



ANALISIS KESTABILAN *PILLAR* PADA BEKAS TAMBANG MANGAN KLIRIPAN, KULON PROGO, YOGYAKARTA

PILLAR STABILITY ANALYSIS OF THE FORMER KLIRIPAN MANGANESE MINE, KULON PROGO, YOGYAKARTA

E. A. Valinka^{1*}, S. Saptono²

^{1,2}Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, UPN “Veteran” Yogyakarta

^{1,2}Jl. SWK 104 (Lingkar Utara), Yogyakarta 55283 Indonesia

e-mail: *112220043@student.upnyk.ac.id

ABSTRAK

Kawasan bekas tambang mangan bawah tanah Kliripan di Kulon Progo memiliki potensi besar sebagai situs warisan geologi (*geoheritage*), namun kondisi lubang bukaan yang telah lama ditinggalkan menuntut evaluasi geoteknik mendalam guna menjamin keselamatan jangka panjang. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat kestabilan pilar penyangga tersisa dengan mengintegrasikan perhitungan teoritis dan simulasi komputer. Metodologi yang diterapkan pada penelitian ini adalah dengan mengombinasikan metode analitik dan metode numerik. Secara analitik, kekuatan pilar dihitung menggunakan formula empiris Obert dan Duvall serta beban pilar diestimasi melalui *Tributary Area Theory* untuk mendapatkan nilai Faktor Keamanan (FK). Selanjutnya, pemodelan numerik dengan menggunakan bantuan *software Phase2* sehingga akan menghasilkan faktor keamanan pada *room and pillar*. Hasil analisis analitik menunjukkan nilai FK rata-rata pilar sebesar 1,29 yang diklasifikasikan dalam kondisi tidak aman berdasarkan Keputusan Menteri ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik yang menyatakan bahwa nilai ambang batas dari faktor keamanan pada tambang bawah tanah untuk *non fixed facility* minimal adalah 1,5. Temuan ini diperkuat oleh simulasi numerik yang memperlihatkan bahwa nilai faktor keamanan >1,5 hanya pada lokasi 5 namun lokasi lainnya masih bernilai <1,5. Sedangkan, metode analitik menghasilkan nilai faktor keamanan >1,5 hanya terdapat pada 4 *pillar* dengan masing-masing 1 lokasi, serta 2 *pillar* 1 lokasi. Berdasarkan kedua pendekatan tersebut, disimpulkan bahwa pilar penyangga dalam kondisi tidak stabil dikarenakan nilai kekuatan dari batuan atau *Uniaxial Compressive Strength* tergolong bernilai kecil yaitu 2,2825 mPa, sehingga apabila tambang mangan bawah tanah ini akan dibuka kembali diperlukannya evaluasi geoteknik secara berkala atau penambahan penyangga.

Kata kunci: kestabilan pilar, metode numerik, metode analitik, faktor keamanan, tambang bawah tanah

ABSTRACT

The former underground manganese mining area of Kliripan in Kulon Progo possesses significant potential as a *geoheritage* site; however, the condition of the long-abandoned openings necessitates a profound geotechnical evaluation to ensure long-term safety. This study aims to evaluate the stability of the remaining support pillars by integrating theoretical calculations and computer simulations. The methodology employed in this research combines analytical and numerical methods. Analytically, pillar strength was calculated using the Obert and Duvall empirical formula, while pillar load was estimated through the *Tributary Area Theory* to determine the Factor of Safety (FS). Subsequently, numerical modeling was conducted using *Phase2* software to generate the factor of safety for the *room and pillar* configurations. The results of the analytical analysis show an average FS value of 1.29, which is classified as unstable according to the Decree of the Minister of Energy and Mineral Resources No. 1827 K/30/MEM/2018 regarding the Guidelines for the Implementation of Good Mining Engineering Practices. This regulation states that the minimum threshold for the factor of safety in underground mines for *non-fixed facilities* is 1.5. These findings are corroborated by numerical simulations, which demonstrate that an FS value >1.5 occurs only at location 5, while other locations remain <1.5. Meanwhile, the analytical method produced FS values >1.5 for only four pillars at one specific location and two pillars at another location. Based on both approaches, it is concluded that the support pillars are in an unstable condition due to the low *Uniaxial Compressive Strength* (UCS) of the rock, valued at 2.2825 MPa. Consequently, if this underground manganese mine is to be reopened, periodic geotechnical evaluations or the installation of additional support systems are strictly required.

Keywords: pillar stability, numerical method, analytical method, factor of safety, underground mine

PENDAHULUAN

Tambang mangan yang terletak di Kliripan, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta dibangun sejak tahun 1972 oleh PT Pertambangan Wonokembang Kliripan yang mayoritas pekerjaannya berasal dari warga sekitar daerah pertambangan. Awalnya tambang ini dikelola oleh Belanda pada masa penjajahan, namun ketika Indonesia merdeka pihak Belanda menyerahkannya kembali. Beraneka macam bijih mangan terletak pada lokasi bekas tambang mangan, mulai dari mangan primer hingga mangan sekunder. Endapan mangan yang terletak pada lokasi ini berasosiasi dengan batugamping Formasi Sentolo [1]. Namun, tambang mangan bawah tanah yang mulanya dianggap menguntungkan terpaksa ditutup. Banjir yang terjadi dihasilkan oleh resapan air di antara bebatuan gamping menyebabkan banjir pada ketiga terowongan yaitu terowongan Sunoto, terowongan I.T.B., dan terowongan Holiday. Hal ini memengaruhi jumlah produksi mangan sehingga dilakukannya penutupan tambang bawah tanah secara permanen.

Metode yang digunakan dalam penambangan mangan di Kliripan, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta adalah *room and pillar*. Hal ini didukung dengan adanya peta produksi mangan tambang bawah tanah yang dapat diakses pada Rumah Arsip Kliripan. Rumah Arsip Kliripan menyediakan keseluruhan data mengenai penambangan mangan di Kliripan, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Metode *room and pillar* merupakan suatu metode yang digunakan terkhusus pada tambang bawah tanah. Metode penambangan ini seperti namanya dilakukan dengan mengekstraksi cadangan komoditas atau dapat disebut dengan *room* dan meninggalkan *pillar-pillar* atau tiang-tiang penyangga. Pilar-pilar ini secara strategis ditempatkan dan dipertahankan untuk penopang alami, tujuannya adalah menjaga kestabilan atap terowongan atau suatu ruangan pada tambang bawah tanah, sehingga mencegah keruntuhan yang bisa membahayakan pekerja dan peralatan [2].

Penutupan tambang bawah tanah di Kliripan, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta hanya meninjau pada aspek hidrogeologi atau air tanah saja. Diperlukannya penelitian yang meninjau terkhususnya pada aspek kestabilan *room and pillar* untuk mempertimbangkan apakah keputusan dalam penutupan tambang mangan bawah tanah ini sesuai, karena keberadaan air tanah memiliki pengaruh terhadap kestabilan [3]. Hingga saat ini, belum diketahui secara pasti bagaimana kondisi kestabilan *room and pillar* setelah terjadinya penutupan akibat dari adanya genangan air.

Memperkirakan kestabilan atau nilai faktor keamanan suatu *room and pillar* dapat menggunakan beberapa metode, diantaranya adalah metode analitik dan metode numerik. Metode analitik dilakukan dengan

memperhitungkan rumus matematika yang digunakan untuk menentukan faktor keamanan suatu *room and pillar*. Faktor yang memengaruhi dalam perhitungan faktor keamanan dengan menggunakan metode analitik terdiri dari kedalaman, dimensi *room and pillar*, nilai *Uniaxial Compressive Strength*, dan kondisi pembebanan pada *pillar*. Selain menggunakan metode analitik, agar nilai faktor keamanan dapat semakin tervalidasi diperlukannya analisis dengan menggunakan metode numerik. Beberapa faktor yang memengaruhi dalam proses analisis menggunakan metode numerik, seperti dimensi *room and pillar*, *material properties* dan kondisi *field stress*. Dalam menganalisis faktor keamanan ini menggunakan *software* Phase2 dengan kriteria Mohr-Coulomb.

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas dan memperhitungkan mengenai kestabilan *room and pillar*. Li, dkk (2021) melalui pendekatan numerik menyimpulkan bahwa variasi nilai tegangan dan dimensi pada suatu *room and pillar* dapat memengaruhi nilai faktor keamanan, variasi tegangan yang digunakan mulai dari 6 mPa hingga 10 mPa serta dimensi yang digunakan terkhusus pada lebar *pillar* adalah 4 meter dan 6 meter [4]. Kim, dkk (2019) melakukan penelitian yang membandingkan antara pendekatan numerik dan pendekatan analitik. Untuk pendekatan numerik dilakukan dengan menggunakan *software* berupa FLAC2D untuk mendapatkan nilai faktor keamanan tambang batu gamping Nohyun, Korea Selatan. Hasilnya adalah terdapat perbedaan pada masing-masing *pillar* yang memiliki variasi pada kedalaman dan nilai *Uniaxial Compressive Strength*. Sedangkan pendekatan analitik mengacu pada beberapa persamaan, mulai dari persamaan menurut Obert dan Duvall, Hedley dan Grant, hingga persamaan Jessu yang menghasilkan bahwa terdapat kekurangan dalam penggunaan metode analitik apabila dibandingkan dengan metode numerik dikarenakan terdapat inputan yang berupa konstanta atau nilai tetap [5]. Selain beberapa faktor tersebut yang dapat memengaruhi nilai faktor keamanan pada *room and pillar*, Zenah, dkk (2024) dengan menggunakan bantuan *software* RS3 dan menggunakan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb mengemukakan bahwa ukuran dari suatu *pillar* akan memengaruhi kestabilan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan dari suatu *room and pillar* setelah terjadinya penutupan pada tambang mangan bawah tanah di Kliripan, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta akibat dari adanya genangan air. Fokus utama dari penelitian ini adalah dapat memberikan pertimbangan mengenai penutupan tambang mangan bawah tanah di Kliripan, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta dengan meninjau pada aspek geoteknik. Penelitian ini dibatasi pada lokasi *ore* mangan dan *country rock* yang dianggap bahwa endapan mangan di lokasi ini cenderung datar dan mengikuti lebar dari *room* dengan mempertimbangkan ciri khas dari penggunaan metode *room and pillar* pada cebakan yang relatif datar [6]. Selain itu, penelitian ini juga dibatasi

dengan kedalaman yang sama terhadap beberapa kondisi *room and pillar* yang didapatkan dari data Rumah Arsip Kliripan. Analisis kestabilan hanya dilakukan pada salah satu terowongan saja yaitu terowongan I.T.B. yang memiliki keterangan dimensi lebih jelas. Hipotesis awal yang diajukan untuk penelitian ini adalah adanya perubahan pada faktor keamanan setelah tertutupnya tambang bawah tanah yang diakibatkan dari adanya genangan air.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan mengkombinasikan proses pengamatan secara langsung pada lokasi penelitian dan secara tidak langsung dengan mendapatkan data dari beberapa sumber terpercaya dan terverifikasi. Setelah melakukan pengamatan baik secara langsung dan tidak langsung, dilakukan pengujian di Laboratorium Mekanika Batuan Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta untuk mendapatkan beberapa parameter yang dibutuhkan dalam penelitian ini. Kemudian dilanjutkan dengan pengolahan data serta analisis dari informasi dan pengujian yang sudah dilakukan untuk mendapatkan kesimpulan dari hasil penelitian yang diinginkan. Prosedur penelitian yang dilakukan untuk mendapatkan hasil dan kesimpulan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pendekatan riset yang digunakan dalam studi ini didasarkan pada kombinasi kuat antara kajian literatur dan survei lapangan yang sudah dilakukan peneliti terdahulu. Pada tahap awal, penelitian ini menggunakan studi literatur yang berfokus secara khusus pada penelitian-penelitian terdahulu yang memiliki korelasi atau keterkaitan erat. Fokus utamanya adalah mengumpulkan informasi dan temuan yang relevan mengenai metode penambangan *room and pillar*, terutama yang melibatkan komoditas yang sama dengan objek penelitian saat ini. Analisis literatur ini berfungsi sebagai landasan teoritis dan perbandingan teknis untuk merumuskan konteks dan interpretasi hasil lapangan.

2. Observasi Lapangan

Peneliti secara langsung melaksanakan observasi lapangan untuk mengumpulkan beberapa data, yang dikelompokkan menjadi data sekunder dan data primer. Data sekunder diperoleh dari arsip resmi yang tersimpan di Rumah Arsip Kliripan (Gambar 1). Data sekunder ini sangat penting untuk membangun latar belakang historis dan kondisi awal lokasi, mencakup: dimensi *room and pillar* terkhususnya yang berada di terowongan I.T.B. yang dapat ditinjau melalui peta operasi produksi dari berbagai terowongan yang ada pada tambang mangan Kliripan, berbagai dokumentasi visual dan tertulis yang relevan, serta data detail mengenai karakteristik terowongan yang ada di Kliripan dibuktikan oleh arsip hasil wawancara pekerja. Sementara itu, data primer didapatkan langsung melalui pengambilan sampel di lokasi

(Gambar 2). Pengambilan *rock sampling* (sampel batuan) untuk analisis laboratorium guna menentukan sifat-sifat geomekanik batuan utuh.



Gambar 1. Rumah Arsip Kliripan



Gambar 2. Pengambilan Sampel Batuan

3. Pengolahan dan Analisis Data

Data penelitian yang diperoleh perlu diolah mulai dari data sekunder hingga data primer. Data primer yang didapatkan berupa hasil pengujian *Uniaxial Compressive Strength* batuan mangan yang diambil langsung dari lokasi penelitian. Sedangkan, data sekunder yang digunakan yaitu peta operasi produksi dari berbagai terowongan yang ada pada tambang mangan Kliripan untuk mendapatkan ukuran dari *room and pillar*, berbagai dokumentasi visual selama operasi penambangan berlangsung dan hasil wawancara tertulis oleh para pekerja untuk mendapatkan kondisi saat proses penambangan. Pengolahan data dilakukan agar dapat mengetahui parameter-parameter yang dibutuhkan untuk melakukan analisis kestabilan pada *room and pillar*. Analisis kestabilan *room and pillar* pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan dua metode, yaitu metode analitik dan metode numerik.

Metode Analitik

Metode analitik adalah metode yang dilakukan dengan penyelesaian secara sistematis dan menggunakan rumus matematik yang sudah ditemukan dan dievaluasi oleh

beberapa peneliti terdahulu [7]. Metode analitik digunakan dalam perhitungan kestabilan *room and pillar*, mulai dari perhitungan faktor keamanan hingga beberapa parameter yang dibutuhkan lainnya. Beberapa parameter diantaranya adalah besaran tegangan yang dimiliki suatu *pillar* dan beban yang dapat ditahan *pillar* atau *pillar strength*. Beban yang dapat ditahan oleh suatu *pillar* dapat diperhitungkan melalui persamaan yang dicetuskan oleh Obert & Duvall (1967).

$$S_p = \sigma_c(0,778 + 0,222 \frac{w}{h}) \quad (1)$$

Dengan S_p mewakili *output* yang ingin didapatkan yaitu seberapa kuat *pillar* menahan tekanan yang diberikan pada material umumnya memiliki satuan mPa, lalu σ_c mewakili kekuatan suatu batuan atau *Uniaxial Compressive Strength* yang pada kali ini dilakukan pengujian di Laboratorium Mekanika Batuan Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta, nilai ini memiliki satuan mPa. Sedangkan w adalah lebar *pillar* dan h adalah tinggi *pillar* yang keduanya bersatuan meter [8]. Penggunaan rumus ini umumnya digunakan ketika dilakukannya pengujian untuk mendapatkan nilai σ_c [9].

Kondisi tegangan rata-rata pada suatu *pillar* juga dapat diperhitungkan melalui persamaan yang dicetuskan oleh Obert & Duvall (1967) sebagai berikut.

$$\sigma_p = \sigma_v \frac{(W_p + W_o)(L_p + W_o)}{W_p \times L_p} \quad (2)$$

Dimana σ_p mewakili kondisi pembebanan pada suatu *pillar* atau beban yang dapat ditahan dari adanya *pillar* tersebut. Nilai σ_v adalah tegangan vertikal dan dapat ditentukan berdasarkan hasil perkalian antara berat isi batuan yang ada pada sekitar *pillar* dengan kedalaman sehingga memiliki satuan mPa. Sedangkan W_o merupakan lebar dari *room*, lalu W_p merupakan parameter dari lebar dari *pillar*, L_o merupakan panjang dari *room*, serta L_p mewakili panjang dari *pillar* dengan masing-masing memiliki satuan meter.

Perhitungan faktor keamanan melalui metode analitik yang menyesuaikan dengan metode *room and pillar* juga dicetuskan oleh Obert & Duvall (1967), berikut merupakan persamaan yang dapat digunakan:

$$FK = \frac{S_p}{\sigma_p} \quad (3)$$

FK di sini mewakili nilai faktor keamanan yang akan didapatkan melalui perhitungan Obert & Duvall (1967) melalui *input* nilai S_p yaitu *pillar strength* dan σ_p merupakan tegangan rata-rata yang dimiliki suatu *pillar* untuk menahan beban tersebut.

Metode Numerik

Metode numerik dalam kestabilan *room and pillar* diperlukan agar dapat memberikan gambaran terhadap perilaku umum suatu massa batuan seperti perpindahan atau *displacement* secara detail [10]. Pelaksanaan penelitian dengan menggunakan metode ini dapat dilakukan dengan bantuan *software*, salah satunya adalah *software* Phase2. *Software* ini dapat memudahkan dalam penentuan *output* yang dibutuhkan dalam analisis kestabilan *room and pillar*, seperti *strength factor*. Kriteria keruntuhan yang digunakan dalam analisis kestabilan *room and pillar* pada penelitian ini adalah Mohr-Coulomb. Persamaan untuk mengetahui keruntuhan Mohr-Coulomb dengan kolerasi antara nilai tegangan geser dan tegangan normal dapat ditentukan sesuai dengan persamaan berikut.

$$\tau = C + \mu \sigma \quad (4)$$

Keterangan:

τ = Tegangan geser (mPa)

C = Kohesi (mPa)

μ = Koefisien gesek dalam dari batuan = $\tan \phi$

σ = Tegangan normal (mPa)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Terowongan I.T.B.

Penelitian kali ini akan berfokus pada dimensi *room and pillar* terkhususnya pada terowongan I.T.B. Data dari terowongan I.T.B. cukup lengkap sehingga *input* tidak terlalu banyak membutuhkan asumsi, melainkan berdasarkan data aktual yang terjadi. Data-data aktual ini berdasar pada peta operasi produksi mangan dan laporan-laporan yang dapat diakses pada Rumah Arsip Kliripan. Selain itu, terowongan I.T.B menjadi salah satu terowongan akhir yang tergenang oleh air yang berada di tambang bawah tanah Kliripan. Hal ini dikarenakan, terowongan ini dijadikan tempat akhir keluarnya air yang dipompa oleh para pekerja. Terowongan I.T.B juga memiliki data kedalaman yang jelas bersinggungan dengan Batuan Gamping dan Mangan yaitu pada kedalaman 40 meter. Kedalaman ini yang digunakan dalam analisis kestabilan *room and pillar* terkhususnya pada metode numerikal. Namun, terdapat beberapa data yang akan dilakukan asumsi dalam penilaiannya seperti kemiringan Mangan yang diasumsikan bahwa persebaran dari cebakan Mangan relatif datar dengan ketebalan mengikuti ukuran dari dimensi *room*.

Dimensi Room and Pillar

Dimensi *room and pillar* pada penelitian kali ini didapatkan dari penggambaran yang ada di peta operasi produksi Mangan yang memperhitungkan ukuran skala pada gambar. Berikut merupakan parameter dimensi *room and pillar* yang dimiliki oleh terowongan I.T.B. pada tambang bawah tanah di Kliripan, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. Penomoran urutan lokasi dimulai dari lokasi dari arah selatan (Tabel 1).

Nantinya dimensi masing-masing *room and pillar* akan dijadikan *input* untuk perhitungan metode analitik menurut Obert & Duvall (1967). Selain itu, dimensi pada masing-masing *room and pillar* pada metode numerik akan digambarkan pada *software* Phase2 sehingga mendapatkan nilai faktor keamanan dan dapat dikategorikan apakah lubang bukaan tersebut aman atau tidak.

Tabel 1. Dimensi *Room and Pillar* pada Terowongan I.T.B.

Lokasi	Kedalaman (m)	Lebar Room (m)	Lebar Pillar (m)	Lebar Room (m)	Lebar Pillar (m)
1.	40	2	2	2	1
		2	2,5	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
2.	40	2	3	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
3.	40	2	3	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
4.	40	2	3	2	1
		1	3	1	1
5.	40	2,5	3	2,5	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
6.	40	1	3	1	1
		2,5	3	2,5	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
7.	40	1	3	1	1
		3	3	3	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
8.	40	2	3	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
9.	40	2	1,5	2	1
		2	1,5	2	1
		2	1,5	2	1
		2	1,5	2	1
		2	3	2	1
10.	40	2	3	2	1
		2	2	2	1
		2	2	2	1

11.	40	2	3,5	2	1
		2	3,5	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
12.	40	2	3	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
		2	3	2	1
13.	40	2	3	2	1
		2	3	2	1

Analisis Faktor Keamanan Metode Analitik

Analisis faktor keamanan dengan menggunakan metode analitik dilakukan sesuai dengan persamaan (1, 2, dan 3). Untuk dapat melakukan perhitungan sesuai dengan persamaan tersebut, diperlukannya data pengujian *Uniaxial Compressive Strength*. Pengujian untuk menentukan nilai *Uniaxial Compressive Strength* dilakukan di Laboratorium Mekanika Batuan Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta. *Uniaxial Compressive Strength* merupakan batas tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh sebuah sampel batuan sebelum akhirnya akan mengalami keruntuhan (*failure*). Pengujian ini mengacu pada standar ISRM (*International Society Rock Mechanics*) dengan ketentuan untuk ukuran benda uji sesuai dengan perbandingan diameter dan ketinggian yaitu 1:2-2,5 dengan penggunaan mata bor kali ini adalah mata bor jenis NX dengan diameternya yaitu 54 mm. Dengan demikian, ketinggian minimum yang harus dimiliki oleh benda uji berkisar pada 108 sampai 135 mm [11]. Berikut merupakan hasil perhitungan dengan menggunakan metode analitik (Tabel 2).

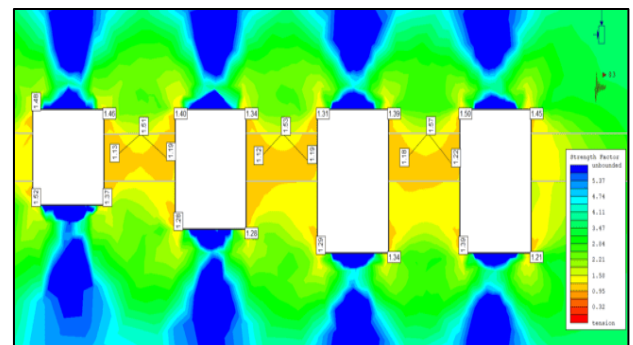
Tabel 2. Hasil Perhitungan Faktor Keamanan dengan Menggunakan Metode Analitik

Lokasi	Kekuatan Pillar (mPa)	Tegangan Pillar (mPa)	Faktor Keamanan
1.	2,7892	2,0160	1,3835
	3,0426	1,8816	1,6170
	2,7892	2,0160	1,3835
	2,7892	2,0160	1,3835
2.	2,7892		1,3835
	2,7892		1,3835
	2,7892	2,0160	1,3835
	2,7892		1,3835
3.	2,7892		1,3835
	2,7892		1,3835
	2,7892		1,3835
	2,7892	2,0160	1,3835
	2,7892		1,3835
4.	2,7892	2,0160	1,3835
	2,7892	2,6880	1,0376
	2,7892	1,8816	1,4823

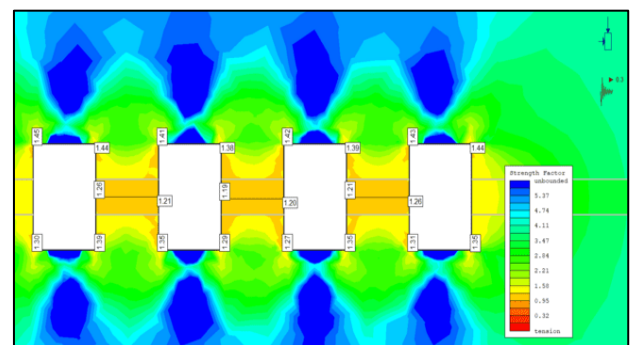
5.	2,7892	2,0160	1,3835
	2,7892		1,3835
	2,7892		1,0376
6.	2,7892	1,8816	1,5084
	2,7892		1,3835
	2,7892		1,3835
7.	2,7892	2,0160	1,0376
	2,7892		1,5564
	2,7892		1,3835
8.	2,7892	1,7920	1,3835
	2,7892		1,3835
	2,7892		1,3835
9.	2,7892	2,0160	1,3835
	2,7892		1,3835
	2,7892		1,3835
10.	2,7892	1,7280	1,6141
	2,7892		1,3835
	2,7892		1,3835
11.	2,7892	2,0160	1,3835
	2,7892		1,3835
	2,7892		1,3835
12.	2,7892	1,8816	1,6170
	2,7892		1,6170
	2,7892		1,3835
13.	2,7892	1,3835	1,3835
	2,7892		1,3835
	2,7892		1,3835

Tabel 3. Input Data Define Materials pada Phase2

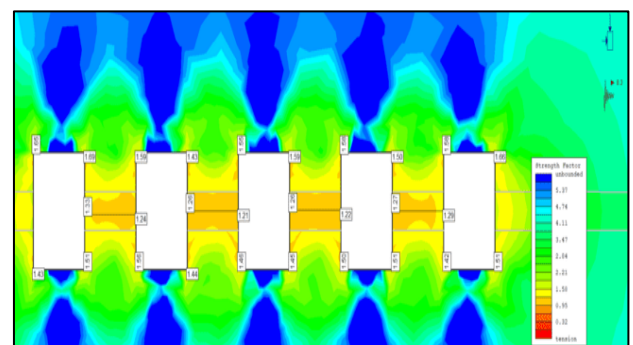
Properties	Country Rock	Ore
Kuat Tekan (mPa)	2,06	2,2825
Unit Weight (MN/m ³)	0,0219	0,024
Cohesion (mPa)	1,46	2,22
Friction Angle (°)	16,65	18,17
Tensile Strength (mPa)	0,97	1,75
Young's Modulus (mPa)	1287	1902
Poisson's Ratio	0,20	0,25



Gambar 3. Nilai Faktor Keamanan pada Lokasi 1



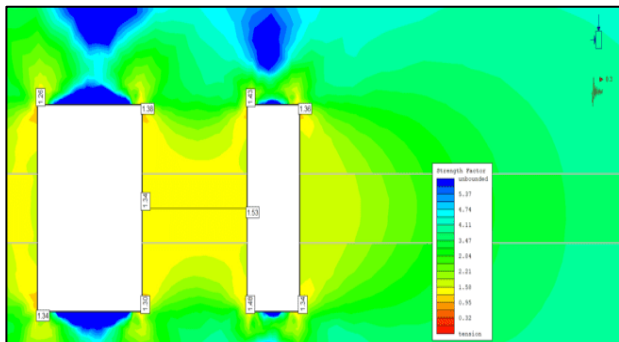
Gambar 4. Nilai Faktor Keamanan pada Lokasi 2



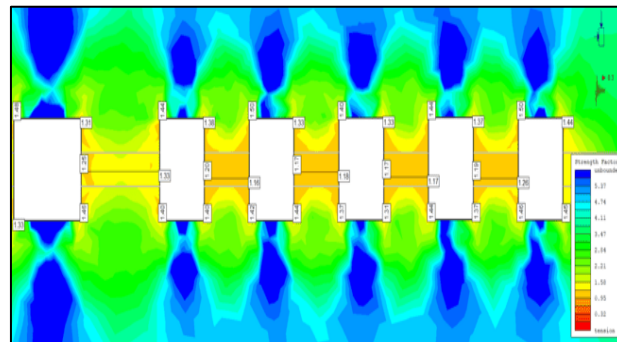
Gambar 5. Nilai Faktor Keamanan pada Lokasi 3

Analisis Strength Factor Metode Numerik

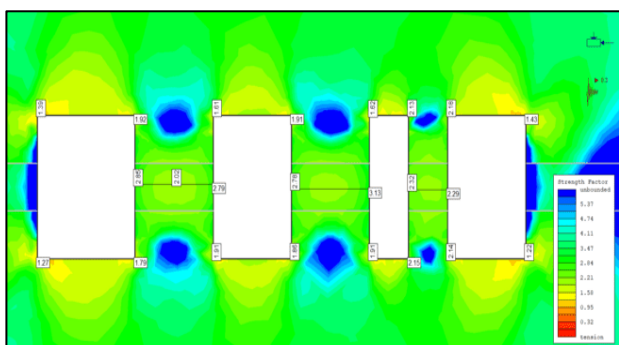
Analisis *strength factor* atau faktor keamanan dengan menggunakan metode numerik dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* Phase2 (Gambar 3 sampai Gambar 15). Jenis material yang dimasukkan ke dalam *software* adalah batu gamping sebagai *country rock* dan batu mangan sebagai *ore* yang diekstraksi selama proses penambangan. Kriteria keruntuhan yang digunakan adalah Mohr-Coulomb dengan beberapa parameter *input* yang diperlukan untuk menganalisis kestabilan *room and pillar* sebagai berikut (Tabel 3).



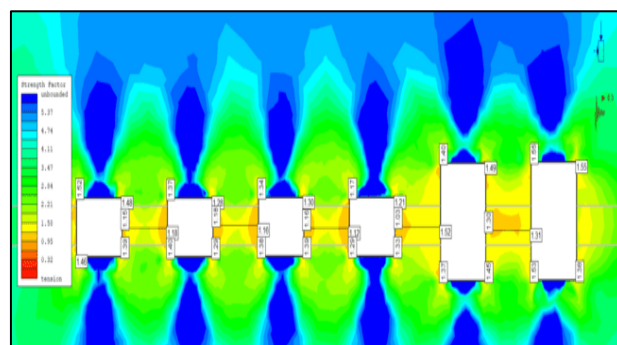
Gambar 6. Nilai Faktor Keamanan pada Lokasi 4



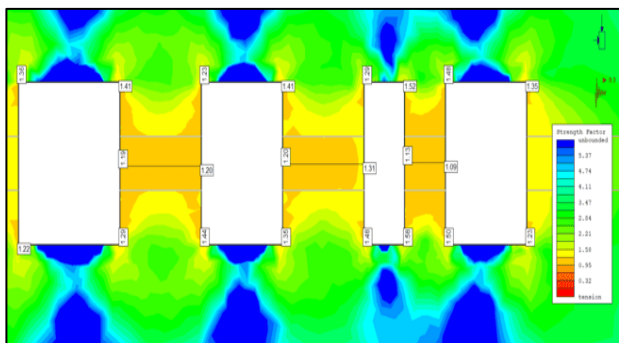
Gambar 10. Nilai Faktor Keamanan pada Lokasi 8



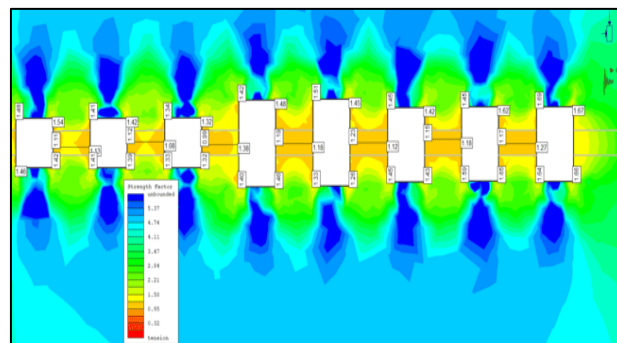
Gambar 7. Nilai Faktor Keamanan pada Lokasi 5



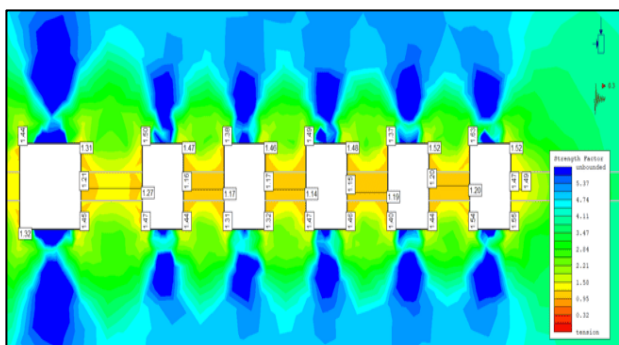
Gambar 11. Nilai Faktor Keamanan pada Lokasi 9



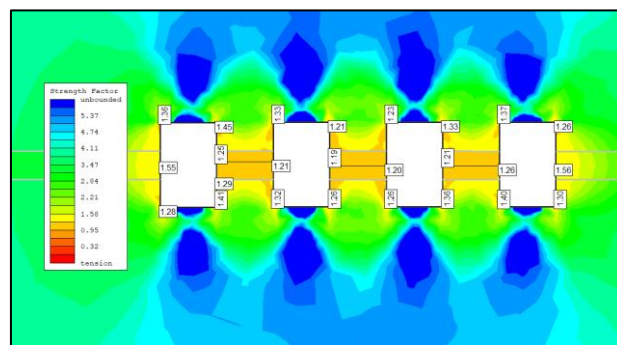
Gambar 8. Nilai Faktor Keamanan pada Lokasi 6



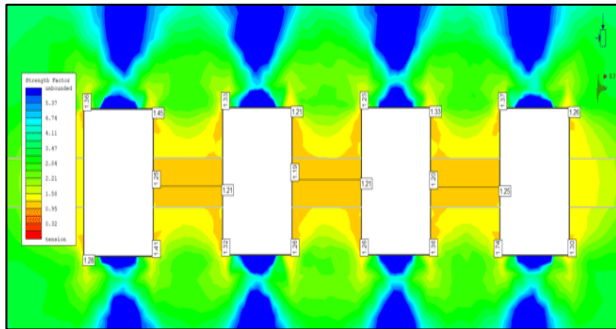
Gambar 12. Nilai Faktor Keamanan pada Lokasi 10



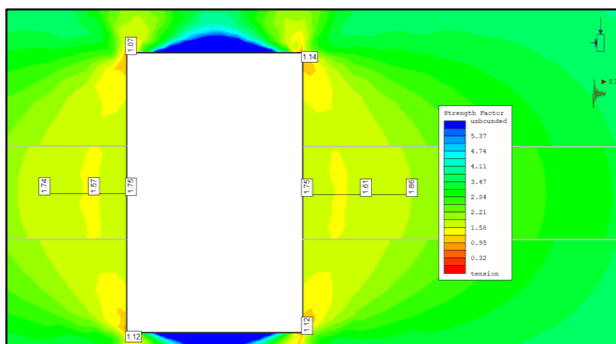
Gambar 9. Nilai Faktor Keamanan pada Lokasi 7



Gambar 13. Nilai Faktor Keamanan pada Lokasi 11



Gambar 14. Nilai Faktor Keamanan pada Lokasi 12



Gambar 15. Nilai Faktor Keamanan pada Lokasi 13

Nilai faktor keamanan yang diperoleh dari hasil *software* Phase2 adalah sebagai berikut (Tabel 4).

Tabel 4. Nilai Faktor Keamanan Hasil *Software* Phase2

Lokasi	Strength Factor
1.	1,37
	1,28
	1,29
	1,21
	1,26
2.	1,19
	1,20
	1,26
	1,33
	1,24
3.	1,21
	1,22
	1,29
	1,26
	1,34
4.	1,21
	1,61
	1,62
	1,22
	1,19
5.	1,20
	1,13
	1,09
	1,21
	1,21

7.	1,16
	1,17
	1,14
	1,19
	1,20
8.	1,25
	1,20
	1,16
	1,17
	1,17
9.	1,26
	1,15
	1,18
	1,16
	1,03
10.	1,30
	1,31
	1,11
	1,12
	0,99
11.	1,19
	1,18
	1,12
	1,17
	1,27
12.	1,25
	1,19
	1,20
	1,25
	1,25
13.	1,07
	1,20
	1,26
	1,25
	1,19

Hasil *Strength Factor* Berdasarkan Metode Numerik dan Metode Analitik

Mengacu pada Keputusan Menteri ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik, nilai ambang batas dari faktor keamanan pada tambang bawah tanah untuk *non fixed facility* minimal adalah 1,5. Perhitungan faktor keamanan dengan menggunakan metode analitik dan metode numerik dapat dipergunakan sebagai pertimbangan dikarenakan pada beberapa lokasi terdapat perbedaan hasil dari faktor keamanan. Dengan metode numerik terdapat nilai faktor keamanan yang sudah >1,5 yaitu *pillar* 2 dan 3 pada lokasi 5. Jika dianalisis menggunakan metode analitik, lokasi yang memiliki faktor keamanan >1,5 yaitu 1 *pillar* pada lokasi 1, 6, 7, 8, serta 2 *pillar* pada lokasi 10. Apabila terdapat lokasi yang memiliki nilai faktor keamanan <1,5 dapat dilakukan penambahan penyanggaan pada beberapa titik yang tidak aman. Kemudian, setelah dipasang penyangga dapat dilakukan analisis kestabilan *room and pillar* kembali untuk memastikan lokasi tersebut aman.

KESIMPULAN

Berdasarkan data yang sudah diolah dan dilakukan analisis lebih lanjut untuk mengetahui kestabilan pada *room and pillar* terkhususnya pada terowongan I.T.B. tambang mangan bawah tanah di Kliripan, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta dapat disimpulkan bahwa setelah dilakukan penutupan tambang mangan bawah tanah tersebut terdapat perbedaan nilai faktor keamanan. Sebelum ditutupnya tambang mangan bawah tanah, faktor keamanan yang dimiliki *room and pillar* tergolong aman dan dapat dibuktikan pada laporan terjadinya kecelakaan pada tambang tersebut. Namun, setelah dilakukannya penutupan tambang mangan bawah tanah tersebut yang disebabkan oleh adanya genangan air memunculkan perbedaan faktor keamanan. Adanya genangan air tersebut berkemungkinan mengakibatkan menurunnya kekuatan batuan yang ada di tambang mangan bawah tanah. Faktor keamanan untuk dikategorikan aman seharusnya bernilai $>1,5$ tetapi pada lokasi tambang mangan bawah tanah ini hanya terdapat 1 *pillar* pada lokasi 1, 6, 7, 8, serta 2 *pillar* pada lokasi 10 yang memiliki nilai $>1,5$ berdasarkan perhitungan metode analitik. Sedangkan, dengan menggunakan analisis metode numerik didapatkan bahwa lokasi yang memiliki nilai faktor keamanan $>1,5$ hanya 2 *pillar* dari 1 lokasi. Hal ini tidak dapat dikategorikan seluruh *room and pillar* pada terowongan I.T.B. termasuk dalam kategori aman. Sehingga, apabila nantinya tambang mangan bawah tanah ini akan dibuka kembali perlu ditambahkannya penyangga dan dilakukannya evaluasi geoteknik secara berkala.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Geopark Jogja (2025). (<https://geoparkjogja.jogjaprovo.go.id/site/mangan-kliripan-karangsari>) diakses November 2025.
- [2] Melati, S. (2016). Induced Stress Determination and The Risk Assessment of Roof Collapse in Room and Pillar Underground Coal Mining Method. *Seminar Nasional Riset Terapan*, 1, D27-D37.
- [3] Santo Frans, J., & Nurfalaq, M. H. (2019). Studi geoteknik pengaruh muka air tanah terhadap kestabilan lereng tambang batubara. *Prosiding Temu Profesi Tahunan PERHAPI*, 1(1), 475-488.
- [4] Li, Y., Liu, L., Zhang, J., Liu, C., Zhang, M., & Wang, X. (2021). Stability analysis of underground pillar supporting system under different disturbed stresses. *Geofluids*, 2021(1), 6634673.
- [5] Kim, J. G., Abdellah, W. R., & Yang, H. S. (2019). Parametric stability analysis of pillar performance at Nohyun limestone mine, South Korea—a case study. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(12), 390.
- [6] Purwanto, P. 2020. Peningkatan Kestabilan Pilar Tambang Bawah Tanah Marmer di PT Gunung Marmer Raya. *JURNAL TEPAT: Teknologi Terapan untuk Pengabdian Masyarakat*, 3(1), 27-38.
- [7] Kurnia, L. H. (2021). Analisis Kestabilan Terowongan Menggunakan Metode Convergen-Confinement (CCM) Berdasarkan Data Hasil Pemantauan. *Jurnal Sains dan Teknologi: Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Teknologi Industri*, 21(1), 72-81.
- [8] Putri, R. H. K. (2020). Penentuan Lebar Chain Pillar Pada Tambang Batubara Shortwall Mining. *Indonesian Mining Professionals Journal*, 2(1), 37-42.
- [9] Putri, R. H. K., Pradani, D., Tobing, R., Suhardianto, S., & Nuzuli, M. (2019). Kajian Geoteknik Tambang Bawah Tanah Batubara Metode Longwall. *Prosiding Seminar Teknologi Kebumihan dan Kelautan (SEMATAN)*, 1(1), 15-21.
- [10] Karim, R., Sulistianto, B., Simangunsong, G. M., & Lopulalan, A. (2012). Analisis Kestabilan Lubang Buka Stope Menggunakan Metode Empirik Dan Pemodelan Numerik Pada Penambangan Emas Bawah Tanah Di Kencana Dengan Metode Long Hole Stope. *TPT-XXI PERHAPI Proceeding*, 134-144.
- [11] ISRM. (2007). Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials (1979). In R. Ulusay & J. A. Hudson (Eds.), *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006* (143–156). ISRM Turkish National Group.