

ANALISIS KESTABILAN TEROWONGAN MENGGUNAKAN KLASIFIKASI MASSA BATUAN SISTEM-Q DAN METODE ELEMEN HINGGA PADA BUKAAN TEROWONGAN TAMBANG KUBANG CICAU 474 KONEK MILIK PT ANTAM UBPE PONGKOR, KABUPATEN BOGOR, JAWA BARAT

TEDI CAHYA NUSANTARA HERDIANTO¹, IMAM ACHMAD SADISUN¹, FIRDAUS EL AFGHANI¹

¹Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung (ITB), Jl. Ganesha No.10, Bandung, Jawa Barat, Indonesia, Email: tedicahyanusantara@students.itb.ac.id.

Sari – Produksi utama emas dan perak PT Antam berasal dari area tambang emas Pongkor, Jawa Barat. Metode penambangan yang digunakan oleh PT Antam Pongkor merupakan metode penambangan bawah tanah (*cut and fill*). Pada tambang bawah tanah, geologi, geoteknik, dan geomekanika merupakan ilmu yang berperan penting untuk membuat suatu desain terowongan terutama dalam penentuan saran perkuatan dan analisis kestabilannya. Penelitian ini dilakukan pada area tambang Kubang Cicau tepatnya pada bukaan terowongan Kubang Cicau 474 Konek. Penelitian dilakukan dengan tujuan untuk menentukan nilai klasifikasi Sistem-Q. Nilai Sistem-Q tersebut digunakan untuk penentuan saran perkuatan pada terowongan. Evaluasi kestabilan terowongan dan analisis numerik turut dilakukan berdasarkan jenis potensi runtuh. Analisis numerik tersebut dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga terhadap parameter perpindahan total dan analisis diagram kapasitas daya dukung. Pada pengamatan lapangan, didapatkan litologi penyusun Kubang Cicau 474 Konek terdiri dari tuf lapili. Klasifikasi massa batuan Sistem-Q menunjukkan kategori massa batuan sangat buruk – terlampau buruk. Parameter-parameter massa batuan menunjukkan bahwa runtuh yang berpotensi terjadi adalah runtuh bertipe massa batuan. Berdasarkan kelas massa batuan pada klasifikasi Sistem-Q dihasilkan saran perkuatan berupa beton tembok terkuatkan serat dengan ketebalan 9 – 12 cm dan baut batuan dengan jarak 1,2 – 1,5 m. Hasil analisis numerik dan evaluasi penerapan perkuatan berdasarkan nilai Sistem-Q, menunjukkan bahwa nilai perpindahan total maksimum yang telah sesuai dengan standar PT Antam Pongkor dan analisis diagram kapasitas daya dukungnya menunjukkan bahwa titik-titik keruntuhan telah mampu ditangani. Sekalipun terjadi keruntuhan, hal itu memerlukan waktu yang cukup panjang dengan pemicu yang cukup kuat (di luar faktor kegempaan dan beban in-situ yang sudah dimasukkan dalam model), sehingga untuk metode penambangan *cut and fill* masih dapat ditolerir. Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, disimpulkan bahwa saran perkuatan berdasarkan klasifikasi Sistem-Q dapat diterapkan pada bukaan terowongan Kubang Cicau 474 Konek.

Kata kunci: jenis runtuh, kestabilan terowongan, metode elemen hingga, Sistem-Q

Abstract - Gold and silver of PT Antam are mainly sourced from Pongkor Mine Area, West Java. The mining method used by PT Antam Pongkor is an underground mining method (*cut and fill*). Geology, geotechnical and geomechanics are important things for tunnel design to consider support recommendation and stability analysis. Research area is located in Kubang Cicau mining area on tunnel drift Kubang Cicau 474 Konek. This research was conducted to determine the ratings of rock mass using Q-System classifications. The ratings from Q-System were used to determine rock support design recommendation for a tunnel. Evaluation of tunnel stability and numerical analysis were conducted based on collapse type. Numerical analysis was conducted using finite element method by concerning the total displacement and thrust diagram analysis. Lithology of Kubang Cicau 474 Konek are composed of lapilli tuff. Q-System classification showed very poor rock – extremely poor rock mass class. The rock mass parameters could determine that the location of Kubang Cicau 474 Konek have showed rockmass collapse type pattern. According to Q-system classification, rock support design recommendation of fiber reinforced shotcrete 9 – 15 cm thick and rock bolt with spacing 1,2 – 1,5 m. Numerical analysis and evaluation of rock support recommendation design from Q-system classification resulted in a maximum total displacement value suitable with PT Antam Pongkor standard and support capacity analysis has shown that point of collapse has been able to sustain. Eventhough the failure occurs, it requires long times to occur and should be caused by imminent factor (regardless of earthquake and in-situ stress which are included to the model), therefore the cut and fill method can be tolerated. It can be concluded that support recommendation based on Q-System could be implemented on tunnel drift Kuban Cicau 474 Konek.

Keywords: collapse type, tunnel stability, finite element method, Q-System

1. PENDAHULUAN

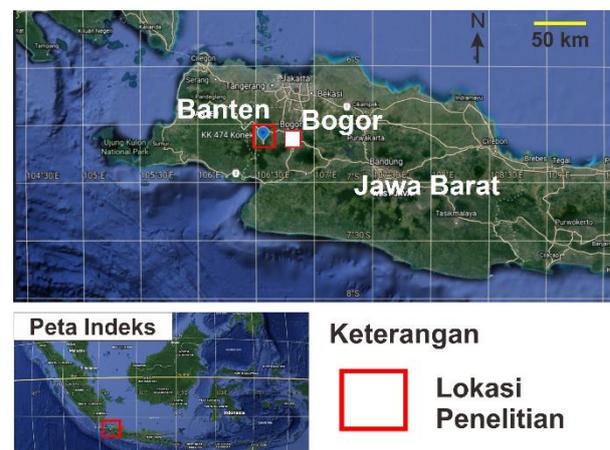
Pada daerah pertambangan umumnya sering dijumpai beberapa masalah yang ditimbulkan oleh variasi jenis dan kualitas massa batuan terutama untuk daerah pertambangan yang menerapkan metode penambangan bawah tanah. Untuk mengatasi masalah tersebut tentu analisis dan estimasi nilai massa batuan sangat perlu dilakukan. Setiap jenis dan kualitas massa batuan akan mempengaruhi perlakuan terhadap suatu massa batuan tersebut. Hasil analisis dan estimasi nilai massa batuan nantinya dapat digunakan sebagai penentu jenis perkuatan pada daerah pertambangan agar tidak terjadi permasalahan yang serius terkait keselamatan di dalam dunia kerja. Penelitian terdahulu seperti yang dilakukan oleh Wang dkk. (2014) dan Sastry dkk. (2015) menunjukkan bahwa analisis kestabilan terowongan penting untuk dilakukan karena mampu memberikan informasi untuk keamanan pada proses penambangan selanjutnya.

Keilmuan geologi, geoteknik, dan geomekanika merupakan ilmu yang berperan penting dalam kegiatan tambang bawah tanah, terutama untuk membuat suatu desain tambang (terowongan) dengan memperhitungkan faktor keamanan dan kestabilan. Variasi dan heterogenitas geologi di lapangan juga tidak dapat dihindarkan, termasuk dengan kondisi yang akan dihadapi di jalur rencana terowongan. Penggunaan klasifikasi massa batuan dapat menjadi solusi dalam mengelompokkan sifat massa batuan berdasarkan karakteristik-karakteristik geologi yang ada di lapangan. Hasil dari klasifikasi massa batuan akan dikombinasikan dengan data properti fisik dan mekanik batuan kemudian dimodelkan sehingga dapat memberi gambaran yang lebih jelas dalam kaitannya terhadap keperluan desain awal (*preliminary design*) suatu kegiatan konstruksi.

Studi geologi teknik yang meliputi analisis klasifikasi massa batuan dan evaluasi kestabilan terowongan perlu dilakukan untuk memberi gambaran mengenai kondisi massa batuan. Gambaran kondisi massa batuan tersebut akan digunakan sebagai penunjuk

awal saran perkuatan terowongan. Studi ini bertujuan untuk menentukan saran perkuatan pada terowongan tambang Kubang Cicau Konek 474 berdasarkan klasifikasi massa batuan Sistem-Q dan metode elemen hingga.

Penelitian dilakukan pada bukaan terowongan tambang Kubang Cicau 474 Konek (L 4,5 m x T 5 m) milik PT Antam UBPE Pongkor di Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat dengan koordinat 6°39'50" S, 106°33'58" E (**Gambar 1**). Metode penambangan yang digunakan pada daerah penambangan PT Antam Pongkor merupakan metode penambangan bawah tanah menggunakan *conventional cut and fill stoping* pada Kubang Cicau.



Gambar 1. Lokasi terowongan tambang Kubang Cicau 474 Konek di Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat (Google Earth, 2020).

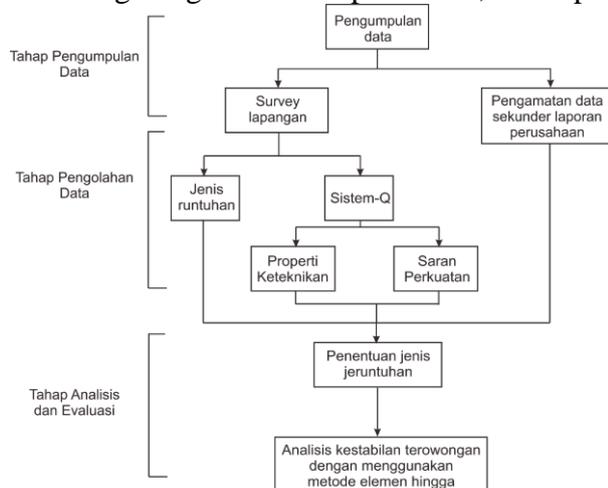
2. DATA DAN METODOLOGI

Data yang digunakan dalam analisis kestabilan terowongan Kubang Cicau 474 Konek meliputi data primer dan data sekunder. Data primer terdiri dari tiga data pengamatan massa batuan, tiga data geometri terowongan, sepuluh sampel batuan, dan 310 data struktur (kekar). Data sekunder terdiri dari data kedalaman terowongan, properti mekanik material penyangga, data uji laboratorium (PLI & γ), dan data sejarah kegagalan pada terowongan. Selanjutnya, digunakan perangkat lunak milik *Rocscience* untuk pengolahan data yaitu *Roclab 1.0* untuk penentuan nilai properti mekanik massa batuan dan *Rocscience Phase2 8.0* untuk analisis runtuh massa batuan serta

menentukan besarnya perpindahan dan tegangan total di sekitar terowongan. Parameter masukan yang dibutuhkan untuk melakukan analisis runtuh massa batuan menggunakan peranti lunak *Rosscience Phase2 8.0* adalah geometri terowongan, sebaran litologi pada muka terowongan, tegangan *in-situ*, dan properti mekanik massa batuan.

Metode penelitian dapat dibagi menjadi beberapa tahap yaitu tahap pengambilan data, tahap pengolahan data, dan tahap analisis dan evaluasi (**Gambar 2**).

Tahap pengambilan data meliputi kegiatan survei lapangan untuk pengambilan data primer dan pengumpulan data sekunder yang bersumber dari laporan serta data uji laboratorium PT Antam UBPE Pongkor. Kegiatan survei lapangan dimaksudkan untuk memperoleh parameter-parameter mengenai kondisi geologi di daerah penelitian, deskripsi



Gambar 2. Diagram alir penelitian.

litologi massa batuan, dan kondisi massa batuan. Pengambilan data dilakukan pada muka terowongan (*face*) setiap kali dilakukan peledakan. Pada penelitian kali ini dilakukan pengambilan data sebanyak tiga kali menyesuaikan dengan waktu peledakan (*blasting*) yang dilakukan oleh PT Antam Pongkor, yaitu pada tanggal 14 Januari 2020 (KK 474 Konek (14/01)), 21 Januari 2020 (KK 474 Konek (21/01)), dan 22 Januari 2020 (KK 474 Konek (22/01)). Pengumpulan data sekunder dilakukan untuk memperoleh parameter data nilai kuat tekan setiap perkuatan yang diterapkan, nilai massa jenis

batuan, dan kedalaman terowongan diukur dari permukaan. Pengumpulan data sekunder dilakukan untuk memperoleh parameter data nilai kuat tekan setiap perkuatan yang diterapkan, nilai massa jenis batuan, dan kedalaman terowongan diukur dari permukaan. Pengamatan data laporan perusahaan ditujukan guna mengetahui data hasil uji laboratorium properti fisik dan mekanik dari material penyangga, serta sejarah kegagalan perkuatan pada daerah penelitian. Tahap pengolahan data dimaksudkan untuk menentukan jenis runtuh berdasarkan parameter massa batuan dan perhitungan nilai klasifikasi massa batuan berdasarkan Sistem-Q. Penentuan nilai Q dilakukan menggunakan rumus pada **Persamaan 1** berdasarkan Barton dkk. (1974).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad \text{(Persamaan 1)}$$

Keterangan:

- Q : nilai Sistem-Q
- RQD : *Rock Quality Designation* (RQD)
- J_n : *joint set number*
- J_r : *joint roughness number*
- J_a : *joint alteration number*
- J_w : *joint water reduction number*
- SRF : *Stress Reduction Factor*

Penentuan nilai *Geological Strength Index* (GSI) secara empirik (**Persamaan 2 dan 3**) yang berdasarkan Hoek dkk. (1997) selanjutnya dilakukan sebagai salah satu parameter masukan untuk menentukan nilai properti keteknikan massa batuan.

$$GSI = 9 \ln Q' + 44 \quad \text{(Persamaan 2)}$$

$$Q' = [RQD/J_n] \cdot [J_r/J_a] \quad \text{(Persamaan 3)}$$

Keterangan:

- GSI : *Geological Strength Index*
- Q' : modifikasi dari nilai kualitas massa batuan
- RQD : *Rock Quality Designation* (RQD)
- J_n : *joint set number*
- J_r : *joint roughness number*
- J_a : *joint alteration number*

Klasifikasi massa batuan berdasarkan Sistem-

Q dilakukan untuk menentukan saran kekuatan pada terowongan. Sementara Klasifikasi GSI digunakan untuk menentukan nilai properti keteknikan massa batuan. Penentuan nilai properti mekanik massa batuan didekati dengan parameter-parameter fisik batuan dalam kaitannya terhadap massa batuan, salah satunya adalah kriteria umum Hoek-Brown (*Generalized Hoek-Brown Criterion*) yang dicetuskan oleh Hoek dkk. tahun 2002 setelah mengalami beberapa kali revisi (1980, 1983, 1988, 1992, dan 1997) terhadap penerapan kriteria ini dalam analisis numerik. Persamaan kriteria umum Hoek-Brown (2002) secara sederhananya adalah sebagai berikut (**Persamaan 4**):

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma'_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma'_{ci}} + s \right)^a \quad (\text{Persamaan 4})$$

Keterangan:

σ'_1 dan σ'_3 : Tegangan maksimum & minimum saat batuan *failure* (MPa)

σ'_{ci} : Kuat tekan uniaksial batuan utuh (MPa)

s dan a : Konstanta sesuai karakteristik suatu massa batuan

m_b : Konstanta Hoek-Brown massa batuan

Modulus deformasi massa batuan (E_m) merupakan salah satu parameter yang sangat penting dalam interpretasi deformasi yang terjadi pada massa batuan maupun dalam penggunaannya pada analisis numerik. Parameter ini merupakan bagian dari properti keteknikan massa batuan dan pada dasarnya dapat diestimasi berdasarkan nilai klasifikasi massa batuan, di antaranya berdasarkan pada nilai akhir dari klasifikasi RMR, Sistem Q, dan GSI, karena untuk pengujian laboratorium atau pengujian langsung di lapangan tergolong sangat sulit dan relatif mahal (Hoek dkk., 1995).

Hoek dkk. (2002) menyatakan bahwa nilai modulus deformasi massa batuan dapat diestimasi dari nilai *disturbance factor*, kuat tekan uniaksial (UCS) batuan utuh, dan nilai GSI melalui (**Persamaan 5**).

$$E_m \text{ (GPa)} = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma'_{ci}}{100}} \cdot 10^{((GSI-10)/40)} \quad (\text{Persamaan 5})$$

Keterangan:

E_m : modulus deformasi batuan (GPa)

D : *disturbance factor*

σ'_{ci} : Kuat tekan uniaksial batuan utuh (MPa)

GSI : *Geological Strength Index*

Kekuatan tarik (*tensile strength, ultimate tensile strength*) adalah tegangan maksimum yang bisa ditahan oleh sebuah bahan ketika diregangkan atau ditarik, sebelum bahan tersebut patah. Kekuatan tarik adalah kebalikan dari kekuatan tekan, dan nilainya bisa berbeda. Hoek pada tahun 1983 dalam Hoek dkk. (2002) menyatakan bahwa untuk material getas (*brittle*), nilai kuat tarik uniaksial akan sama dengan nilai kuat tarik biaksial-nya. Untuk menentukan nilai kuat tarik massa batuan Hoek-Brown (2002) telah membuat persamaan empiris (**Persamaan 6**) sebagai berikut:

$$\sigma_t = - \frac{s \sigma_{ci}}{m_b} \quad (\text{Persamaan 6})$$

Keterangan:

σ_t : kuat tarik massa batuan (MPa)

s : konstanta sesuai karakteristik suatu massa batuan

m_b : konstanta Hoek-Brown massa batuan

Parameter tambahan berupa nilai H (kedalaman terowongan dalam m) dan γ (berat isi material dalam kg/m^3) digunakan untuk menentukan kohesi dan sudut gesek dalam (**Persamaan 7**). Hal tersebut dilakukan untuk menentukan pendekatan kriteria Mohr-Coulomb dari Hoek-Brown pada massa batuan (Hoek dkk., 2002) (**Gambar 3**).

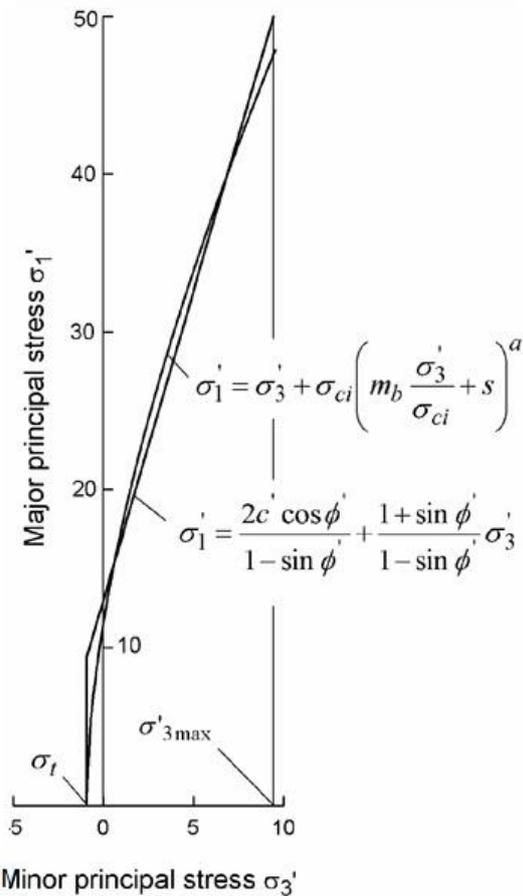
$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0,47 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0,94} \quad (\text{Persamaan 7})$$

Keterangan:

σ'_{3max} : batas maksimal dari tegangan tertekan (*confining stress*) pada kriteria Hoek-Brown dan Mohr-Coulomb (MPa)

σ'_{cm} : kuat tekan umum massa batuan (MPa)

γ : berat isi massa batuan (kg/m^3)
 H : kedalaman terowongan (m)



Gambar 3. Pendekatan kriteria Mohr-Coulomb dari Hoek-Brown (Hoek dkk., 2002).

Proses pencocokan kriteria Hoek-Brown terhadap kriteria Mohr-Coulomb dilakukan pada kurva mulai dari σ_t hingga σ_{3max} (didefinisikan $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma_{3max}$) dengan cara menyeimbangkan luar daerah di atas dan di bawah dari kurva plot Mohr-Coulomb atau dikenal dengan istilah *best-fit* (**Gambar 3**). Perhitungan matematis untuk sudut gesek dalam dan kohesi massa batuan dari pendekatan kurva Hoek-Brown terhadap Mohr-Coulomb ditulis dalam **Persamaan 8** dan **Persamaan 9** (Hook dkk., 2002).

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (sm_b \sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$$

(Persamaan 8)

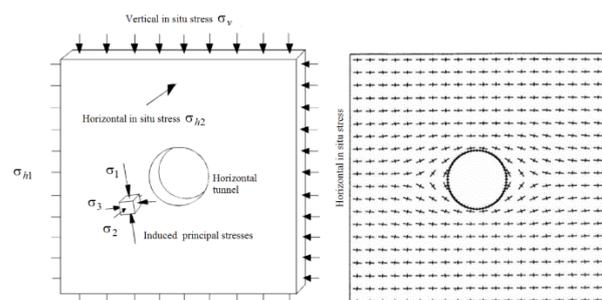
$$c' = \frac{\sigma'_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + (6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}) / (1+a)(2+a)}}$$

(Persamaan 9)

Keterangan:

- a : nilai konstanta Hoek-Brown sesuai kriteria massa batuan
- c' : kohesi massa batuan
- m_b : konstanta Hoek-Brown untuk massa batuan
- s : nilai konstanta sesuai karakteristik suatu massa batuan
- σ'_{ci} : kuat tekan uniaksial batuan utuh
- σ'_{3n} : tegangan geser normal minimum
- ϕ' : sudut gesek dalam massa batuan

Berdasarkan perhitungan Barton (2002) nilai nisbah Poisson digeneralisir atau disamaratakan menjadi 0,25. Selain properti keteknikan massa batuan hal yang tidak kalah pentingnya dalam analisis kestabilan terowongan adalah tegangan *in-situ*. Tegangan *in-situ* pada dasarnya merupakan kondisi tegangan alami yang dimiliki suatu massa batuan. Kondisi batuan yang belum dilakukan ekskavasi akan memiliki nilai tegangan pada arah-arah tertentu yang umumnya dimodelkan dalam tiga arah sebagai sigma 1 (σ_1), sigma 2 (σ_2), dan sigma 3 (σ_3) (**Gambar 4**). Nilai tegangan terbesar disepakati merupakan sigma 1 dan nilai tegangan terkecil disepakati sebagai sigma 3. Penentuan nilai tegangan *in-situ* suatu massa batuan pada tahap awal desain dapat diketahui melalui persamaan-persamaan analitik dan empirik ataupun dapat dipastikan melalui uji *in-situ* yang memiliki tingkat keakuratan tinggi (Hoek, 2007).



Gambar 4. Model dua dimensi tegangan yang terinduksi akibat dari suatu bukaan terowongan (Hoek dkk., 2002).

Nilai tegangan *in-situ* dapat dihitung menggunakan teori elastisitas sederhana (Turchaninov dkk. 1979 dalam Hudson dan Harrison 1997) (**Persamaan 10, 11, 12**):

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad (\text{Persamaan 10})$$

$$\sigma_h = k \cdot \sigma_v = \gamma \cdot z \quad (\text{Persamaan 11})$$

dengan,

$$k = \frac{V}{1-V} \quad (\text{Persamaan 12})$$

Keterangan:

- σ_v : nilai tegangan vertikal (KPa)
- γ : massa jenis massa batuan (Ton/m³)
- z : kedalaman terowongan (m)
- σ_h : nilai tegangan horizontal (KPa)
- V : nilai nisbah Poisson

Selanjutnya, pada tahap analisis dilakukan simulasi dengan metode elemen hingga untuk menentukan besarnya perpindahan dan tegangan total di sekitar terowongan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan tingkat optimalisasi jenis perkuatan yang disarankan melalui klasifikasi massa batuan Sistem-Q. Selain itu juga ditentukan faktor keamanan pada muka terowongan berdasarkan sifat fisik dan mekanik dari massa batuan, serta kebutuhan penyangga yang dihasilkan dari klasifikasi Sistem-Q.

Desain perkuatan terowongan menggunakan beberapa persamaan yaitu sebagai berikut. Dalam mencari panjang baut batuan yang merupakan fungsi dari diameter terowongan, digunakan perumusan menurut Barton dkk. (1974) yang menggunakan data masukan berupa ESR dan diameter terowongan (**Persamaan 13**).

$$L = \frac{2+0,15 (B)}{ESR} \quad (\text{Persamaan 13})$$

Keterangan:

- L : panjang baut batuan (m)
- B : diameter terowongan (m)
- ESR : *Excavation Support Ratio*

Penentuan saran perkuatan dilakukan dengan

menggunakan tabel klasifikasi milik Grimstad (2007) dengan perhitungan nilai Sistem-Q rata-rata yang mempertimbangkan keberadaan zona lemah berdasarkan Bhasin dkk. (1995) (**Persamaan 14**).

$$\text{Log } Q_r = \frac{b+\text{Log}Q_{zu}+\text{Log } Q_{zl}}{b+1} \quad (\text{Persamaan 14})$$

Keterangan:

- Q_r : nilai Q rata-rata
- b : tebal zona lemah (m)
- Q_{zu} : nilai Q dari zona utama
- Q_{zl} : nilai Q dari zona lemah

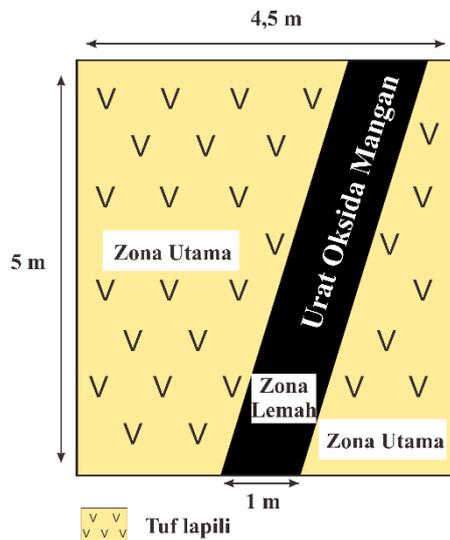
Tahapan evaluasi merupakan tahap akhir dari hasil analisis yang dilakukan dengan cara membandingkan antara stabilitas massa batuan (perpindahan, tegangan total, dan faktor perpindahan) setelah disangga dengan saran perkuatan berdasarkan klasifikasi massa batuan Sistem-Q.

3. HASIL DAN ANALISIS KONDISI GEOLOGI TEROWONGAN KUBANG CICAU 474 KONEK

Terowongan Kubang Cicau 474 Konek (**Gambar 5.a**) tersusun atas litologi tuf lapili berwarna abu-abu gelap, sedikit terlapukan dan terkekarkan kuat, ditemukan urat kuarsa (pada gambar terlihat berwarna putih) dan urat *manganese* (pada gambar terlihat berwarna hitam). Orientasi terowongan berarah N190° E, dengan diskontinuitas utama berarah N357° E/67°. Pada bagian barat muka terowongan terdapat urat *manganese* yang sangat dominan dengan tebal 1 m, hal ini dianggap sebagai zona lemah pada pemodelan analisis kestabilan terowongan. Sketsa singkapan terowongan dapat dilihat pada (**Gambar 5.b**).



(a)



(b)
Gambar 5. (a) kondisi massa batuan di Terowongan Kubang Cicau 474 Konek, (b) sketsa singkapan pada muka Terowongan Kubang Cicau 474 Konek.

Tuf lapili (berdasarkan klasifikasi Fischer, 1984) di daerah penelitian berwarna abu-abu gelap, sedikit terlapukan dan terkekarkan, ukuran butir <math>< 2 - 6 \text{ mm}</math>, sortasi sedang, permeabilitas baik, menyudut-menyudut tanggung, *low sphericity*, fragmen terdiri dari lapili (25% tersusun atas litik mafik, piroksen, klorit, *illite* hasil ubahan plagioklas (?)) dan abu vulkanik (75% dengan 60% telah berubah menjadi *smectite* dan *illite*) (**Gambar 6**).



Gambar 6. Sampel tangan tuf lapili pada Terowongan Kubang Cicau 474 Konek.

PERHITUNGAN SISTEM-Q

Klasifikasi massa batuan yang digunakan

adalah Sistem-Q yang digagas oleh Barton dkk. (1974). Klasifikasi massa batuan tersebut nantinya dapat digunakan sebagai saran rekomendasi perkuatan pada Terowongan Kubang Cicau (KK) 474 Konek. Sistem klasifikasi massa batuan Sistem-Q (1974) didasarkan pada enam parameter diskontinuitas, yaitu *Rock Quality Designation* (RQD), *joint set number* (Jn), *joint roughness number* (Jr), *joint alteration number* (Ja), *joint water reduction number* (Jw), dan *Stress Reduction Factor* (SRF).

Berdasarkan hasil perhitungan RQD yang mengacu pada klasifikasi Sistem-Q (Barton dkk., 1974) didapatkan bahwa nilai RQD untuk berada pada rentang 37,96% - 40,60% sedangkan untuk zona lemah bernilai 17,21% - 18,42%. Hasil pengamatan jumlah set diskontinuitas di lapangan selanjutnya diklasifikasikan berdasarkan Barton dkk. (1974), didapatkan bahwa lokasi penelitian KK 474 Konek terdiri dari tiga set diskontinuitas dengan diskontinuitas acak. Nilai kondisi kekasaran diskontinuitas pada lokasi penelitian didapatkan dari pengamatan permukaan diskontinuitas di lapangan. Data pengamatan kemudian diklasifikasikan ke dalam klasifikasi *Joint Roughness Number* (Jr) menurut Barton dkk. (1974), didapatkan bahwa kondisi massa batuan lokasi Terowongan KK 474 Konek memiliki kondisi diskontinuitas halus pada bidang planar-bergelombang.

Berdasarkan hasil pengamatan kondisi alterasi pada diskontinuitas serta diklasifikasikan berdasarkan Barton dkk. (1974), didapatkan bahwa pada lokasi KK 474 Konek kontak antarbatuan yang terpisah oleh diskontinuitas mengalami pergeseran <math>< 10 \text{ cm}</math> dengan isian masing-masing berupa mineral lempung lunak - tidak lunak yang sudah terkonsolidasi rendah - kuat dengan ketebalan <math>< 5 \text{ mm}</math>, dan partikel pasir. Pada lokasi KK 474 Konek juga ditemui pula zona lemah berupa lapisan lempung yang tebal dan menerus.

Hasil pengamatan kondisi airtanah di lapangan menunjukkan bahwa kondisi aliran airtanah memiliki tekanan rendah dengan kondisi kering - lembap. Dari pengamatan kondisi

SRF di lapangan, diketahui bahwa penyebab utama yang mempengaruhi kondisi SRF di lokasi penelitian disebabkan oleh keberadaan diskontinuitas, dalam hal ini adalah keberadaan zona-zona lemah. Pada terowongan KK 474 Konek ditemukan zona lemah tunggal. Oleh karena itu, perlakuan khusus dilakukan pada lokasi Terowongan KK 474 Konek karena memiliki zona lemah dengan ketebalan yang cukup besar dan akan sangat mempengaruhi kestabilan terowongan.

Nilai total Sistem-Q diperoleh dengan

kalkulasi enam parameter Sistem-Q yang mengacu pada klasifikasi Sistem-Q oleh Barton dkk. (1974). Parameter RQD dibagi dengan parameter J_n menghasilkan suatu parameter geometri massa batuan, parameter J_r dibagi dengan parameter J_a akan menghasilkan suatu parameter mengenai kuat geser internal dari massa batuan, serta parameter J_w dibagi dengan SRF menghasilkan parameter eksternal yang berkaitan dengan kondisi tegangan aktif. Hasil pembobotan dan perhitungan Nilai Sistem-Q serta penentuan kelasnya dapat dilihat pada (Tabel 1).

Tabel 1. Hasil Pembobotan dan Perhitungan Nilai Sistem-Q beserta Penentuan Kelas Massa Batuan pada Setiap Lokasi (berdasarkan Barton dkk., 1974).

Lokasi	Zona	RQD	J_n	J_a	J_r	J_w	SRF	Nilai Q	Kelas
KK 474 Konek (14/01)	Utama	37,96	12	1	6	1	2,5	0,18	Sangat Buruk
	Lemah	18,47	12	2	10	1	5	0,06	Terlampau Buruk
KK 474 Konek (21/01)	Utama	37,96	12	2	6	1	2,5	0,42	Sangat Buruk
	Lemah	18,47	12	1	10	1	5	0,03	Terlampau Buruk
KK 474 Konek (22/01)	Utama	40,60	12	2	8	0,66	2,5	0,22	Sangat Buruk
	Lemah	17,21	12	1	10	0,66	5	0,02	Terlampau Buruk

Berdasarkan tabel tersebut, terowongan KK 474 Konek termasuk dalam kelas sangat buruk untuk massa batuan pada zona utama dan kelas terlampau buruk untuk massa batuan pada zona lemah.

ANALISIS PROPERTI MEKANIK MASSA BATUAN

Nilai UCS pada terowongan KK 474 Konek bernilai 73,144 Mpa untuk jenis batuan tuf lapili dan bernilai 5 Mpa untuk urat *manganese* (zona lemah) yang dikonversi dari Uji Laboratorium *Point Load Index* (PLI). Sebelum melaksanakan analisis elemen hingga terhadap nilai kestabilan terowongan yang didapatkan dari penerapan perkuatan menurut Sistem-Q, perlu dilakukan pengumpulan dan pengolahan data properti mekanik massa batuan. Dalam mendapatkan properti mekanik massa batuan dapat dilakukan pendekatan konseptual yang dapat dikombinasikan dengan persamaan-persamaan empirik sehingga nilai properti mekanik massa batuan dapat didekati seakurat mungkin.

Properti mekanik massa batuan yang akan digunakan dalam analisis elemen hingga

adalah nilai modulus deformasi massa batuan, kuat tarik massa batuan, kohesi, sudut gesek dalam, konstanta batuan utuh Hoek-Brown, nilai klasifikasi massa batuan, dan nisbah Poisson massa batuan. Untuk penentuan properti mekanik massa batuan berupa nisbah Poisson akan dilakukan dengan menggunakan perhitungan rumus Barton (2002) berdasarkan nilai Sistem-Q (Tabel 1). Berdasarkan perhitungan Barton (2002) nilai nisbah Poisson digeneralisir atau disamaratakan menjadi 0,25.

Penentuan properti mekanik yang lainnya berupa nilai modulus deformasi massa batuan, kuat tarik massa batuan, kohesi, dan sudut gesek dalam, akan didekati menggunakan prinsip kurva *Generalized* Hoek-Brown dari data masukan yang berupa properti keteknikan sampel batuan utuh. Kemudian menggunakan perangkat lunak *Rocdata* 4.0, dilakukan pencocokan kurva (*curve fitting*) dari kurva *Generalized* Hoek-Brown yang didekati dengan kurva Mohr-Coulomb). Pendekatan ini dilakukan untuk mendapatkan nilai kohesi massa batuan ekuivalen dan nilai sudut gesek dalam massa batuan ekuivalen, yang seringkali digunakan dalam analisis metode elemen

hingga. Data masukan yang dibutuhkan adalah nilai UCS batuan utuh, nilai GSI yang diestimasi melalui data Sistem-Q, konstanta Hoek (m_i) yang diestimasi melalui litologi daerah penelitian, *nilai disturbance factor* (D) yang diketahui dari faktor gangguan massa batuan yang muncul dari hasil ekskavasi dan *stress relaxation*, kedalaman terowongan, dan berat jenis massa batuan pada daerah penelitian yang didapatkan dari data perusahaan.

Lokasi Terowongan KK 474 Konek terletak pada elevasi 474 mdpl dan terletak pada kedalaman 279 m. Kemajuan Terowongan KK 474 Konek setiap kali peledakan adalah 1,5 m. Dalam penelitian kali ini dilakukan tiga kali analisis secara berturut-turut mengikuti jadwal peledakan yaitu pada tanggal 14, 21, dan 22 Januari 2020. Pada Lokasi KK 474 Konek ini ditemukan zona lemah berupa urat oksida mangan yang membentuk sebuah zona dengan tebal 1 m. Hal ini haruslah sangat diperhatikan, karena dengan keberadaan zona lemah yang

kestabilan terowongan. Estimasi properti mekanik massa batuan didapatkan dari persamaan empirik kriteria umum Hoek-Brown dan pendekatan grafik Mohr-Coloumb.

Salah satu parameter masukan dari persamaan tersebut adalah nilai GSI yang didapatkan dari persamaan empirik berdasarkan metode analisis klasifikasi massa batuan yang digunakan yaitu Sistem-Q. Berdasarkan hal tersebut maka pada penelitian kali ini akan didapatkan dua nilai properti keteknikan massa batuan yang nantinya digunakan dalam pemodelan analisis kestabilan terowongan pada lokasi KK 474 Konek (**Tabel 2**). Pada desain suatu terowongan, faktor-faktor pembebanan (*loading*) menjadi faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam analisis kekuatan dan kestabilan terowongan. Sumber beban utama yang dipertimbangkan dalam analisis kekuatan dan kestabilan terowongan pada daerah penelitian adalah faktor tegangan *in-situ*.

Tabel 2. Hasil Analisis Properti Keteknikan Massa Batuan dengan Menggunakan *Roclab 1.0*.

Lokasi	Zona	Modulus Deformasi (MPa)	Kuat Tarik (MPa)	Kohesi (MPa)	Sudut Gesek Dalam (°)	Kuat Tekan Massa Batuan (MPa)
KK 474 Konek (14/01)	Utama	3955	-0,03	1,16	46,3	2,0
	Lemah	870	-0,01	0,14	18,2	0,1
KK 474 Konek (21/01)	Utama	6232	-0,06	1,34	48,6	3,2
	Lemah	601	-0,01	0,12	16,6	0,1
KK 474 Konek (22/01)	Utama	5554	-0,05	1,30	48,1	2,8
	Lemah	579	-0,01	0,12	16,4	0,1

menerus akan sangat berpengaruh terhadap Tegangan *in-situ* pada terowongan akan terganggu seiring dilaksanakannya kegiatan ekskavasi dan membuat stress berbelok dan teralirkan pada medium massa batuan di sekelilingnya memicu adanya tegangan terinduksi (*induced stress*). Untuk keadaan awal terowongan, tegangan utama terbesar dianggap sebagai beban vertikal (σ_v) yang berupa *overburden* dari massa batuan di atas jalur rencana terowongan. Besar beban vertikal ini bergantung pada beban *overburden* total yang didapatkan dari nilai berat isi massa batuan di atasnya dan dikali ketebalan kolomnya. Selain tegangan utama yang merupakan tegangan vertikal massa batuan, juga terdapat adanya sigma 2 (σ_2) dan sigma 3 (σ_3) yang diinterpretasikan merupakan

tegangan yang berarah horizontal. Nilai tegangan ini merupakan tegangan yang tegak lurus satu dengan yang lainnya dan juga tegak lurus dengan tegangan utama.

Analisis dua dimensi dapat dilakukan dengan mengasumsikan nilai sigma 2 dan sigma 3 memiliki besaran yang sama disebut sebagai tegangan horizontal. Pada penentuan besaran tegangan horizontal dilakukan asumsi bahwa tidak ada perpindahan lateral yang diakibatkan dari pemberian tegangan pada arah vertikal dan horizontal, sehingga dapat diketahui melalui teori elastisitas (Turchainnov dkk. 1979 dalam Hudson dan Harrison 1997). Besaran nilai tegangan horizontal dapat diketahui dengan mengalikan tegangan vertikal dengan

Tabel 4. Penentuan Jenis Runtuhan berdasarkan klasifikasi Pratama dkk. (2015).

Lokasi	UCS	RQD	JS	JF	GW	RMR _{basic}	Jenis Keruntuhan
KK 474 Konek (14/01)	5,9	6,9	8	11,4	10	42,2	Massa Batuan
KK 474 Konek (21/01)	5,9	6,9	8	11,4	10	42,2	Massa Batuan
KK 474 Konek (22/01)	5,9	6,9	8,4	11,4	7	39,6	Massa Batuan

konstanta (k) yang merupakan faktor nisbah Poisson dari material massa batuan. Besar tegangan vertikal dan horizontal dapat dilihat pada (Tabel 3).

Tabel 3. Hasil Penentuan Nilai Tegangan Vertikal dan Tegangan Horizontal.

Lokasi	γ (Ton/m ³)	z (m)	k	σ_v (Ton/m ²)	σ_h (Ton/m ²)
KK 474 Konek (14/01)	2,5	279	0,57	697,5	232,5
KK 474 Konek (21/01)	2,5	279	0,57	697,5	232,5
KK 474 Konek (22/01)	2,5	279	0,58	697,5	232,5

ANALISIS TIPE KERUNTUHAN PADA TEROWONGAN

Penentuan tipe keruntuhan pada lokasi penelitian akan didasari oleh klasifikasi yang telah dibuat oleh Pratama dkk. (2015). Pratama dkk. (2015) menyatakan bahwa setidaknya terdapat empat jenis keruntuhan yang dapat ditemui pada terowongan PT Antam UBPE Pongkor. Pratama dkk. (2015) telah membuat klasifikasi penentuan jenis keruntuhan pada lokasi penelitian berdasarkan nilai dari masing-masing parameter massa batuan berupa nilai UCS, RQD, jarak antardiskontinuitas (JS), kondisi diskontinuitas (JF), aliran air tanah (GW), dan penjumlahan seluruh parameternya (RMR_{basic}). Seluruh penilaian parameter tersebut dibobotkan berdasarkan klasifikasi RMR milik Bieniawski (1989). Berdasarkan hasil analisis dapat diketahui bahwa lokasi KK 474 Konek memiliki tipe keruntuhan massa

batuan (*rockmass*) (Tabel 4).

ANALISIS TINGGI RUNTUHAN DAN NILAI PERPINDAH TOTAL SEBELUM DIBERI PERKUATAN

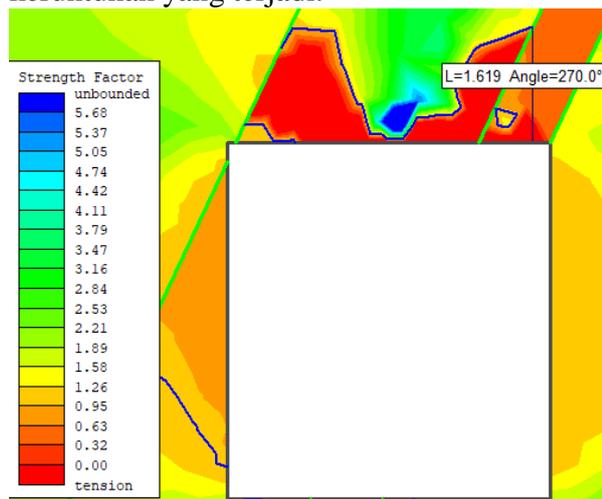
Pemodelan yang dilakukan dengan peranti lunak Phase2 8.0, memerlukan nilai properti masukan berupa nilai properti mekanik dan tegangan in-situ yang telah dibahas pada Tabel 2 dan Tabel 3. Penentuan tinggi runtuhan dilakukan dengan estimasi melalui pengukuran area dengan nilai FK <1 dan memiliki nilai ketinggian maksimum ketika diukur tegak lurus terhadap atap terowongan. Sementara, untuk penentuan nilai perpindahan total maksimum dilakukan 3 pengukuran pada masing-masing bagian atap dan dinding terowongan, kemudian dicari nilai yang paling maksimum.

Analisis runtuhan tipe massa batuan sebelum diberi perkuatan pada suatu terowongan dimaksudkan untuk mengetahui nilai faktor keamanan dan nilai perpindahan total. Nilai faktor keamanan digunakan untuk mengestimasi tinggi runtuhan. Nilai perpindahan total digunakan untuk menentukan area-area atau titik yang memiliki kecenderungan untuk mengalami keruntuhan melalui penentuan nilai perpindahan total maksimum pada atap dan dinding terowongan. Dalam penelitian kali ini, dilakukan tiga kali analisis perpindahan total secara berturut-turut mengikuti jadwal peledakan yaitu pada tanggal 14, 21, dan 22 Januari 2020.

(a) Pada Tanggal 14 Januari 2020

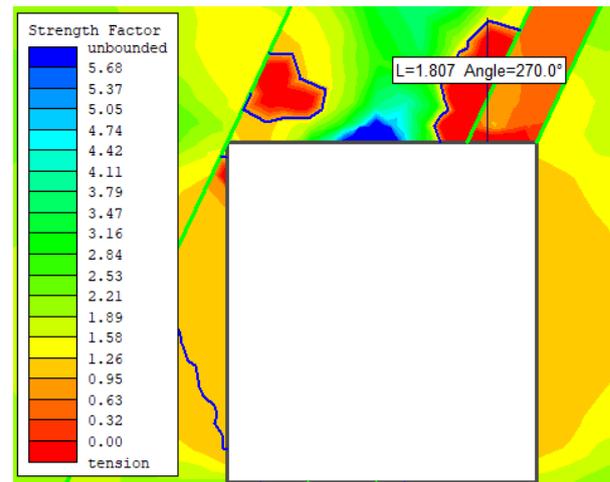
Berdasarkan hasil pemodelan (lihat Gambar 7 dan Gambar 8), didapatkan nilai tinggi runtuhan sebesar 1,6 m. Selain nilai tinggi runtuhan, didapatkan juga nilai perpindahan total maksimum pada dinding terowongan sebesar $1,8 \times 10^{-3}$ m dan nilai perpindahan total maksimum pada atap terowongan sebesar $7,7 \times 10^{-3}$ m. Nilai perpindahan total maksimum yang didapatkan pada atap terowongan masih melebihi nilai perpindahan total yang sudah ditetapkan PT Antam Pongkor untuk terowongan yang belum diberi perkuatan yaitu $6,5 \times 10^{-3}$ m. Berdasarkan hal tersebut, maka harus dilakukan pemasangan perkuatan pada

terowongan, untuk menangani kemungkinan keruntuhan yang terjadi.

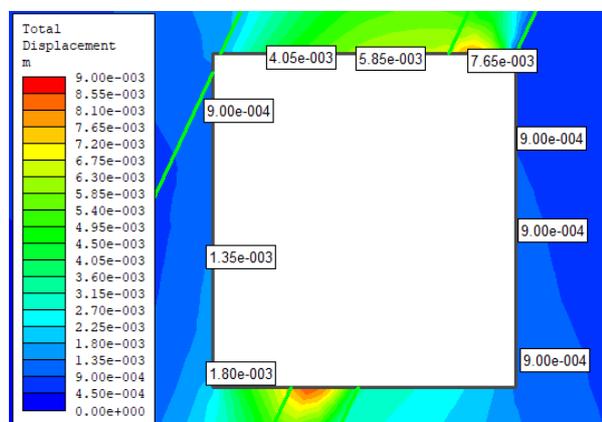


Gambar 7. Pemodelan Phase2 8.0 untuk mengestimasi nilai tinggi runtuh sebelum diberi perkuatan pada tanggal 14 Januari 2020.

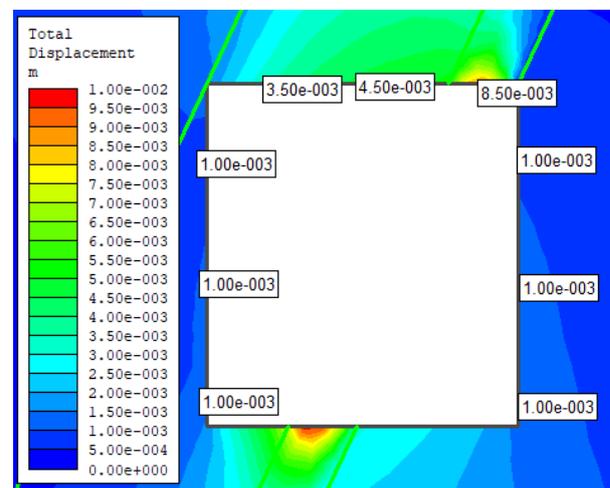
harus dilakukan pemasangan perkuatan pada terowongan, untuk menangani kemungkinan keruntuhan yang terjadi.



Gambar 9. Pemodelan Phase2 8.0 untuk mengestimasi nilai tinggi runtuh sebelum diberi perkuatan pada tanggal 21 Januari 2020.



Gambar 8. Pemodelan Phase2 8.0 untuk mengestimasi nilai perpindahan total sebelum diberi perkuatan pada tanggal 14 Januari 2020.



Gambar 10. Pemodelan Phase2 8.0 untuk mengestimasi nilai perpindahan total sebelum diberi perkuatan pada tanggal 21 Januari 2020.

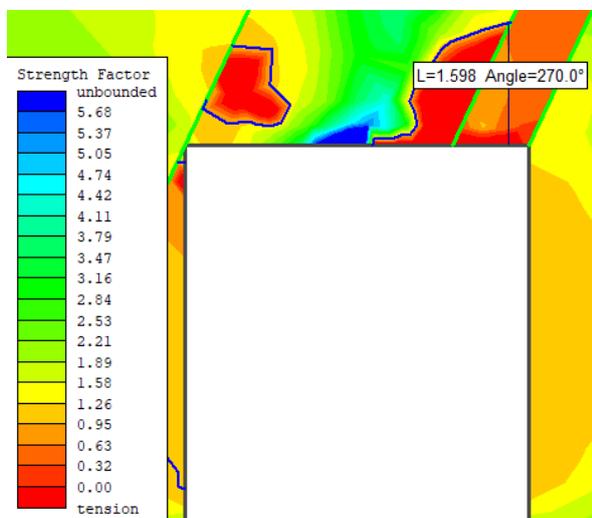
(b) Pada Tanggal 21 Januari 2020

Berdasarkan hasil pemodelan (lihat **Gambar 9** dan **Gambar 10**), didapatkan nilai tinggi runtuh sebesar 1,8 m. Selain nilai tinggi runtuh, didapatkan juga nilai perpindahan total maksimum pada dinding terowongan sebesar 1×10^{-3} m, dan perpindahan total maksimum pada atap sebesar $8,5 \times 10^{-3}$ m. Nilai perpindahan total maksimum yang didapatkan pada atap terowongan masih melebihi nilai perpindahan total yang sudah ditetapkan PT Antam Pongkor untuk terowongan yang belum diberi perkuatan yaitu $6,5 \times 10^{-3}$ m. Berdasarkan hal tersebut, maka

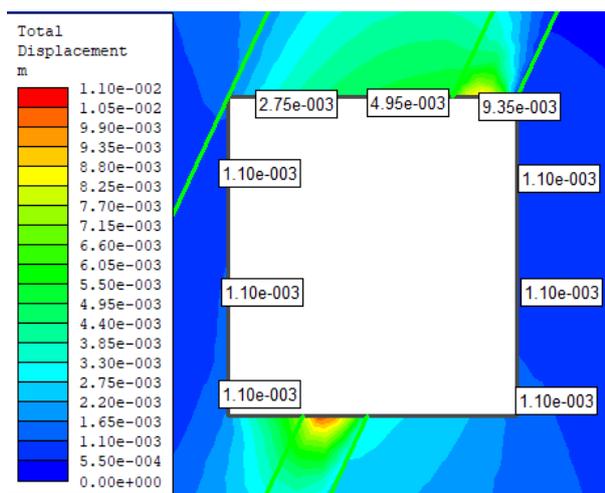
(c) Pada Tanggal 22 Januari 2020

Berdasarkan hasil pemodelan (lihat **Gambar 11** dan **Gambar 12**), didapatkan nilai tinggi runtuh sebesar 1,6 m. Selain nilai tinggi runtuh, didapatkan juga nilai perpindahan total maksimum pada dinding terowongan sebesar $1,1 \times 10^{-3}$ m, dan perpindahan total maksimum pada atap sebesar $9,4 \times 10^{-3}$ m. Nilai perpindahan total maksimum yang didapatkan pada atap terowongan masih

melebihi nilai perpindahan total yang sudah ditetapkan PT Antam Pongkor untuk terowongan yang belum diberi perkuatan yaitu $6,5 \times 10^{-3}$ m. Berdasarkan hal tersebut, maka harus dilakukan pemasangan perkuatan pada terowongan, untuk menangani kemungkinan keruntuhan yang terjadi.



Gambar 11. Pemodelan *Phase2 8.0* untuk mengestimasi nilai tinggi runtuh sebelum diberi perkuatan pada tanggal 22 Januari 2020.



Gambar 12. Pemodelan *Phase2 8.0* untuk mengestimasi nilai perpindahan total sebelum diberi perkuatan pada tanggal 22 Januari 2020.

SARAN DESAIN PERKUATAN BERDASARKAN KLASIFIKASI SISTEM-Q

Saran perkuatan berdasarkan klasifikasi Sistem-Q didasarkan pada nilai Sistem-Q yang

kemudian dikorelasikan terhadap diameter terowongan ekuivalen. Diketahui nilai *Excavated Support Ratio* (ESR) berdasarkan Barton dan Grimstad (2014) untuk terowongan bukaan tambang sementara berkisar antara 2 – 5, namun Barton hanya menggunakan 5 data untuk menentukan nilai tersebut, sehingga untuk penelitian kali ini menggunakan nilai ESR sebesar 1,6 atau dikategorikan sebagai terowongan bukaan tambang permanen. Dalam mencari panjang baut batuan yang merupakan fungsi dari diameter terowongan, digunakan perumusan menurut Barton dkk. (1974) yang menggunakan data masukan berupa ESR dan diameter terowongan (**Persamaan 11**).

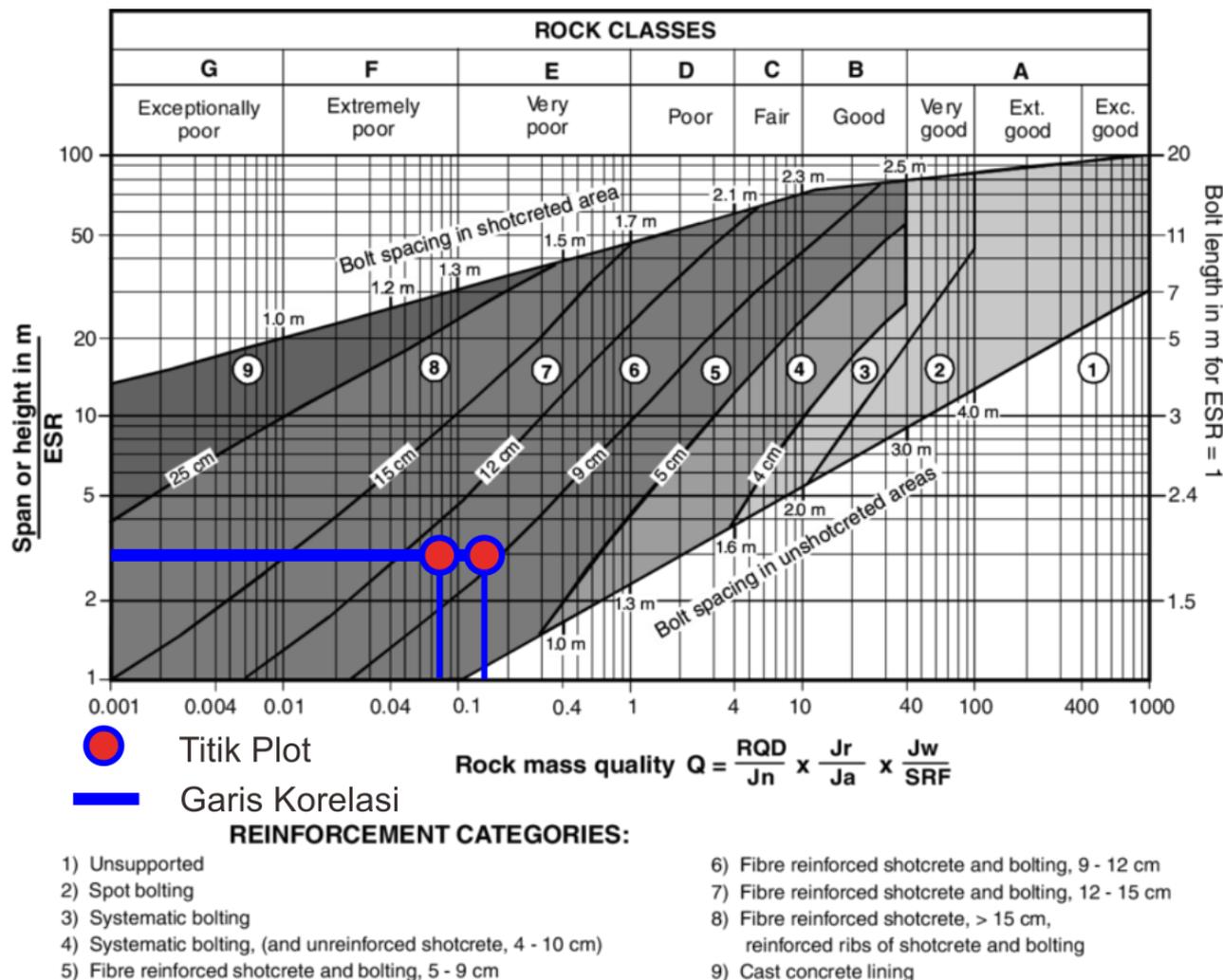
Dari tiga kali pengamatan yang dilakukan, didapatkan nilai rata-rata Sistem-Q yang mengakomodir kehadiran zona lemah secara berurutan 0,11, 0,11, dan 0,07 berdasarkan (**Persamaan 12**). Nilai span dari terowongan adalah 5 m. Penentuan saran perkuatan dilakukan dengan menggunakan diagram klasifikasi yang dibuat oleh Grimstad (2007). Diagram tersebut mengestimasi saran perkuatan terowongan berdasarkan nilai Sistem-Q yang dikorelasikan dengan nilai *span* dibagi ESR (**Gambar 13**). Setelah dilakukan plot diagram, didapatkan bahwa perkuatan yang disarankan untuk terowongan KK 474 Konek berupa beton tembak terkuatkan serat (S(fr)) dan baut batuan dengan panjang 1,72 m. Beton tembak terkuatkan serat diharuskan memiliki kapasitas adsorpsi energi sebesar 700 J dengan tebal 9 - 12 cm. Jarak antar baut batuan berkisar antara 1,3 – 1,5 m untuk tanggal 14 dan 21 Januari 2020, serta 1,2 – 1,3 m untuk tanggal 22 Januari 2020.

ANALISIS DIAGRAM KAPASITAS DAYA DUKUNG DAN PERPINDAHAN TOTAL SETELAH DIBERI PERKUATAN

Pada lokasi penelitian dilakukan analisis kestabilan terowongan menggunakan aplikasi *Phase2 8.0*. Analisis dilakukan untuk mengetahui apakah sistem perkuatan yang disarankan telah mampu memenuhi standar yang telah ditetapkan oleh PT Antam Pongkor. Pada jenis keruntuhan massa batuan aspek yang dianalisis adalah diagram kapasitas daya

dukung untuk menganalisis kelayakan sistem perkuatan pasif yang dipasang dan nilai perpindahan total untuk menganalisis

kelayakan sistem perkuatan aktif yang dipasang.



Gambar 13. Penentuan saran perkuatan berdasarkan klasifikasi massa batuan Sistem-Q dengan bantuan diagram Grimstad (2007).

ANALISIS DIAGRAM KAPASITAS DAYA DUKUNG DAN PERPINDAHAN TOTAL SETELAH DIBERI PERKUATAN

Pada lokasi penelitian dilakukan analisis kestabilan terowongan menggunakan aplikasi *Phase2 8.0*. Analisis dilakukan untuk mengetahui apakah sistem perkuatan yang disarankan telah mampu memenuhi standar yang telah ditetapkan oleh PT Antam Pongkor. Pada jenis keruntuhan massa batuan aspek yang dianalisis adalah diagram kapasitas daya dukung untuk menganalisis kelayakan sistem perkuatan pasif yang dipasang dan nilai perpindahan total untuk menganalisis

kelayakan sistem perkuatan aktif yang dipasang.

Analisis diagram kapasitas daya dukung dilakukan untuk menganalisis kemampuan dari sistem perkuatan pasif yang terpasang. Hal tersebut dapat tercermin melalui titik-titik keruntuhan yang dibatasi oleh nilai FK yang ditetapkan yaitu $FK \geq 1,25$ untuk batas aman dan $FK \geq 1$ untuk batas kritis mengalami keruntuhan. Apabila titik-titik keruntuhan berada di dalam batas nilai FK yang ditetapkan, maka perkuatan yang terpasang sudah mampu menahan titik-titik keruntuhan yang ada (stabil), sebaliknya apabila titik-titik keruntuhan berada di luar batas FK yang

ditetapkan, maka kondisi terowongan akan rawan mengalami keruntuhan, namun ada beberapa pertimbangan yang akan dijelaskan lebih lanjut.

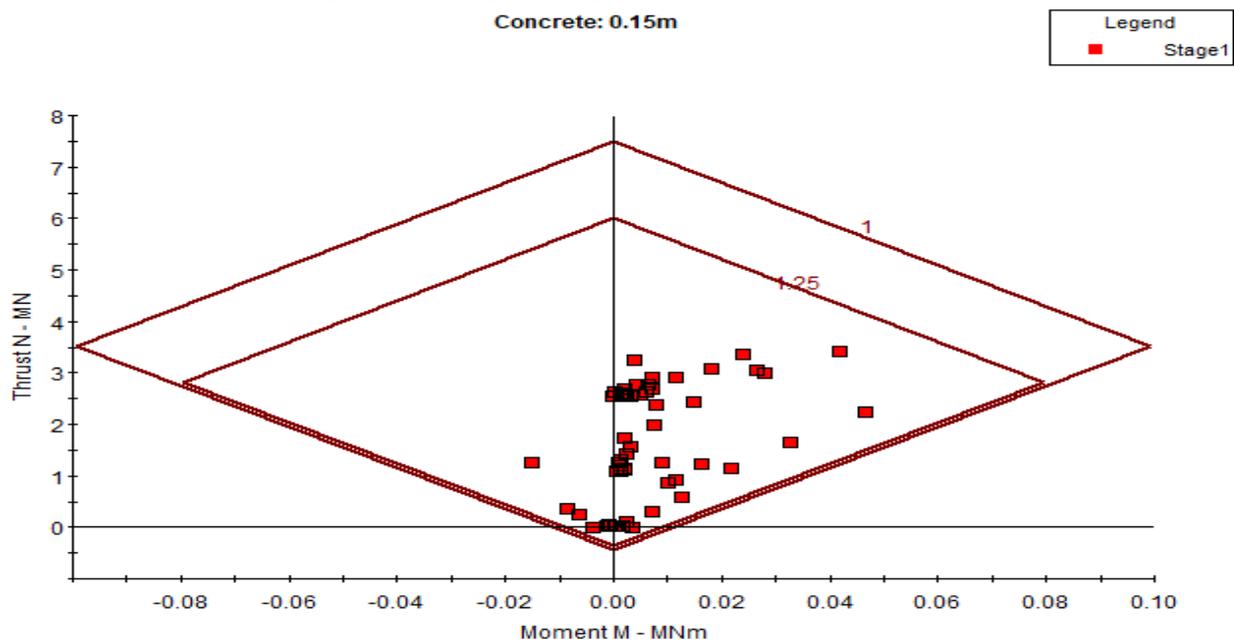
Nilai perpindahan total merupakan penjumlahan vektor dari perpindahan berarah vertikal dan perpindahan berarah horizontal yang keduanya sangat bergantung dari arah tegangan yang bekerja pada massa batuan. Hal tersebut akan sangat mencerminkan kemampuan dari sistem perkuatan aktif yang dipasang karena sistem perkuatan aktif akan secara langsung mempengaruhi nilai kekuatan dan tegangan dari batuan. Standar yang telah ditetapkan oleh PT Antam Pongkor adalah $\leq 6,5 \times 10^{-3}$ m untuk terowongan yang hanya dipasang perkuatan aktif atau tanpa perkuatan sama sekali, $\leq 6,66 \times 10^{-3}$ m untuk terowongan yang dipasang *H-Beam*, dan $\leq 9,6 \times 10^{-3}$ m untuk terowongan yang dipasang beton tembak.

Berikut adalah hasil analisis perpindahan total dan analisis kapasitas daya dukung berdasarkan saran perkuatan dari klasifikasi massa batuan Sistem-Q pada masing-masing

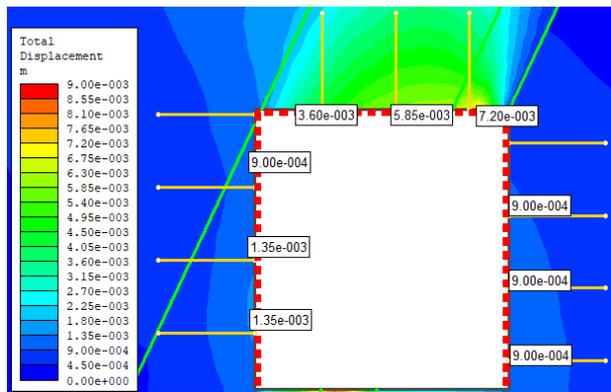
titik pengamatan:

(a) Pada tanggal 14 Januari 2020

Berdasarkan analisis diagram kapasitas daya dukung didapatkan hasil bahwa saran perkuatan pasif yang dipasang pada area hasil peledakan tanggal 14 Januari 2020 telah mampu menantisipasi keruntuhan yang berpotensi terjadi. Hal ini ditunjukkan melalui **Gambar 14** yang menunjukkan bahwa seluruh titik-titik keruntuhan berada di dalam batas nilai FK yang ditetapkan oleh PT Antam UBPE Pongkor yaitu 1,25. Sementara itu, berdasarkan analisis nilai perpindahan total (**Gambar 15**) didapatkan bahwa nilai perpindahan total maksimum pada atap terowongan adalah $7,2 \times 10^{-3}$ m dan pada dinding terowongan sebesar $1,4 \times 10^{-3}$. Nilai-nilai tersebut telah sesuai dengan standar PT Antam Pongkor terkait nilai perpindahan total maksimum untuk terowongan yang dipasang beton tembak yaitu $\leq 16,66 \times 10^{-3}$ m. Hal tersebut menunjukkan bahwa perkuatan aktif yang disarankan telah mampu menangani keruntuhan yang berpotensi terjadi.



Gambar 14. Analisis diagram kapasitas daya dukung setelah diberi perkuatan pada tanggal 14 Oktober 2020 menggunakan peranti lunak *Phase2 8.0*.

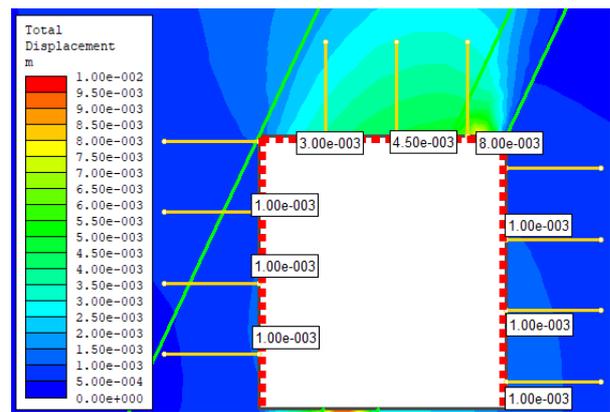


Gambar 15. Analisis perpindahan total (dalam m) setelah diberi perkuatan pada tanggal 14 Oktober 2020 menggunakan peranti lunak *Phase2 8.0*.

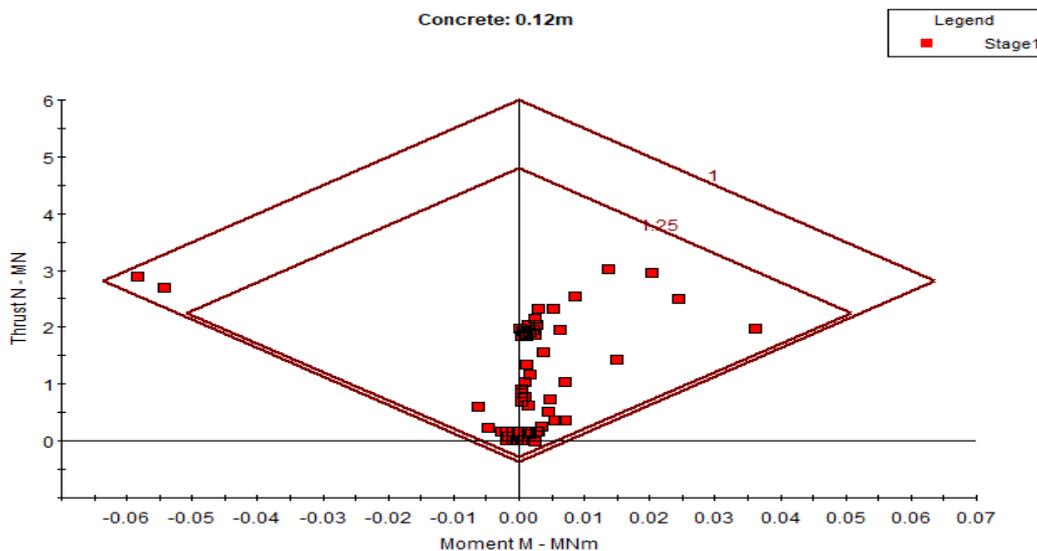
(b) Pada tanggal 21 Januari 2020

Berdasarkan analisis diagram kapasitas daya dukung didapatkan bahwa secara umum, titik-titik keruntuhan berada di dalam batas aman yang sudah ditetapkan yaitu 1,25 (**Gambar 16**). Adapun terlihat dua titik keruntuhan yang berada di luar batas $FK = 1,25$, namun apabila dianalisis lebih lanjut, titik keruntuhan tersebut belum melebihi bahkan berimpit batas kritis $FK = 1$. Hal tersebut menandakan bahwa keruntuhan masih dapat ditangani karena nilai FK -nya lebih dari satu dan sekalipun terjadi keruntuhan, memerlukan waktu yang cukup panjang dan pemicu yang cukup kuat (di luar faktor kegempaan dan beban *in-situ* yang sudah dimasukkan dalam model), sehingga untuk jenis penambangan *cut and fill* yang tidak memerlukan terowongan permanen dan

nantinya akan ditimbun lagi, hal tersebut masih dapat ditolerir. Sementara itu, berdasarkan analisis nilai perpindahan total (**Gambar 17**) didapatkan bahwa nilai perpindahan total maksimum pada atap terowongan adalah 8×10^{-3} m dan pada dinding terowongan sebesar 1×10^{-3} m. Nilai-nilai tersebut telah sesuai dengan standar PT Antam Pongkor terkait nilai perpindahan total maksimum untuk terowongan yang dipasang beton tembak yaitu $\leq 16,66 \times 10^{-3}$ m. Hal tersebut menunjukkan bahwa perkuatan aktif yang disarankan telah mampu menangani keruntuhan yang berpotensi terjadi.



Gambar 17. Analisis perpindahan total (dalam m) setelah diberi perkuatan pada tanggal 21 Oktober 2020 menggunakan peranti lunak *Phase2 8.0*.



Gambar 16. Analisis diagram kapasitas daya dukung setelah diberi perkuatan pada tanggal 21 Oktober 2020 menggunakan peranti lunak *Phase2 8.0*.

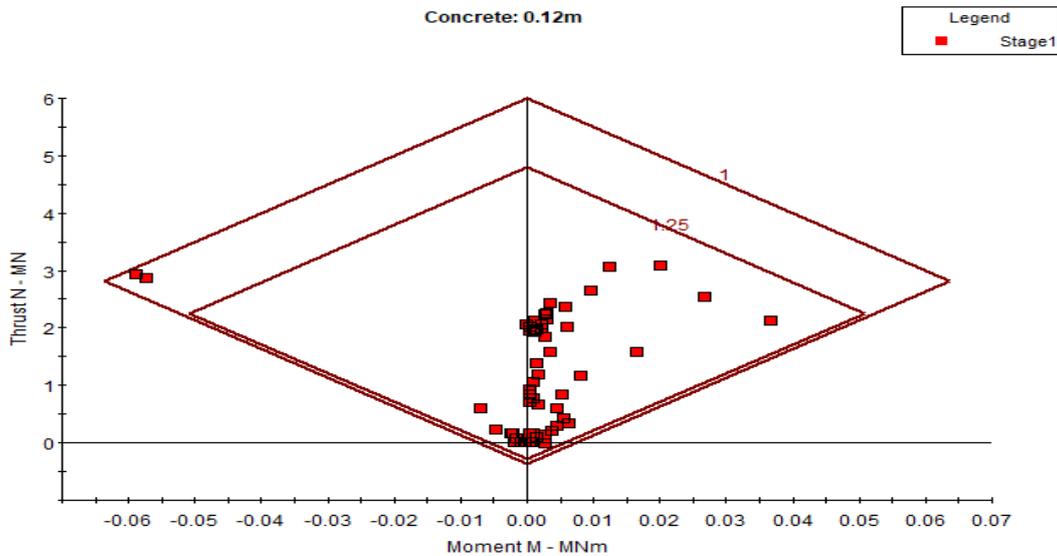
(c) Pada tanggal 21 Januari 2020

Berdasarkan analisis diagram kapasitas daya dukung didapatkan bahwa secara umum, titik-titik keruntuhan berada di dalam batas aman yang sudah ditetapkan yaitu 1,25 (**Gambar 18**). Adapun terlihat dua titik keruntuhan yang berada di luar batas $FK = 1,25$, namun apabila dianalisis lebih lanjut, titik keruntuhan tersebut belum melebihi batas kritis $FK = 1$.

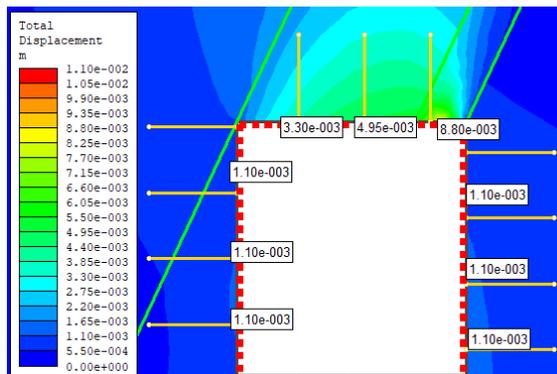
Hal tersebut menandakan bahwa keruntuhan masih dapat ditangani karena nilai FK -nya lebih dari satu dan sekalipun terjadi keruntuhan, memerlukan waktu yang cukup panjang dan pemicu yang cukup kuat (di luar faktor kegempaan dan beban *in-situ* yang sudah dimasukkan dalam model), sehingga

untuk jenis penambangan *cut and fill* yang tidak memerlukan terowongan permanen dan nantinya akan ditimbun lagi, hal tersebut masih dapat ditolerir.

Sementara itu, berdasarkan analisis nilai perpindahan total (**Gambar 19**) didapatkan bahwa nilai perpindahan total maksimum pada atap terowongan adalah 8×10^{-3} m dan pada dinding terowongan sebesar 1×10^{-3} m. Nilai-nilai tersebut telah sesuai dengan standar PT Antam Pongkor terkait nilai perpindahan total maksimum untuk terowongan yang dipasang beton tembak yaitu $\leq 16,66 \times 10^{-3}$ m. Hal tersebut menunjukkan bahwa perkuatan aktif yang disarankan telah mampu menangani keruntuhan yang berpotensi terjadi.



Gambar 18. Analisis diagram kapasitas daya dukung setelah diberi perkuatan pada tanggal 22 Oktober 2020 menggunakan peranti lunak *Phase2 8.0*.



Gambar 19. Analisis perpindahan total setelah diberi perkuatan pada tanggal 22 Oktober 2020 menggunakan peranti lunak *Phase2 8.0*.

4. DISKUSI

Perhitungan penilaian massa batuan pada lokasi KK 474 Konek menunjukkan kelas sangat buruk – terlampau buruk. Hal tersebut diakibatkan oleh melimpahnya bidang-bidang diskontinuitas yang memotong tegak lurus arah dari terowongan.

Diskontinuitas yang mendominasi daerah tersebut berupa kekar, urat kuarsa dan urat oksida mangan. Keberadaan diskontinuitas yang melimpah akan sangat menurunkan nilai-nilai properti keteknikan massa batuan, berupa nilai kekuatan massa batuan, kohesi, sudut

gesek dalam, dan modulus deformasi. Selain itu keberadaan zona lemah berupa urat oksida mangan yang tebal dan menerus akan memperburuk kondisi massa batuan dan dapat menyebabkan terjadinya keruntuhan pada terowongan.

Berdasarkan klasifikasi jenis runtuh pada terowongan milik PT Antam Pongkor yang dibuat oleh Pratama dkk., (2015), lokasi KK 474 Konek memiliki tipe keruntuhan massa batuan (*rockmass*). Tipe keruntuhan massa batuan terjadi pada massa batuan *very blocky*, ketika antarblok batuan dibatasi oleh bidang diskontinuitas yang melimpah. Pada umumnya bentuk runtuhnya berbentuk busur atau kubah. Ketika sudah runtuh, umumnya atap/dinding akan mencapai kestabilan (*stable arch*) dengan sendirinya, namun pada beberapa kasus masih terjadi runtuh batuan yang relatif kecil. Untuk mengakomodir tipe runtuh massa batuan digunakanlah aplikasi *Phase2 8.0* yang menggunakan analisis numerik metode elemen hingga (*finite element*) dan dilaksanakan dengan pertimbangan dapat berlaku pada **medium kontinu** serta dapat dilakukan pada skala besar, dan juga mengakomodir analisis dengan geometri yang bervariasi.

Hasil analisis *Phase2 8.0* menunjukkan bahwa pada terowongan KK 474 Konek yang belum diberi perkuatan memiliki geometri runtuh massa batuan yang signifikan yaitu sekitar 1,6 – 1,8 m, dan nilai perpindahan total terutama dibagian atap yang masih melebihi standar yang ditetapkan oleh PT Antam Pongkor, sehingga perlu dilakukan pemasangan perkuatan pada lokasi KK 474 Konek untuk mengatasi keruntuhan yang mungkin terjadi.

Penentuan saran perkuatan dilakukan dengan menggunakan tabel klasifikasi milik Grimstad (2007) dengan perhitungan nilai Sistem-Q rata-rata yang mempertimbangkan keberadaan zona lemah (**Persamaan 12**). Didapatkanlah bahwa saran perkuatan pada lokasi KK 474 Konek berupa beton tembak terkuatkan serat sebagai perkuatan pasifnya dan baut batuan sebagai perkuatan aktifnya.

Setelah dilakukan pemasangan perkuatan pada model, dilakukan uji kelayakan dari sistem perkuatan pasif melalui analisis diagram kapasitas daya dukung, dan sistem perkuatan aktif melalui analisis nilai perpindahan total. Dari hasil analisis menunjukkan bahwa baik perkuatan pasif maupun perkuatan pasif telah layak dan mampu untuk menangani keruntuhan yang mungkin terjadi pada terowongan KK 474 Konek.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan interpretasi yang telah dibahas sebelumnya, didapatkan kesimpulan, sebagai berikut:

- a) Berdasarkan klasifikasi Sistem-Q, massa batuan pada terowongan KK 474 Konek termasuk kedalam kategori sangat buruk – terlampau buruk.
- b) Jenis potensi keruntuhan yang mungkin terjadi pada terowongan KK 474 Konek adalah runtuh bertipe massa batuan.
- c) Berdasarkan klasifikasi massa batuan sistem-Q, perkuatan yang disarankan pada terowongan KK 474 Konek berupa beton tembak terkuatkan serat dengan tebal 9 – 12 sm dan baut batuan dengan jarak antarbaut 1,2 – 1,5 m.
- d) Hasil analisis diagram kapasitas daya dukung yang merepresentasikan kemampuan komponen perkuatan pasif menunjukkan bahwa seluruh titik-titik keruntuhan pada terowongan KK 474 Konek telah mampu ditangani.
- e) Hasil analisis nilai perpindahan total yang merepresentasikan kemampuan komponen perkuatan aktif menunjukkan bahwa nilai perpindahan total maksimum pada atap dan dinding terowongan KK 474 Konek telah memenuhi standar PT Antam Pongkor.
- f) Berdasarkan analisis diagram kapasitas daya dukung dan nilai perpindahan total, saran perkuatan berdasarkan klasifikasi Sistem-Q layak dan cocok untuk diterapkan pada terowongan KK 474 Konek.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada PT Antam UBPE Pongkor atas kesempatannya untuk melakukan penelitian di Terowongan Kubang Cicau 474 Konek. Tak lupa juga penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Riyan Pratama selaku manajer Departemen Geoteknik dan QC PT Antam UBPE Pongkor atas bimbingannya selama melakukan pengambilan data lapangan dan saat melakukan analisis kestabilan terowongan.

DAFTAR PUSTAKA

- Barton, N. (2002): Some new Q value correlations to assist in site characterization and tunnel design, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **39**, 2: 185-216.
- Barton, N., & Grimstad, E. (2014): Forty years with the Q-system in Norway and abroad. *Fjellsprengnings, Bergmekanikkdagen, and Geoteknikdagen*, Oslo, Norway, **27**, 28.
- Barton, N., Lien, R. dan Lunde, J. (1974): Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, **6**, 4: 189-236.
- Bhasin, R., Singh, R. B., Dhawan, A. K., & Sharma, V. M. (1995): Geotechnical evaluation and a review of remedial measures in limiting deformations in distressed zones in a powerhouse cavern, *Conference on Design and Construction of Underground Structures, New Delhi, India*, 142 – 152.
- Bieniawski, Z. T. (1989): *Engineering Rock Mass Classification: A Complete Manual for Engineers and Geologist in Mining, Civil and Petroleum Engineering*, Wiley Interscience Publications, Canada, 251 halaman.
- Grimstad, E. (2007): The Norwegian method of tunnelling – a challenge for support design, *XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid*.
- Fisher, R.V., and Schmincke H.-U. (1984): *Pyroclastic Rocks. 1st ed. Springer-Verlag*. New York.
- Hoek, E. (2007): *Practical Rock Engineering*, University of Toronto, Canada, 341 halaman.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997): Practical estimates of rock mass strength, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **34**, 8: 1165–1186.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. T., dan Corkum, B. (2002): Hoek-Brown failure criterion-2002 edition, *Proceedings of the fifth North American rock mechanics symposium, Toronto, Canada*, **1**, 267-273.
- Hoek, E., Kaiser P. K. dan Bawden W. F. (1995): *Support of underground excavations in hard rock*, Rotterdam, Balkema, 225 halaman.
- Hudson, J. A. dan Harrison, J. P. (1997): *Engineering Rock Mechanics: An Introduction to The Principles*, Elsevier, Oxford, 444 halaman.
- Pratama, R., Nur, T. dan Rasyid, E. (2015): Desain penyanggaan berdasarkan pola runtuh di Tambang Bawah Tanah UBPE Pongkor, *Workshop dan Seminar Nasional Geomekanika II, Bandung, Indonesia*.
- Peta Citra Satelit Jawa Barat, Google Earth 2020. Diperoleh melalui situs internet Google Maps: <https://earth.google.com/web> diunduh pada 20 September 2020 pukul 19.00 WIB.
- Sastry, V. R., Chandar, K. R., Madhumitha, S., & Sruthy, T. G. (2015): Tunnel Stability under Different Conditions: Analysis by Numerical and Empirical Modeling, *International Journal of Geological and Geotechnical Engineering*, 1(2), 1-13.
- Turchaninov, I. A., Iofis, M. A., & Kasparyan, E. V. (1979). *Principles of rock mechanics*. Terraspace, Rockville, 493 Halaman.
- Wang, Y. F., Zhu, H. H., & Zheng, Y. R. (2014): Stability Analysis and Failure Mechanisms of Jointed Rock Tunnel. *In Tunneling and Underground Construction*, 106-115.