 5. Orientasi *diskontinuitas* dinding kiri



Gambar 6. Orientasi *diskontinuitas* dinding kanan

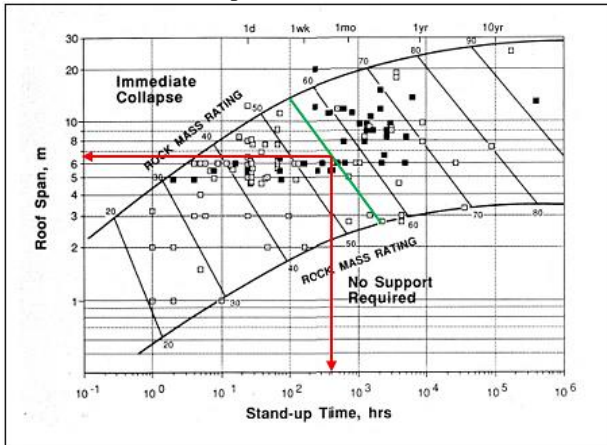
Tabel 12. Pembobotan nilai RMR

Parameter	Nilai/kondisi	Bobot	
UCS (MPa)	8,81	2	
RQD (%)	93,1	20	
Spasi (m)	0,25	10	
Kondisi Diskontinuitas	Persistence (m)	1,1	4
	Lebar Rongga (mm)	3	1
	Kekasaran	Sedikit kasar	3
	Material Pengisi	None	6
	Pelapukan	Sedikit lapuk	5
Air Tanah	Kering	15	
Orientasi Diskontinuitas ( $\phi$ )	Tidak menguntungkan (Terowongan)	-10	
<b>Bobot Total</b>		<b>56</b>	

Berdasarkan pembobotan nilai RMR (Bieniawski, 1989) disimpulkan bahwa lapisan batubara pada *seam B1* tergolong kedalam batuan kelas III dengan bobot total 56. Nilai 56 terletak pada *range* 41-60 yang termasuk kedalam batuan kelas sedang.

*Stand up time* dihitung menggunakan grafik hubungan antara *stand up time* dengan *span* untuk massa batuan berdasarkan klasifikasi geomekanika *Rock Mass Rating (RMR) system*, Bieniawski (1990). Dengan cara menarik garis lurus ke arah kiri untuk nilai *span* dan ke bawah untuk nilai *stand up time* dari garis tengah nilai

RMR yang telah dihitung. Maka dari titik perpotongan tersebut dapat diketahui nilai *stand up time* dan *span maximum* dari lokasi penelitian.



**Gambar 7.** Penentuan nilai Stand Up Time dan Span Maximum untuk nilai RMR 56 di lokasi penelitian

Dari grafik diatas dapat diketahui nilai *roof span* untuk jenis batuan (batubara) pada lokasi penelitian adalah 6,75 m dan *stand up time maximum* sekitar 580 jam.

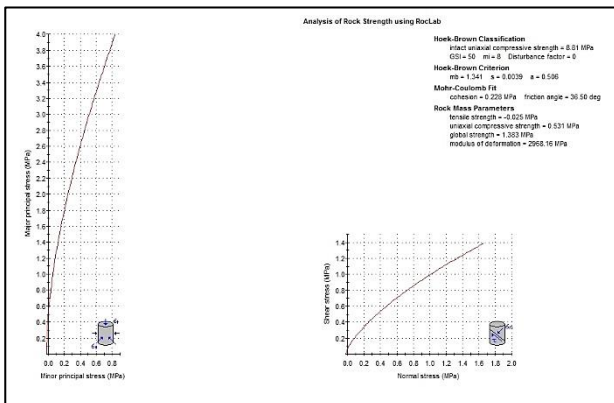
#### 4.9 Parameter Massa Batuan

Parameter berikut digunakan untuk memperoleh nilai kekuatan batuan utuh (*intact rock*), nilai kuat tarik, modulus *deformasi*, *kohesi*, dan sudut geser dalam menggunakan *software Roclab V 1.010* berdasarkan analisis tegangan *Mohr – Coulomb*.

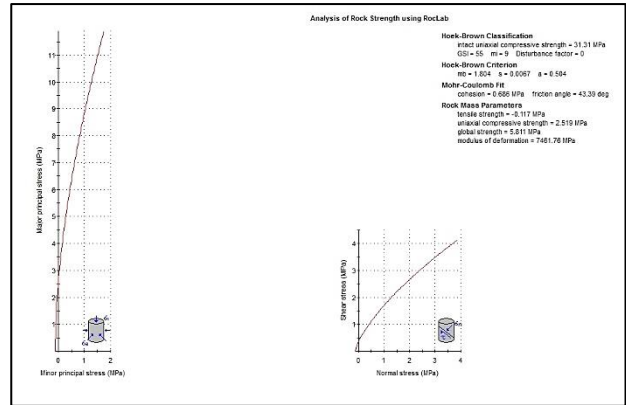
**Tabel 13.** Parameter input Roclab V 1.010

Input Data	Coal	Siltstone
UCS (MPa)	8,81	31,31
GSI	50	55
$m_i$	8	9
D	0	0
Bobot isi (MN/m <sup>3</sup> )	1,29	2,55
Kedalaman (m)	141	141

Berikut adalah hasil pengolahan data dengan menggunakan *software Roclab V 1.010*. Selanjutnya nilai ini dijadikan parameter input untuk mengetahui kondisi tegangan pada lubang bukaan dan *pillar* dengan menggunakan *software Phase2 V 8.0*.



**Gambar 8.** Kurva Mohr-Coulomb untuk lapisan batubara



**Gambar 9.** Kurva Mohr-Coulomb untuk lapisan batubara

Berikut adalah ringkasan nilai paramter massa batuan untuk setiap lapisan (batubara dan *siltstone*) hasil pengolahan data *roclab*.

**Tabel 14.** Parameter massa batuan

Siltstone	Coal
<b>Hoek Brown Classification</b>	<b>Hoek Brown Classification</b>
sigci 31.31 MPa	sigci 8,81 MPa
GSI 55	GSI 50
mi 9	mi 8
D 0	D 0
<b>Hoek Brown Criterion</b>	<b>Hoek Brown Criterion</b>
mb 1.80414	mb 1.34142
s 0.00673795	s 0.00386592
a 0.504048	a 0.505734
<b>Failure Envelope Range</b>	<b>Failure Envelope Range</b>
Application Tunnels	Application Tunnels
sig3max 1.73927 MPa	sig3max 0.840938 MPa
Unit Weight 0.0255 MN/m <sup>3</sup>	Unit Weight 0.0129 MN/m <sup>3</sup>
Tunnel Depth 141 m	Tunnel Depth 141 m
<b>Mohr-Coulomb Fit</b>	<b>Mohr-Coulomb Fit</b>
c 0.686133 MPa	c 0.227626 MPa
phi 43.3935 degrees	phi 36.5001 degrees
<b>Rock Mass Parameters</b>	<b>Rock Mass Parameters</b>
sigt -0.116934 MPa	sigt -0.0253901 MPa
sigc 2.51858 MPa	sigc 0.530602 MPa
sigcm 5.81118 MPa	sigcm 1.38282 MPa
Em 7461.76 MPa	Em 2968.16 MPa

#### 4.10 Permodelan Numerik

Permodelan dilakukan untuk melihat bagaimana kondisi tegangan dan *strength factor/ safety factor* pada lokasi *block II*. Perubahan kondisi tegangan dan *safety factor* ditampilkan dalam 3 tahapan (*stage*), yaitu sebelum penggalian dilakukan, saat proses *development* (penggalian *local shaft*), dan saat *retreat mining* (pilar diekstraksi seluruhnya).

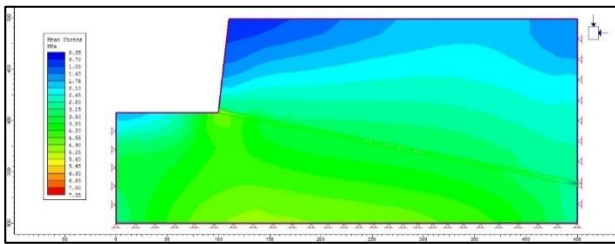
Berikut adalah hasil permodelan 2D menggunakan *software Phase2 V 8.005* untuk parameter *mean stress* dan *strength factor*.

##### 4.10.1 Mean Stress

Berikut adalah model 2D kondisi perubahan tegangan selama proses penggalian dilakukan yang dibagi kedalam 3 tahapan.

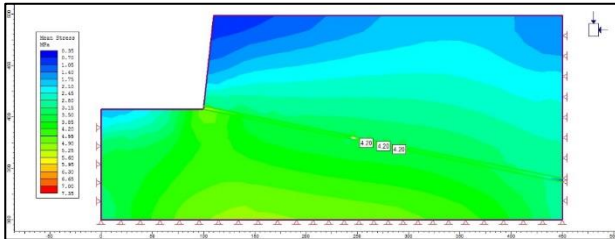


#### 4.10.1.1 Sebelum Penggalian dilakukan



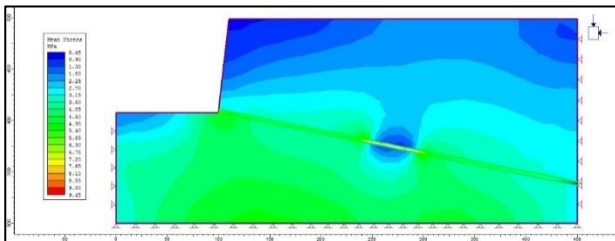
Gambar 10. Kondisi tegangan saat sebelum penggalian

#### 4.10.1.2 Saat Proses Development



Gambar 11. Kondisi tegangan saat proses development

#### 4.10.1.3 Saat Proses Retreat Mining (Ekstraksi Pilar)

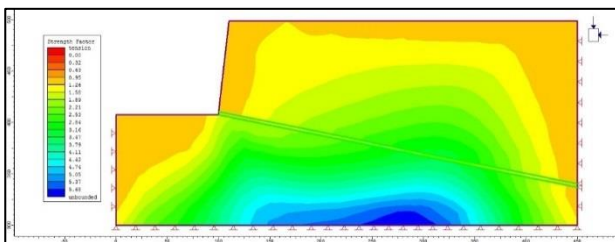


Gambar 12. Kondisi tegangan saat proses retreat mining

Dari 3 model diatas dapat diketahui bagaimana perubahan kondisi tegangan pada setiap tahapan penambangan. Penggalian local shaft saat proses development tidak terlalu berpengaruh besar terhadap perubahan kondisi tegangan secara keseluruhan. Hal ini di karenakan lokasi penggalian cukup dalam dan area penggalian juga tidak terlalu luas. Perubahan kondisi tegangan cukup besar terjadi saat proses retreat mining, dimana pada area mining block (blok II) mengalami kondisi perubahan tegangan yang cukup signifikan.

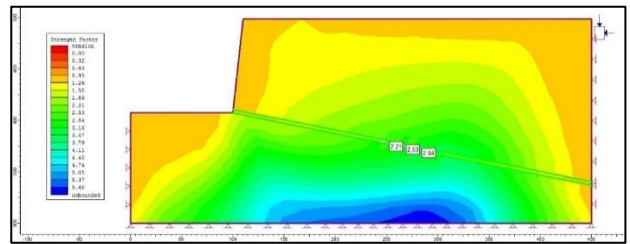
### 4.10.2 Strength Factor

#### 4.10.2.1 Sebelum Penggalian dilakukan



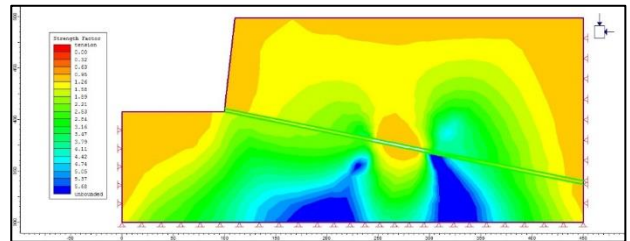
Gambar 13. Kondisi strength factor saat sebelum penggalian

#### 4.10.2.2 Saat Proses Development



Gambar 14. Kondisi strength factor saat proses development

#### 4.10.2.3 Saat Proses Retreat Mining



Gambar 15. Kondisi strength factor saat proses retreat mining

Penggalian pada area mining block (blok II) juga mempengaruhi nilai strength factor pada area tersebut. Penurunan nilai strength factor ke kondisi kritis (failure) terjadi saat proses development hingga proses retreat mining. Nilai strength factor pada area blok II saat proses development berkisar antara 2,21 – 2,84 (rata-rata 2,53)

Penentuan kestabilan lubang bukaan dan pilar pada penambangan bawah tanah metoda room and pillar dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya seperti kedalaman penggalian, jenis material, geometri penambangan, kondisi struktur geologi dan karakteristik massa batuan.

Tabel 15. Perbandingan perhitungan secara analitik dan numerik

Parameter	Mean Stress (MPa)	Strength Factor
Metoda Analitik	6,722	2,62
Numerik (Phase2)	4,2	2,53

Secara analitis nilai tegangan rata-rata untuk setiap pilar adalah 6,722 MPa, sedangkan secara numerik menggunakan bantuan perangkat lunak phase2 nilai tegangan rata-rata pada setiap pilar 4,2 MPa. Nilai FK pilar berdasarkan perhitungan analitik adalah 2,62, sedangkan secara numerik menggunakan software phase2 2,53. Secara umum, analisis kestabilan lubang bukaan dan pilar secara analitik dan numerik melalui permodelan 2D memiliki hasil yang tidak jauh berbeda. Dengan demikian, kedua cara ini dapat digunakan bersama-sama dalam perancangan geometri suatu penambangan yang sesuai dengan kajian geoteknik komprehensif.

Evaluasi perencanaan geometri penambangan dapat dilakukan dalam rangka peningkatan recovery batubara dengan pertimbangan faktor keamanan melalui sebuah simulasi perhitungan untuk beberapa ukuran pilar.

**Tabel 16.** Simulasi perhitungan nilai *extraction ratio* dan *safety faktor* untuk setiap ukuran *pillar*

Lebar Pilar Wp (m)	Tinggi Pilar H (m)	Extraction Ratio R (%)	Tegangan pada Pilar $\sigma_p$ (MPa)	Pillar Strength (MPa)	Safety Factor	Ket.
1	2,5	95,06	6,722	1,4667	0,22	Failure
2	2,5	86,78	6,722	2,9334	0,44	Failure
3	2,5	78,69	6,722	4,4001	0,65	Failure
4	2,5	71,55	6,722	5,8668	0,87	Failure
5	2,5	65,39	6,722	7,3334	1,09	Failure
6	2,5	60,11	6,722	8,8001	1,31	Critical
7	2,5	55,55	6,722	10,2668	1,53	Stable
8	2,5	51,61	6,722	11,7335	1,75	Stable
9	2,5	48,16	6,722	13,2002	1,96	Stable
10	2,5	45,13	6,722	14,6669	2,18	Stable
11	2,5	42,45	6,722	16,1336	2,40	Stable
12	2,5	40,06	6,722	17,6003	2,62	Stable

Tabel diatas menunjukkan bahwa ukuran pilar akan mempengaruhi beberapa parameter seperti *recovery* penambangan, kekuatan pilar, dan faktor keamanan (*safety factor*). *Recovery* batubara akan meningkat seiring dengan reduksi ukuran pilar. Sementara itu nilai kekuatan pilar dan faktor keamanan akan meningkat jika ukuran pilar diperbesar pada kondisi tegangan bawah permukaan yang sama. Dari simulasi perhitungan sederhana diatas, kita dapat mengetahui ukuran pilar yang paling ideal berdasarkan pertimbangan ekonomis dan faktor keselamatannya. Dalam kasus ini, rekomendasi yang diberikan berdasarkan kajian geoteknis sebelumnya adalah ukuran pilar dapat direduksi untuk meningkatkan produksi pada proses *development* panel pilar. Ukuran pilar yang paling ideal adalah 7 m x 7 m dengan estimasi *recovery* sebesar 55,5 % dari yang sebelumnya hanya 40 % dengan nilai Faktor Keamanan 1,53.

Selain itu, karakterisasi massa batuan juga sangat dibutuhkan untuk memberikan panduan pada saat aktivitas penggalian dilakukan. Karakterisasi massa batuan dilakukan dengan cara mengklasifikasi massa batuan berdasarkan klasifikasi *Rock Mass Rating* (RMR) *System* yang dikembangkan oleh Bieniawski (1989). Lubang bukaan dan pilar berada pada lapisan batubara dengan nilai RMR sebesar 56, dimana waktu *stand up time* yang di rekomendasikan adalah selama 580 jam dengan pemasangan penyanggaan setiap 6,75 meter.

## 5. Kesimpulan dan Saran

### 5.1 Kesimpulan

- Besarnya tegangan pada pilar berdasarkan teori pembebanan *Tributary Area* adalah 6,775 MPa dengan estimasi tegangan *insitu* pada lokasi *mining block* II adalah sebagai berikut ; tegangan *insitu* vertikal 3,582 MPa dan horizontal 2,901 MPa dengan rasio tegangan 0,81.
- Nilai *safety factor* (FK) pilar dengan ukuran 12 m x 12 m pada area blok II adalah 2,62 dengan kekuatan pilar batubara adalah sebesar 17,6 MPa. Berdasarkan rekomendasi nilai FK empiris, pilar pada blok II dinyatakan stabil karena nilai FK lebih besar dari 1,5 (FK>1,5).

- Nilai RMR batubara pada lokasi penambangan adalah 56, dimana jenis batuan ini termasuk kedalam batuan kelas III (batuan sedang) dengan rentang *stand up time* selama 580 jam dan span setiap 6,75 meter berdasarkan rekomendasi kelas massa batuan (Bieniawski, 1989).
- Rekomendasi ukuran pilar paling ideal berdasarkan kajian geoteknis sebelumnya adalah 7 m x 7 m dengan *recovery* maksimum sebesar 55 % dan *safety factor* sebesar 1,53.
- Hasil permodelan 2D dengan software *Phase2* menunjukkan penggalian *local shaft* saat proses *development* tidak terlalu berpengaruh signifikan terhadap kondisi tegangan secara keseluruhan dengan nilai *strength factor* berkisar antara 2.21 – 2,84.

### 5.2 Saran

- Rekomendasi perancangan dimensi *pillar* perlu diteliti lebih lanjut untuk beberapa kasus mining blok lainnya guna mensimulasikan dimensi *pillar* optimum untuk suatu area lokasi penambangan dengan karakteristik lapisan yang berbeda.
- Perlu dilakukannya pengukuran tegangan *insitu* secara langsung dilapangan, mengingat kondisi setiap perlapisan pada tambang batubara bawah tanah yang bersifat tidak menerus karena adanya struktur patahan, lipatan, dan kekar.
- Penelitian ini bisa dijadikan referensi bagi perusahaan dalam merancang geometri penambangan, khususnya pada tambang batubara bawah tanah metoda *room & pillar* berdasarkan kajian geoteknis yang komprehensif.

### Daftar Pustaka

- Melani, S. *Penentuan Tegangan Terinduksi Dan Penilaian Risiko Keruntuhan Atap Pada Tambang Batubara Bawah Tanah Metode Room And Pillar*. Prosiding SNRT, Politeknik Negeri Banjarmasin. 2016.
- Sulistianto. B, dkk. *Diktat Sistem Penambangan ITB*. Departemen Teknik Pertambangan ITB, Bandung. 2008.
- Trides. T, dkk. *Rancangan Geometri Web Pillar dan Barrier Pillar pada Metode Penambangan Dengan Sistem Auger*. Prosiding Seminar Nasional Teknologi IV, Samarinda. (2017)
- Yusuf, A. Muri. *Metodologi Penelitian Teliti & Hati-hati*. Jakarta: Prenamedia Group. (2005)
- Brady, B. H. G dan Brown, E. T. *Rock Mechanics for Underground Mining*, Third Edition. (2003)
- Lunder, P. J. *Hard Rock Pillar Strength Estimation an Applied Empirical Approach*. Master Degree Thesis, Universty of British Colombia, Canada. (1994)
- Potvin, dkk. *Rib Pillar Design in Open Stope Mining*. Can. Inst. Min. Metall. Bull. (1989)
- Bieniawski Z. T. *Engineering Rock Mass Classifications*. John Willey & Sons, New York, p. 251. (1989)

- [9] Coulthard, M.A. *Distinct element modelling of mining-induced subsidence — A case study*. In *Proceedings of Conference on Fractured and Jointed Rock Masses*, Rotterdam. (1995)
- [10] Rai, Made Astawa, dkk. *Mekanika Batuan*. ITB: Bandung. (2012)
- [11] Brown, E. T. *Rock Characterization, Testing, and Monitoring: ISRM Suggested Methods*. Pergamon Press, New York. (1981)
- [12] Desmawita, I., Kopa, R., & Gusman, M. *Analisis Kestabilan Lubang Bukaannya Berdasarkan Klasifikasi Geomekanika Pada Tambang Bawah Tanah CV. Tahiti Coal, Kota Sawahlunto, Sumatera Barat*. *Bina Tambang*, 3(1), 365-378. (2018)
- [13] Murad, M. S., & Ningsih, I. S. *Analisis Kuat Tekan Terhadap Waktu Stand-Up CI-G Pertambangan Bawah Tanah PT. NAL Sawahlunto Sumatera Barat*. *Sains Dan Teknologi STTIND Padang*, 18(1). (2018)
- [14] Prengki, I., & Heriyadi, B. (2018). *Analisis Beban Runtuh dan Evaluasi Lubang Bukaannya Berdasarkan Metode Rock Mass Rating dan Q-System pada Tambang Bawah Tanah CV. Bara Mitra Kencana, Kota Sawahlunto, Sumatera Barat*. *Bina Tambang*, 3(4), 1729-1739. (2018)