

Hubungan Kondisi Geologi Terhadap Kondisi Massa Batuan dan Kestabilan pada Lubang Bukaannya Tambang Bawah Tanah Kencana Menggunakan *Rock Mass Rating* dan Metode Elemen Hingga

Yunita Terania Sitepu¹⁾, Daniel Radityo^{*1)}, Richky Adhia Utama²⁾

¹⁾Program Studi Sarjana Teknik Geologi, Teknologi Mineral, UPN "Veteran" Yogyakarta
Jl. SWK (104) Lingkar Utara, Condongcatur, Depok Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, 55283

²⁾PT Nusa Halmahera Minerals, Kec. Malifut, Kab. Halmahera Utara, Provinsi Maluku Utara

*daniel.radityo@upnyk.ac.id

Abstrak – Kondisi geologi pada tambang bawah tanah Kencana, sebuah endapan emas epitermal sulfidasi rendah dengan kontrol struktur yang intensif, sangat menentukan karakteristik massa batuan dan kestabilan lubang bukaannya. Litologi pada lokasi penelitian terdiri dari lava andesit dan urat kuarsa yang dikontrol oleh sesar berarah utara-selatan hingga barat-laut-tenggara, dengan intensitas alterasi yang bervariasi antar lubang bukaan. Penelitian ini mengevaluasi hubungan antara kondisi geologi tersebut terhadap kualitas massa batuan dan kestabilan pada empat lubang bukaan (08H, 09E, 14D, dan 00B) menggunakan sistem *Rock Mass Rating* (RMR) dan metode elemen hingga. Lubang bukaan 08H dan 14D, yang tersusun atas lava andesit dengan alterasi propilitik (klorit dan epidot), menunjukkan kekuatan batuan yang relatif terjaga sehingga tergolong massa batuan sedang. Sebaliknya, 09E dan 00B mengalami alterasi argilik yang intensif akibat interaksi fluida hidrotermal asam, mengubah mineral primer menjadi mineral lempung lunak dan reaktif terhadap air, sehingga tergolong massa batuan buruk dengan waktu runtuh tercepat dan beban atap terbesar. Hasil pemodelan elemen hingga memperkuat temuan ini, dengan nilai faktor keamanan lokal tanpa penyangga berkisar 1,08–1,54 pada keempat lubang bukaan. Penelitian ini menegaskan bahwa tipe alterasi dan keberadaan struktur geologi merupakan faktor utama yang mengontrol kualitas massa batuan dan kebutuhan sistem penyangga pada tambang bawah tanah Kencana.

Kata Kunci: elemen hingga, faktor keamanan, kestabilan lubang bukaan, RMR

Abstract – Geological conditions at the Kencana underground mine, a low-sulfidation epithermal gold deposit with intensive structural control, strongly govern the rock mass characteristics and opening stability. The lithology at the study site consists of andesite lava and quartz veins controlled by north-south to northwest-southeast trending faults, with alteration intensity varying across openings. This study evaluates the relationship between these geological conditions and rock mass quality and stability at four openings (08H, 09E, 14D, and 00B) using the Rock Mass Rating (RMR) system and finite element method. Openings 08H and 14D, composed of andesite lava with propylitic alteration (chlorite and epidote), exhibit relatively preserved rock strength and are classified as fair rock. In contrast, 09E and 00B experienced intensive argillic alteration caused by acidic hydrothermal fluid interaction, converting primary minerals into soft, water-reactive clay minerals, resulting in poor rock classification with the shortest stand-up time and largest roof load. Finite element modeling results reinforce these findings, with local strength factor values without support ranging from 1.08–1.54 across the four openings. This study confirms that alteration type and the presence of geological structures are the primary factors controlling rock mass quality and support requirements at the Kencana underground mine.

Keywords: finite element, RMR, stability, underground opening

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Salah satu aspek dalam penambangan bawah tanah (*underground mining*) adalah menjaga kestabilan dan keamanan dari lubang bukaan dari reruntuhan batuan (Putra dkk., 2024). Untuk meningkatkan kestabilan lubang bukaan penambangan, diperlukan sistem penyanggaan yang tepat dan optimal (Hatini, 2021). Kestabilan lubang bukaan dapat ditentukan berdasarkan metode empiris berupa pengelompokan sifat massa batuan yang kemudian akan memberikan rekomendasi penyangga, sedangkan pendekatan numerik diperlukan untuk memverifikasi kestabilan lubang bukaan (Tibri dan Salman, 2019). Tambang bawah tanah Kencana merupakan daerah penambangan emas dengan tipe epitermal sulfidasi rendah dengan kontrol struktur geologi sebagai jalur utama pergerakan fluida hidrotermal (Dulfi dkk., 2023). Berdasarkan

kondisi tersebut, perlu dilakukan kajian geoteknik yang komprehensif terhadap *oredrift* tambang bawah tanah Kencana terutama kondisi massa batuan sebagai acuan dalam penentuan penyangga lubang bukaan yang akan dipasang.

Permasalahan

Penelitian ini membutuhkan data kondisi geologi pada daerah penelitian melalui pemetaan muka lubang bukaan, data batuan inti hasil pemboran yang melewati lubang bukaan, serta data laboratorium berupa sifat fisik dan mekanik dari material yang tercakup pada lubang bukaan. Keberadaan alterasi dan struktur geologi tertentu akan merubah kondisi massa batuan yang juga akan berhubungan dengan tingkat kestabilannya.

Tujuan

Penelitian ini dilakukan untuk mencapai beberapa tujuan, seperti:

1. Mengidentifikasi kondisi geologi pada lokasi penelitian yang terdiri dari litologi dan struktur geologi
2. Menentukan klasifikasi massa batuan pada lokasi penelitian menggunakan sistem RMR
3. Mengidentifikasi waktu runtuh dan dimensi runtuh lubang bukaan pada lokasi penelitian
4. Mengidentifikasi kestabilan berdasarkan nilai faktor keamanan lokal dan total perpindahan pada lokasi penelitian

Ruang Lingkup

Penelitian ini dilakukan dengan ruang lingkup berupa penggunaan metode *Rock Mass Rating* (RMR) sebagai dasar dalam penentuan karakteristik keruntuhan berupa waktu dan dimensi runtuh, sedangkan metode elemen hingga digunakan untuk menentukan nilai faktor keamanan lokal dan total perpindahan pada lubang bukaan tambang bawah tanah Kencana. Pengamatan dilakukan pada empat lubang bukaan, yaitu 08H, 09E, 14D, dan 00B.

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada tambang bawah tanah Kencana, PT Nusa Halmahera Minerals, yang secara administratif terletak di daerah Balisosang, Kec. Malifut, Kab. Halmahera Utara, Provinsi Maluku Utara. Secara geografis lokasi penelitian berada pada 127° 42' 13.1" BT dan 1° 08' 44.2" LU. Fokus pengamatan dan pengambilan data dilakukan secara spesifik pada empat lubang bukaan produksi atau *oredrift* yaitu 08H, 09E, 14D, dan 00B.

METODE

Rock Mass Rating

Rock Mass Rating (RMR) atau juga dikenal dengan *Geomechanics Classification* merupakan sistem pembobotan massa batuan dengan menggunakan parameter-parameter untuk mengklasifikasikan kualitas massa batuan (Tabel 1) (Aksoy, 2008). Parameter yang digunakan dalam pembobotan massa batuan adalah:

- Uji kuat tekan
- RQD
- Spasi diskontinuitas
- Kondisi bidang diskontinuitas
- Kondisi air tanah
- Orientasi bidang diskontinuitas

Tabel 1. Parameter Desain dan Sifat Rekayasa berdasarkan Bobot Massa Batuan
(Bieniawski, 1993; dalam Singh dan Goel, 2011)

Parameter	RMR				
	100 – 81 (I)	80 – 61 (II)	60 – 41 (III)	40 – 21 (IV)	<20 (V)
Klasifikasi massa batuan	Sangat baik	Baik	Sedang	Buruk	Sangat buruk
Waktu keruntuhan rata-rata	20 tahun untuk lebar 15 m	1 tahun untuk lebar 10 m	1 minggu untuk lebar 5 m	10 jam untuk bentang 2,5 m	30 menit untuk bentang 1 m
Kohesi (MPa)	>0.4	0.3 – 0.4	0.2 – 0.3	0.1 – 0.2	<0.1

Parameter	RMR				
	100 – 81 (I)	80 – 61 (II)	60 – 41 (III)	40 – 21 (IV)	<20 (V)
Sudut geser dalam massa batuan	>45°	35 – 45°	25 – 35°	15 – 25°	15°
Tekanan pondasi yang diizinkan (T/m ²)	600 – 400	440 – 280	280 – 135	135 – 45	45 – 30
Kemiringan lereng aman (°)	>70	65	55	45	<40

Karakteristik Keruntuhan

Karakteristik dari keruntuhan mencakup waktu dan dimensi keruntuhan dari lubang bukaan. Waktu runtuh merupakan lama waktunya batuan dapat bertahan tanpa dukungan penyangga setelah penggalian (Bieniawski, 1984). Nilai waktu runtuh dapat diketahui dengan memasukkan bobot total RMR ke dalam grafik hubungan nilai RMR terhadap waktu runtuh oleh Bieniawski (1984).

Dimensi runtuh merujuk kepada perhitungan mengenai tinggi runtuh, beban runtuh dan beban atap (Radityo dkk., 2022). Tinggi runtuh merupakan tinggi zona batuan yang menjadi longgar di atas atap lubang bukaan dan dapat membebani sistem penyangga (Terzaghi, 1946 dalam Dehkordi dkk., 2011) Beban runtuh batuan merupakan berat massa batuan yang runtuh atau pecah akibat penggalian terowongan (Hoek, 2001), sedangkan beban total adalah beban yang harus disangga per kemajuan lubang bukaan. Perhitungan dimensi keruntuhan dapat diperhitungkan melalui persamaan berikut:

$$H_t = \left(\frac{100 - RMR}{100} \right) \times B \quad (5)$$

$$P = \left(\frac{100 - RMR}{100} \right) \times \gamma \times B \quad (6)$$

$$W_t = P \times c \times B \quad (7)$$

Keterangan:

H_t : Tinggi runtuh (m)

P : Beban runtuh (ton/m²)

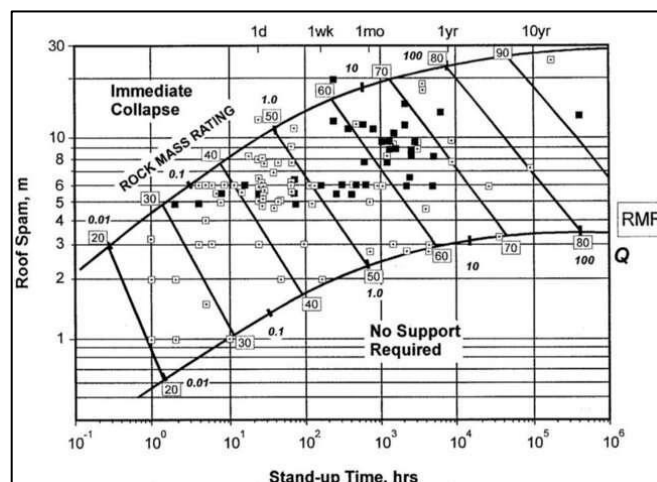
W_t : Beban atap (ton)

RMR : Nilai pembobotan massa batuan RMR

B : Lebar bukaan (m)

γ : Massa jenis batuan (ton/m³)

c : Kemajuan lubang bukaan (m)



Gambar 1. Grafik waktu runtuh dan Nilai RMR dengan lebar bukaan (Bieniawski, 1989; dalam Barton, 2006)

Metode Elemen Hingga

Konsep utama yang dipakai dalam metode elemen hingga adalah membagi suatu domain menjadi bagian-bagian kecil yang disebut sebagai elemen (Naylor dan Pande, 1981). Beberapa nilai yang dianalisis secara numerik dengan menggunakan metode elemen hingga pada penelitian ini adalah:

a. Nilai Faktor Keamanan Lokal

Nilai faktor keamanan lokal atau strength factor merupakan rasio perbandingan kekuatan batuan yang didasarkan pada kriteria keruntuhan dengan tegangan yang terjadi pada batuan (Eveny dkk., 2019). Apabila nilai faktor keamanan (FK) lokal kurang dari 1, hal ini menunjukkan bahwa tegangan yang bekerja melebihi kekuatan material tersebut (Eveny dkk., 2019).

b. Deformasi Total

Nilai deformasi total (total displacement) merupakan nilai yang didapatkan dari hasil penjumlahan vektor pergerakan atau perpindahan massa batuan pada arah yang searah (horizontal) dan tegak lurus (vertikal) terhadap penggalan (Putra, 2022).

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Litologi Daerah Penelitian

Berdasarkan hasil pemetaan muka lubang bukaan lokasi penelitian terdiri dari beberapa litologi, yaitu:

1. Lava andesit, termasuk ke dalam Formasi Gosowong Anggota Andesitik. Batuan ini secara megaskopis memiliki warna abu-abu dengan ukuran kristal mineral 1 – 3 milimeter yang tertanam pada massa gelas dengan tekstur porfiritik. Lava andesit pada lokasi penelitian tersusun atas klorit, epidot, dan plagioklas yang sebagian telah berubah menjadi mineral lempung pada beberapa lubang bukaan. Pada zona sesar, batuan ini teralterasi lebih intensif sehingga berubah menjadi material lempungan yang berasosiasi dengan *fault gouge*.
2. *Quartz Vein*, umumnya dijumpai berwarna putih hingga keabu-abuan dengan tekstur masif hingga *quartz crystalline breccia*. Tekstur masif dicirikan dengan kenampakan mineral kuarsa yang tumbuh dengan seragam tanpa adanya fragmen batuan didalamnya, sedangkan tekstur *quartz crystalline breccia* umumnya tersusun oleh fragmen batuan samping yang didominasi lava andesit yang terperangkap dan dilingkupi oleh mineral kuarsa. Keberadaan urat kuarsa tersebut mengindikasikan adanya struktur geologi berupa sesar utama yang berkembang pada daerah penelitian.

Struktur Geologi Daerah Penelitian

Sesar yang terbentuk pada lokasi penelitian secara umum memiliki arah utama dominan utara-selatan hingga baratlaut-tenggara. Selain itu, beberapa sesar juga memiliki arah relatif timurlaut-baratdaya yang saling berpotongan dengan sesar utama dengan pola struktur yang semakin kompleks di bagian tengah dari lokasi tambang bawah tanah Kencana. Indikator keberadaan sesar pada daerah ini yaitu kehadiran urat kuarsa dan *fault gouge*. *Fault gouge* yang dijumpai berupa material halus hasil penggerusan dinding batuan akibat dari pergerakan sesar.

Kekar yang berkembang pada daerah penelitian hadir dalam bentuk kekar berpasangan. Kekar berpasangan tersebut terdiri dalam beberapa set orientasi, namun didominasi dengan arah baratlaut-tenggara dan baratdaya-timur laut, dengan kemiringan berkisar antara 25° hingga 60°. Kekar yang terbentuk dapat terisi oleh mineral lempung dan mineral kuarsa dalam bentuk urat.

Klasifikasi Massa Batuan *Rock Mass Rating*

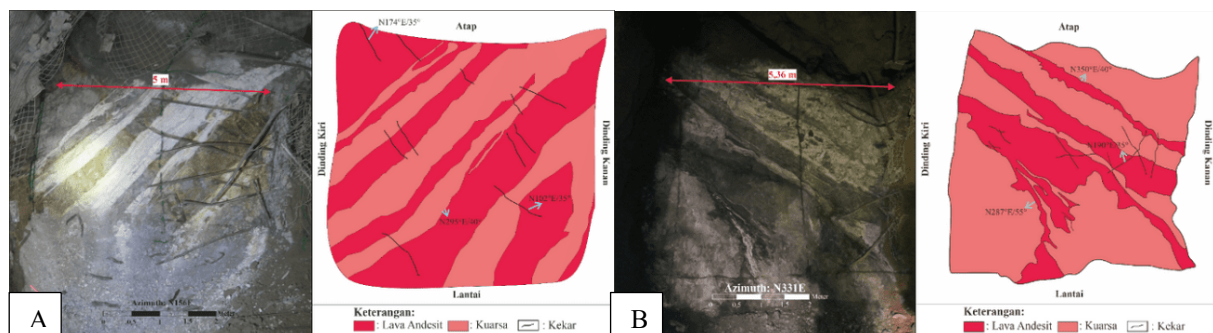
Hasil pengamatan dilapangan dan data hasil pengujian laboratorium kemudian dikombinasikan untuk mendapatkan nilai dan sifat dari parameter-parameter yang digunakan dalam melakukan perhitungan dan penentuan klasifikasi massa batuan dengan menggunakan sistem *Rock Mass Rating* (RMR). Secara umum, lokasi penelitian didominasi oleh dua kategori utama, yaitu batuan sedang (kelas III) dan batuan buruk (kelas IV) (Tabel 2). Lubang bukaan 08H dan 14D menunjukkan kondisi massa batuan yang konsisten diklasifikasikan sebagai batuan sedang. Kedua lubang bukaan ini tersusun atas urat kuarsa dan lava andesit dengan alterasi propilitik. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan mineral primer menjadi mineral sekunder seperti klorit dan epidot tidak menurunkan kekuatan batuan secara signifikan, yang dikarenakan sifat dari mineral ini yang memiliki kekerasan tinggi dan tidak reaktif terhadap air. Selain itu, struktur geologi yang berkembang didominasi oleh isian mineral kuarsa sehingga tidak mempengaruhi kualitas massa batuan secara signifikan.

Tabel 2. Nilai dan Klasifikasi RMR dari masing-masing lubang bukaan

RMR	08H	09E	14D	00B
RMR min.	42 (Sedang)	30 (Buruk)	42 (Sedang)	35 (Buruk)
RMR maks.	47 (Sedang)	35 (Buruk)	45 (Sedang)	42 (Sedang)
RMR rata-rata	44,28 (Sedang)	33 (Buruk)	44 (Sedang)	39,44 (Buruk)

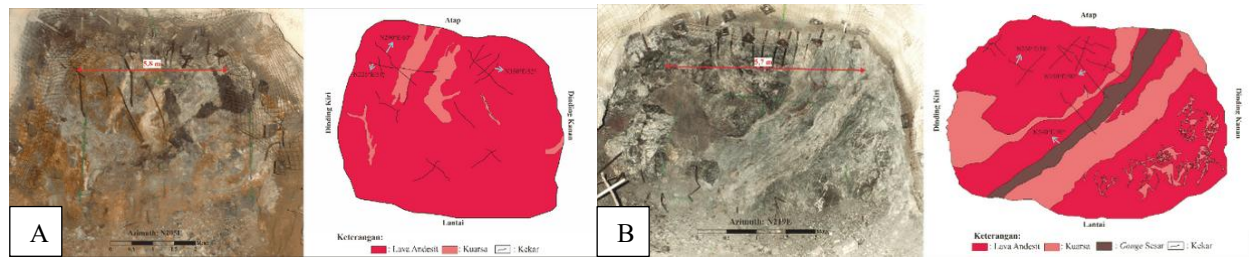
Berdasarkan hasil nilai pembobotan dari masing-masing lubang bukaan, nilai RMR rata-rata tertinggi didapatkan pada lubang bukaan 08H, dengan nilai 44,28. Hal ini disebabkan oleh kekuatan batuan yang cukup tinggi, material pengisi diskontinuitas yang bersifat keras, kondisi kering, dan kemiringan dari diskontinuitas tidak lebih besar dari 45°. Nilai RMR rata-rata terkecil berada pada lubang bukaan 09E, dengan nilai 33. Faktor yang menyebabkan lokasi ini memiliki nilai RMR paling kecil dibandingkan dengan lubang bukaan lainnya adalah karakteristik batuan yang sangat lunak, yaitu lebih kecil daripada 1 MPa atau R0. Batuan pada lubang bukaan ini telah mengalami alterasi argilik yang cukup intensif sehingga menyebabkan mineral penyisin batuan berubah menjadi mineral lempung yang lunak, sehingga batuan memiliki nilai kuat tekan yang rendah.

Secara umum, lokasi penelitian didominasi oleh dua kategori utama, yaitu batuan sedang (kelas III) dan batuan buruk (kelas IV). Lubang bukaan 08H dan 14D menunjukkan kondisi massa batuan yang konsisten diklasifikasikan sebagai batuan sedang. Kedua lubang bukaan ini tersusun atas urat kuarsa dan lava andesit dengan alterasi propilitik. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan mineral primer menjadi mineral sekunder seperti klorit dan epidot tidak menurunkan kekuatan batuan secara signifikan, yang dikarenakan sifat dari mineral ini yang memiliki kekerasan tinggi dan tidak reaktif terhadap air. Selain itu, struktur geologi yang berkembang didominasi oleh isian mineral kuarsa sehingga tidak mempengaruhi kualitas massa batuan secara signifikan.



Gambar 2. Kondisi lubang bukaan 08H (A) dan 14D (B)

Lubang bukaan 09E menunjukkan kondisi massa batuan yang buruk pada seluruh nilai minimum, maksimum, ataupun rata-rata. Berbeda dengan lubang bukaan lainnya, 00B menunjukkan variasi kondisi massa batuan yang berada pada rentang kategori massa batuan sedang (*Fair Rock*) hingga massa batuan buruk (*Poor Rock*). Namun berdasarkan nilai RMR rata-rata, sebagian besar massa batuan pada lubang bukaan ini termasuk ke dalam kelas massa batuan buruk (*Poor Rock*). Kedua lubang bukaan ini tersusun oleh litologi yang sama yaitu urat kuarsa dan lava andesit dengan alterasi argilik. Keberadaan mineral lempung sebagai hasil dari perubahan mineral akibat interaksi fluida hidrotermal yang bersifat asam secara signifikan memperburuk kualitas massa batuan karena memiliki kekerasan yang sangat rendah dan reaktif terhadap air. Keberadaan gouge sesar sebagai produk dari pergerakan sesar juga menyebabkan penurunan kekuatan geser akibat material yang memiliki butiran halus.



Gambar 3. Kondisi lubang bukaan 09E (A) dan 00B (B)

Karakteristik Keruntuhan

Waktu keruntuhan rata-rata terlama ditemukan pada lubang bukaan 14D dan 08H karena nilai RMR yang tinggi, kontrol *over-break* yang minimal (lebar 5 m), serta pengaruh litologi urat kuarsa dan alterasi propilitik yang menjaga kekuatan batuan (UCS 25–50 MPa). Sebaliknya, lubang bukaan 09E dan 00B memiliki waktu runtuh tercepat akibat nilai RMR rendah dan *over-break* yang meluas hingga 5,4 meter. Hal ini dipicu oleh alterasi argilik yang mengubah mineral primer menjadi mineral lempung lunak ($IRS < 1$ MPa) yang mengisi rekahan, sehingga menurunkan kuat geser dan resistensi massa batuan terhadap getaran peledakan (Tabel 3).

Tabel 3. Waktu keruntuhan dari masing-masing lubang bukaan

Waktu Runtuh	08H	09E	14D	00B
Minimum	20 jam	1,21 jam	20 jam	3,24 jam
Maksimal	70 jam	3,59 jam	50 jam	10,90 jam
Rata-rata	30 jam	1,91 jam	40 jam	10,13 jam

Ketinggian keruntuhan pada lokasi penelitian berkisar antara 2,81–3,62 meter, yang mencerminkan luas zona plastis akibat redistribusi tegangan yang melampaui kekuatan massa batuan (Tabel 4). Lubang bukaan 09E memiliki akumulasi beban terbesar (119,42 ton atau 8,1 ton/m²) dengan tinggi keruntuhan 3,62 meter, dipicu oleh alterasi argilik yang menurunkan batas elastisitas dan kuat geser massa batuan. Sebaliknya, lubang bukaan 14D menunjukkan zona plastis terkecil dengan tinggi keruntuhan 2,81 meter dan beban atap 92,6 ton (7,28 ton/m²). Hal ini disebabkan oleh kondisi litologi lava andesit teralterasi propilitik yang lebih elastis serta keberadaan pengisian kuarsa pada struktur geologi yang efektif mengurangi porositas dan memperkuat massa batuan.

Tabel 4. Dimensi keruntuhan dari masing-masing lubang bukaan

Dimensi Keruntuhan	08H	09E	14D	00B
Tinggi Runtuh (m)	3,13	3,62	2,81	3,43
Beban Runtuh (ton/m ²)	8,10	9,37	7,28	8,89
Beban Atap (ton)	117,61	119,42	92,60	105,66

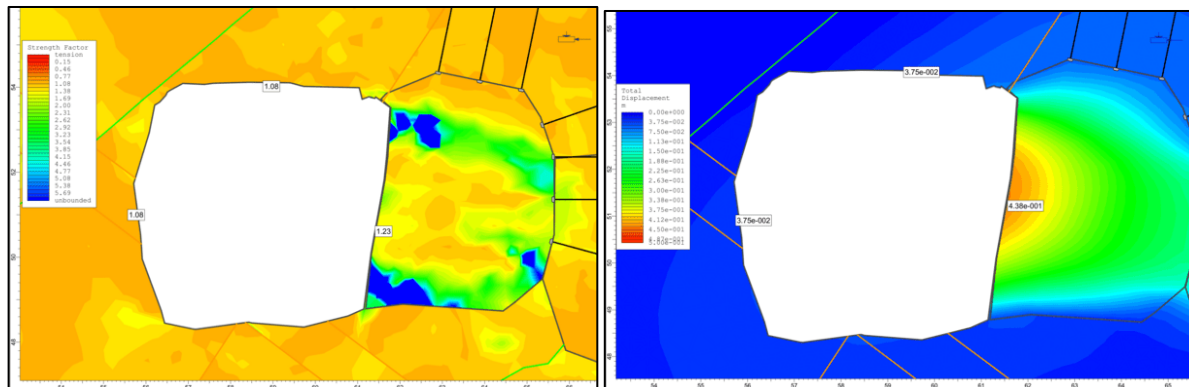
Nilai Faktor Keamanan Lokal dan Deformasi Total

Pada lubang bukaan 08H, nilai faktor keamanan lokal pada kondisi tanpa sistem penyangga sebesar 1,08 – 1,23, yang menunjukkan kondisi massa batuan tergolong belum cukup stabil ($FK_{\text{lokal}} < 1,3$). Hal ini menunjukkan kondisi kestabilan lubang bukaan yang berada pada ambang batas terutama pada bagian dinding kiri dan atap. Bagian dinding kanan memiliki nilai faktor keamanan lokal tertinggi dikarenakan keberadaan empat bekas lubang bukaan di sebelah barat yang telah dilakukan proses backfilling menggunakan pasta (Tabel 5). Nilai total perpindahan pada kondisi ini berada pada rentang 0,0375 – 0,438 m yang merepresentasikan respon massa batuan setelah penggalian dilakukan. Titik deformasi tertinggi terletak pada bagian dinding kanan dari lubang bukaan. Hal tersebut dapat disebabkan oleh respon material pasta yang memiliki karakteristik lebih lunak sehingga tegangan lebih terdistribusi ke arahnya.

Tabel 5. Nilai faktor keamanan dan perpindahan lubang bukaan 08H

08H	Nilai Faktor Keamanan Lokal	Nilai Perpindahan (m)
Dinding Kanan	1.23	0.438

Dinding Kiri	1.08	0.0375
Atap	1.08	0.0375

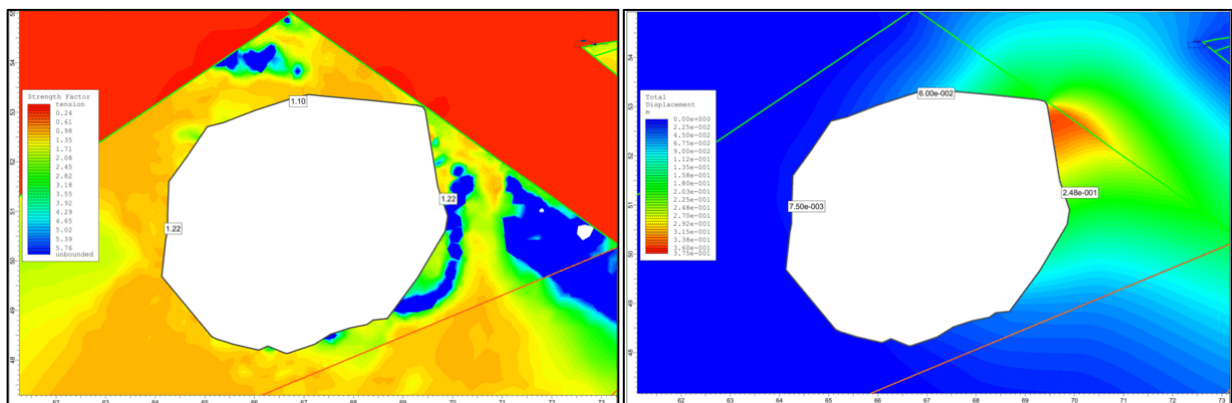


Gambar 4. Model elemen hingga pada lubang bukaan 08H

Lubang bukaan 09E dengan kondisi tanpa penyanggaan menunjukkan kondisi kurang stabil dan aman yang ditunjukkan dengan nilai faktor keamanan lokal berada pada rentang nilai 1,10 – 1,22 (Gambar 5.38). Bagian atap dari lubang bukaan ini merupakan bagian dengan kestabilan terendah dengan nilai faktor keamanan 1,10. Nilai total perpindahan dari lubang bukaan ini berada pada rentang 0,0075 – 0,248 m (Tabel 6). Kedua hal ini menunjukkan kekuatan gaya penahan massa batuan yang masih cukup rendah sehingga masih cukup berpotensi terjadinya keruntuhan.

Tabel 5. Nilai faktor keamanan dan perpindahan lubang bukaan 09E

09E	Nilai Faktor Keamanan Lokal	Nilai Perpindahan (m)
Dinding Kanan	1.22	0.248
Dinding Kiri	1.22	0.0075
Atap	1.10	0.060

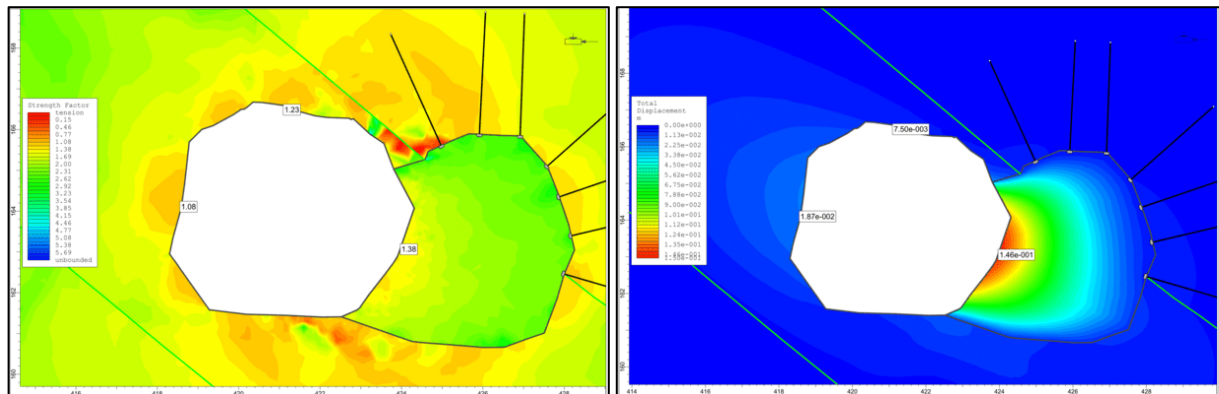


Gambar 5. Model elemen hingga pada lubang bukaan 09E

Pada kondisi lubang bukaan 14D tanpa penyangga, bagian dinding kanan bukaan menunjukkan kondisi yang cukup stabil dengan nilai faktor keamanan lokal sebesar 1,38 (Tabel 7). Hal tersebut disebabkan oleh adanya lubang bukaan bekas yang telah dilakukan backfilling pada bagian timur bukaan sebagai pilar penyangga yang mampu memberikan tekanan balik pada dinding sehingga mencegah terjadinya deformasi berlebih. Namun, pada bagian dinding kiri dan atap lubang bukaan, potensi terjadinya keruntuhan tergolong cukup tinggi, ditunjukkan dengan nilai faktor keamanan lokal sebesar 1,08 – 1,23. Kondisi ini mengindikasikan bahwa gaya penahan yang sama besarnya dengan gaya penggerak massa batuan. Nilai total perpindahan yang dihasilkan berada pada rentang nilai 0,0075 – 0,146 m, dengan nilai tertinggi pada dinding kanan. Hal tersebut dapat terjadi karena massa batuan relatif bergerak masuk ke dalam pasta yang memberikan ruang untuk diberi tekanan.

Tabel 6. Nilai faktor keamanan dan perpindahan lubang bukaan 14D

14D	Nilai Faktor Keamanan Lokal	Nilai Perpindahan (m)
Dinding Kanan	1.38	0.146
Dinding Kiri	1.08	0.0187
Atap	1.23	0.0075

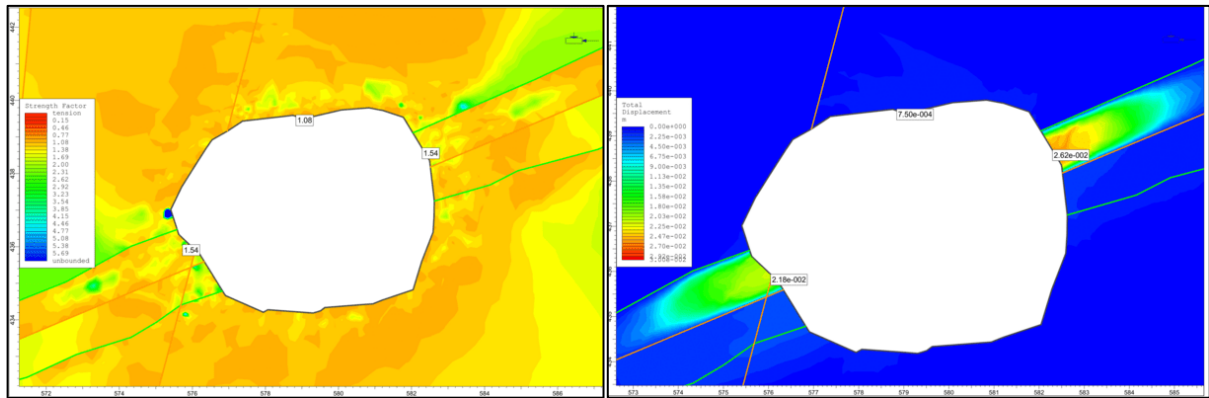


Gambar 6. Model elemen hingga pada lubang bukaan 14D

Kondisi lubang bukaan 00B sebelum dilakukan pemasangan rockbolt menghasilkan nilai faktor keamanan lokal sebesar 1,08 – 1,54 (Tabel 8). Bagian dinding bukaan diinterpretasikan cukup stabil dikarenakan nilai faktor keamanan sebesar 1,54, sedangkan pada bagian atap masih berpotensi mengalami keruntuhan yang ditunjukkan dengan nilai faktor keamanan sebesar 1,08. Hal tersebut menunjukkan bahwa gaya penahan dari massa batuan pada bagian atap relatif sama besarnya dengan gaya penggerak. Nilai total perpindahan dari kondisi ini berada pada rentang nilai 0,00075 – 0,0262 m, dengan nilai terendah pada bagian atap dan tertinggi pada bagian dinding kanan. Fenomena kondisi dimana korelasi nilai faktor keamanan lokal dan total perpindahan yang berbanding lurus ini dapat diinterpretasikan sebagai perilaku squeezing dari lubang bukaan. Hal ini juga didukung oleh massa batuan pada lubang bukaan ini yang teralterasi dengan tipe argilik dan keberadaan *gouge* sesar.

Tabel 7. Nilai faktor keamanan dan perpindahan lubang bukaan 00B

00B	Nilai Faktor Keamanan Lokal	Nilai Perpindahan (m)
Dinding Kanan	1.54	0.0262
Dinding Kiri	1.54	0.0218
Atap	1.08	0.00075



Gambar 7. Model elemen hingga pada lubang bukaan 00B

PENUTUP

Kondisi geologi pada lokasi penelitian terdiri dari litologi lava andesit dan urat kuarsa yang dikontrol oleh struktur sesar berarah utara-selatan hingga baratlaut-tenggara, dengan kekar berpasangan yang didominasi arah baratlaut-tenggara dan baratdaya-timurlaut. Intensitas dan tipe alterasi bervariasi antar lubang bukaan, dengan alterasi propilitik dijumpai pada 08H dan 14D, sedangkan alterasi argilik yang lebih intensif dijumpai pada 09E dan 00B akibat interaksi fluida hidrotermal yang bersifat asam. Klasifikasi massa batuan menggunakan sistem RMR menunjukkan bahwa lubang bukaan 08H dan 14D tergolong massa batuan sedang (kelas III), sedangkan 09E dan 00B tergolong massa batuan buruk (kelas IV).

Perbedaan klasifikasi ini dikontrol terutama oleh tipe alterasi, di mana alterasi argilik menurunkan kekuatan batuan secara signifikan dibandingkan alterasi propilitik. Karakteristik keruntuhan menunjukkan korelasi yang konsisten dengan nilai RMR, di mana lubang bukaan 08H dan 14D memiliki waktu runtuh rata-rata yang lebih lama dibandingkan 09E dan 00B. Dimensi keruntuhan tertinggi dijumpai pada lubang bukaan 09E dengan tinggi runtuh 3,62 m dan beban atap 119,42 ton, sebagai akibat dari rendahnya kuat geser massa batuan yang teralterasi argilik.

Hasil pemodelan elemen hingga pada kondisi tanpa penyangga menunjukkan nilai faktor keamanan lokal pada keempat lubang bukaan berkisar antara 1,08–1,54, yang secara umum mengindikasikan kondisi lubang bukaan belum cukup stabil terutama pada bagian atap dan dinding tanpa dukungan pilar backfilling. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa kondisi geologi, khususnya tipe dan intensitas alterasi serta keberadaan struktur sesar, merupakan faktor pengontrol utama terhadap kualitas massa batuan dan kebutuhan sistem penyangga pada keempat lubang bukaan tambang bawah tanah Kencana.

DAFTAR PUSTAKA

- Aksoy, C. O. (2008). Review Of Rock Mass Rating Classification: Historical Developments, Applications, And Restrictions. *Journal of Mining Science*, 44(1), 51 – 63, DOI: 10.1007/s10913-008-0005-2
- Bieniawski, Z. T. (1984). *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers
- Dehkordi, M. S., Shahriar, K., Maarefvand, P., dan Nik, M. G. (2011). Application of The Strain Energy to Estimate The Rock Load in Non-Squeezing Ground Condition. *Archives of Mining Sciences* 56(3), 551 – 566
- Dulfi, N. A., Irwanda, D., Handayani, T., dan Suwahyadi (2023). Mineralogi Bijih Dan Korelasi Antara Unsur Au Dengan Unsur Ag, Cu, Pb, Dan Zn Pada Sampel Paritan Uji Pit X Pt Nusa Halmahera Minerals, Kabupaten Halmahera Utara, Provinsi Maluku Utara. *Buletin Sumber Daya Geologi* 18(2), 132 – 144
- Eveny, O. N., Ariyanto, Sutoyo, H. D., dan Saptono, S. (2019). Analysis of Tinnel Stability in Very Weak Rock. *Global Journal of Engineering Science and Researches* 6(2), 155 – 163
- Hatini, P. M. (2021). Analisa Kebutuhan Penyangga Pada Tambang Bawah Tanah Pt Antam Tbk UBPE Pongkor. *Indonesia Mining and Energy Journal* 3(2)
- Hoek, E. (2001). *Practical Rock Engineering*. Rocscience Inc
- Naylor, D. J. dan Pande, G. N. (1981). *Finite Elements in Geotechnical Engineering*. Swansea: Pineridge Press Limited

- Putra B. P. (2022). Pergerakan Dinding Terowongan pada Variasi Geometri Terowongan yang tidak disangga dengan Analisa Axisymmetric Skala Laboratorium. *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi XVII Tahun 2022 (ReTII)*, 318 – 322
- Putra, D., Hartami, P. N., Cokro, N. F., Tuheteru, E. J., dan Herdyanti, M. K. (2024). Analisis Geoteknik Metode RMR Dan Q-System Pada Bukaan Area Batching Plant Tambang Bawah Emas. *Jurnal Geosapta* 10(1), 77 – 84
- Radityo, D., Arrisaldi, T., Atmojo, H. T., Ekasara, A. R., dan Saputro, L. E. (2022). Analisis Perhitungan Waktu Runtuh Dan Dimensi Keruntuhan Terowongan Bawah Tanah Berdasarkan Perhitungan Rmr Di Lokasi Cibitung, Kabupaten Pandeglang, Provinsi Banten. *Jurnal Ilmiah MTG* 13(3), 1 – 11
- Singh, B. dan Goel, R. K. (2011). *Engineering Rock Mass Classification*. Oxford: Elsevier
- Tibri, T. dan Salman (2019). Tunnel Stability Analysis Based on Temporary Support Modeling in The Construction of Hasang Hepp in Toba Samosir District North Sumatra Province. *Proceedings of The 2nd International Conference On Advance And Scientific Innovation, ICASI 2019, 18 July, Banda Aceh, Indonesia*. DOI: 10.4108/eai.18-7-2019.2288567