

ANALISIS KESTABILAN TEROWONGAN MENGUNAKAN KLASIFIKASI MASSA BATUAN SISTEM-Q DAN METODE ELEMEN HINGGA PADA BUKAAN TEROWONGAN TAMBANG KUBANG CICAU 536 MILIK PT ANTAM UBPE PONGKOR

STABILITY ANALYSIS OF MINING TUNNEL USING ROCK MASS CLASSIFICATION Q-SYSTEM AND FINITE ELEMENT METHOD ON KUBANG CICAU 536 TUNNEL IN PT ANTAM UBPE PONGKOR,

Tedi Cahya Nusantara, Imam Achmad Sadisun and Firdaus El Afghani*

Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung

**Email: firdauselafghani@students.itb.ac.id*

Abstract

PT Antam's main gold and silver production comes from the Pongkor gold mine area, West Java. The mining method used by PT Antam Pongkor is an underground mining method (cut and fill). The research was conducted in the Kubang Cicau mine area, precisely at the opening of the Kubang Cicau tunnel 536. The research was conducted to determine the value of the Q-System classification. The Q-System value is used to determine reinforcement suggestions for tunnels. Evaluation of tunnel stability and numerical analysis is carried out based on the type of potential collapse. Numerical analysis was performed using the finite element method of the safety factor parameter. In field observations, it was found that the lithology that makes up Kubang Cicau 536 consists of tuff lapilli. The Q-System rock mass classification shows a bad rock mass category. The rock mass parameters indicate that the type of collapse that has the potential to occur is a wedge type. Based on the rock mass class in the Q-System classification, reinforcement suggestions are produced in the form of rock bolts with a distance of 1.3 – 1.6 m which are installed systematically. The results of numerical analysis and evaluation of the application of reinforcement based on the Q-System value, indicate that the value of the safety factor has a range between 1.686 – 6.137. The safety factor value exceeds the minimum standard of safety factor value set by PT Antam Pongkor. Based on the evaluation results, it was concluded that the reinforcement suggestions based on the Q-System rock mass classification could be applied to the Kubang Cicau 536 tunnel opening.

Keywords: *type of collapse, tunnel stability, finite element method, Q-system.*

Abstrak

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*). Penelitian dilakukan pada area tambang Kubang Cicau tepatnya pada bukaan terowongan Kubang Cicau 536. Penelitian dilakukan bertujuan untuk menentukan nilai klasifikasi Sistem-Q. Nilai Sistem-Q digunakan untuk penentuan saran perkuatan pada terowongan. Evaluasi kestabilan terowongan dan analisis numerik dilakukan berdasarkan jenis potensi runtuh. Analisis numerik dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga terhadap parameter faktor keamanan. Pada pengamatan lapangan, didapatkan litologi penyusun Kubang Cicau 536 terdiri dari tuf lapili. Klasifikasi massa batuan Sistem-Q menunjukkan kategori massa batuan buruk. Parameter-parameter massa batuan menunjukkan bahwa runtuh yang berpotensi terjadi adalah runtuh bertipe baji. Berdasarkan kelas massa batuan pada klasifikasi Sistem-Q dihasilkan saran perkuatan berupa baut batuan dengan jarak 1,3 – 1,6 m yang dipasang secara sistematis. Hasil analisis numerik dan evaluasi penerapan perkuatan berdasarkan nilai Sistem-Q, menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan memiliki rentang antara 1,686 – 6,137. Nilai faktor keamanan tersebut melebihi standar minimum nilai faktor keamanan yang telah ditetapkan oleh PT Antam Pongkor. Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, disimpulkan bahwa saran perkuatan berdasarkan klasifikasi massa batuan Sistem-Q dapat diterapkan pada bukaan terowongan Kubang Cicau 536.

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

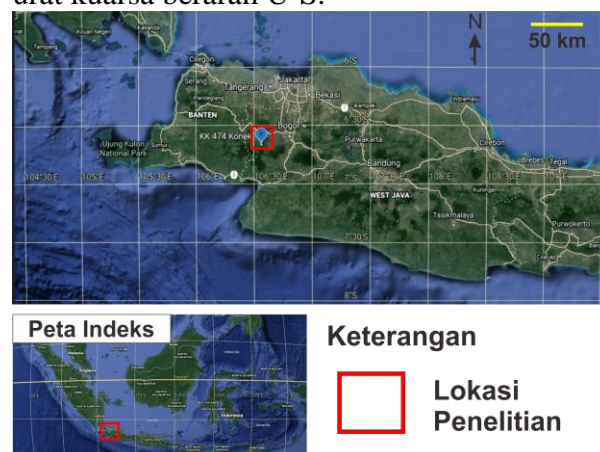
PENDAHULUAN

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 dapat digunakan sebagai penentu jenis perkuatan pada daerah pertambangan agar tidak terjadi permasalahan yang serius terkait keselamatan di dalam dunia kerja. Variasi dan heterogenitas geologi di lapangan merupakan salah satu tantangan dalam pembuatan suatu desain terowongan tambang, termasuk dengan kondisi yang akan dihadapi di jalur rencana terowongan. Penggunaan klasifikasi massa batuan dapat menjadi solusi dalam mengelompokkan sifat massa batuan berdasarkan 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 ini bertujuan untuk menentukan saran perkuatan pada terowongan tambang Kubang Cicau (KK) 536 berdasarkan klasifikasi massa batuan Sistem-Q dan metode elemen hingga. Penelitian dilakukan pada bukaan terowongan tambang Kubang Cicau 536 (lebar 4,5 m x tinggi 5 m) yang merupakan terowongan produksi milik PT Antam UBPE Pongkor di Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat dengan koordinat $6^{\circ}39'50''$ S, $106^{\circ}33'58''$ 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 Terowongan Kubang Cicau 536.

GEOLOGI DAERAH PENELITIAN

Pengendapan emas & perak Gunung Pongkor di Jawa Barat berasosiasi dengan urat kuarsa yang terbentuk pada lingkungan epitermal sulfidasi rendah, terkait dengan vulkanisme kalk-alkali Neogen (Basuki dkk., 1994). Litologi pada daerah penelitian terdiri dari tuf lapili (Formasi Cimapag). Struktur yang terdapat disekitar daerah penelitian berupa sesar normal berarah U-S dan juga urat kuarsa berarah U-S.



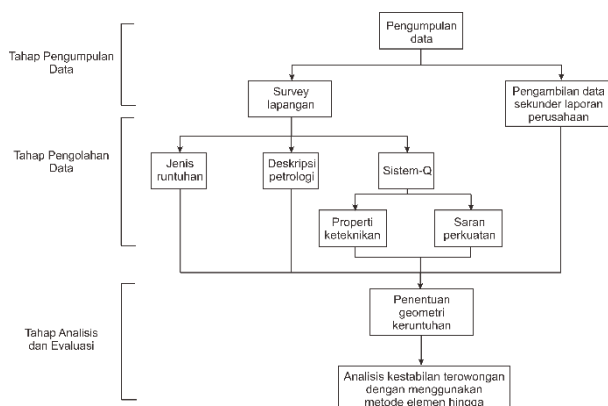
Gambar 1. Lokasi terowongan tambang Kubang Cicau 536 di Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat.

METODE

Pengambilan data dilakukan pada tanggal 7-17 Januari 2020. Data yang digunakan dalam analisis kestabilan terowongan Kubang Cicau 536 meliputi data primer dan data sekunder. Data primer terdiri dari tiga data pengamatan massa batuan, tiga data geometri terowongan, sepuluh sampel batuan, dan 219 data struktur (kekar). Data sekunder terdiri dari data kedalaman terowongan, properti mekanik material penyangga, data uji laboratorium (*Point Load Index* (PLI) & γ), dan data sejarah kegagalan pada terowongan.

Metode penelitian dapat dibagi menjadi beberapa tahap yaitu tahap pengambilan data, tahap pengolahan data, dan tahap analisis dan evaluasi (Gambar 2). Pengambilan data dilakukan pada muka terowongan (*face*) setiap kali dilakukan peledakkan. Pada penelitian kali ini dilakukan pengambilan data sebanyak tiga kali menyesuaikan dengan

waktu peledakkan (*blasting*) yang dilakukan oleh PT Antam Pongkor, yaitu pada tanggal 7 Januari 2020 (KK 536 (7/01)), 14 Januari 2020 (KK 536 (14/01)), dan 17 Januari 2020 (KK 536 (17/01)).



Gambar 2. Diagram alir penelitian.

Data sekunder berupa parameter data nilai kuat tekan setiap perkuatan yang diterapkan, nilai massa jenis batuan, dan kedalaman terowongan diukur dari permukaan data hasil uji laboratorium properti fisik dan mekanik dari material penyangga, serta sejarah kegagalan perkuatan pada daerah penelitian. Pengolahan data terdiri dari penentuan jenis runtuh berdasarkan parameter massa batuan dan diawali dengan perhitungan nilai klasifikasi massa batuan berdasarkan Sistem-Q. Penentuan nilai Q dilakukan menggunakan rumus pada Persamaan (1).

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

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) selanjutnya dilakukan sebagai salah satu parameter masukan untuk menentukan nilai properti keteknikan massa batuan.

$$GSI = 9 \ln Q' + 44 \quad (2)$$

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

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 perkuatan pada terowongan. Sementara Klasifikasi GSI digunakan untuk menentukan nilai properti keteknikan massa batuan menggunakan bantuan aplikasi *Rocklab 1.0*. 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):

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

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 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).

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

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 telah membuat persamaan empiris Persamaan (6) sebagai berikut:

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

Keterangan:

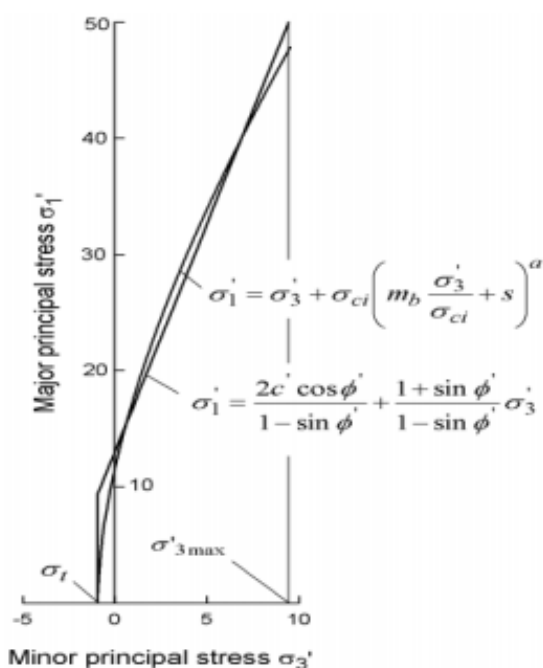
- σ_t : kuat tarik massa batuan (MPa)
- s : konstanta sesuai karakteristik suatu massa batuan
- m_b : konstanta Hoek-Brown massa batuan

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 (7-9). Hal tersebut dilakukan untuk menentukan pendekatan kriteria Mohr-Coulomb dari Hoek-Brown pada massa batuan (Gambar 5).

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

Keterangan:

- σ'_{3max} : batas maksimal dari tegangan tertekan 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. *Sumber (Hoek dkk., 2002: 3)*

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.

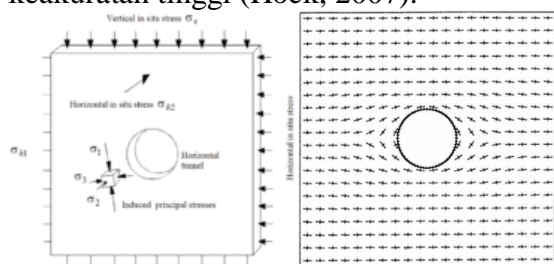
$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(sm_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (8)$$

$$c' = \frac{\sigma'_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}] (s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + (6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}) / ((1+a)(2+a))}} \quad (9)$$

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

Selain properti keteknikan massa batuan hal yang tidak kalah pentingnya dalam analisis kestabilan terowongan adalah tegangan *in-situ*. Kondisi batuan yang belum dilakukan ekskavasi akan memiliki nilai tegangan pada arah-arah tertentu yang umumnya dimodelkan dalam tiga arah sebagai sigma 1 (σ₁), sigma 2 (σ₂), dan sigma 3 (σ₃) (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. Sumber (Hoek dkk., 2001: 9-10)

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

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad (10)$$

$$\sigma_h = k \cdot \sigma_v = \gamma \cdot z \quad (11)$$

dengan,

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

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

Dalam mencari panjang baut batuan untuk saran perkuatan yang merupakan fungsi dari diameter terowongan, digunakan perumusan menurut Barton dkk. (1974) yang menggunakan data masukan berupa ESR dan diameter terowongan (Persamaan 13).

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

Keterangan:

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

Analisis Elemen Hingga

Runtuhan baji dikontrol oleh keberadaan bidang-bidang lemah seperti *joints*, *discontinuity*, *fracture*, dan sebagainya. Menurut Hoek dkk. (1995), baji akan terbentuk jika terdapat tiga bidang diskontinu yang saling bertemu. Runtuhan baji pada umumnya berbentuk blok prisma segitiga ataupun limas segitiga akibat pertemuan tiga bidang diskontinu. Saat blok batuan tersebut sudah jatuh, maka atap atau dinding akan mencapai kestabilan (tidak ada runtuh susulan). Untuk membantu melakukan analisis geometri baji dan faktor kekuatan digunakan peranti lunak *Unwedge 3.0*.

Analisis geometri baji

Orientasi tiga bidang diskontinu yang berbeda harus selalu ditentukan untuk analisis *Unwedge*. Menggunakan teori blok "*block theory*", *Unwedge* menentukan semua kemungkinan baji yang dapat dibentuk oleh perpotongan dari tiga bidang diskontinu dan penggalan. Secara umum, irisan yang terbentuk bersifat tetrahedral (misalnya tiga bidang diskontinu membentuk tiga sisi tetrahedral, dan "sisi" keempat dibentuk oleh arah penggalan). Namun, potongan prismatic juga dapat dibentuk ketika dua bidang diskontinu memiliki jurus menuju arah yang sama, sehingga irisan yang dihasilkan adalah bentuk prismatic, bukan

tetrahedral. Ketika koordinat irisan telah ditentukan, sifat geometris dari setiap irisan dapat dihitung, termasuk: volume baji, luas permukaan baji, dan vektor normal untuk setiap bidang irisan. Selanjutnya, analisis faktor keamanan dilakukan menggunakan aplikasi *Unwedge 3.0* menghitung tiga faktor keamanan secara terpisah terpisah, sebagai berikut:

Faktor Keamanan Jatuhnya Baji

Faktor keamanan jatuhnya baji diasumsikan bahwa hanya penyangga pasif dan kuat tarik yang bertindak sebagai penahan gerakan. Arah jatuh dihitung dari arah vektor gaya aktif (Persamaan 14).

$$F_f = \frac{-P \cdot \hat{S}_0 + \sum_{i=1}^3 T_i}{A \cdot \hat{S}_0} \quad (14)$$

Keterangan

- F_f** : Faktor keamanan jatuhnya baji
- P** : Resultan vektor gaya pasif
- \hat{S}_0** : Arah keruntuhan
- T_i** : Besarnya gaya penahan karena kekuatan tarik kekar i
- A** : Resultan vektor gaya aktif

Faktor Keamanan Tanpa Penyangga

Faktor keamanan tanpa penyangga mengasumsikan bahwa kuat geser dan kuat tarik bertindak sebagai gaya penahan (tidak ada kekuatan dukungan pasif yang digunakan). Gaya normal dari vektor gaya pasif tidak diperhitungkan (Persamaan 15).

$$F_u = \frac{\sum_{i=1}^3 (J_i^u + T_i)}{A \cdot \hat{S}} \quad (15)$$

Keterangan

- F_u** : Faktor keamanan tanpa penyangga
- J_{i^u}** : Besarnya gaya penahan karena kekuatan geser kekar i tanpa penyangga
- T_i** : Besarnya gaya penahan karena kekuatan tarik kekar i
- A** : Resultan vektor gaya aktif
- \hat{S}** : Arah luncuran (*sliding direction*)

Faktor Keamanan Menggunakan Penyangga

Faktor keamanan menggunakan penyangga mengasumsikan bahwa gaya dukungan pasif, gaya geser, dan kuat tarik bertindak untuk menahan pergerakan blok. Kekuatan pendorong disebabkan oleh gaya

aktif pada baji. Kekuatan geser dihitung berdasarkan gaya normal yang dihitung dari vektor gaya aktif ditambah vektor gaya pasif (Persamaan 16).

$$F_s = \frac{-P \cdot \hat{S} + \sum_{i=1}^3 (J_i^s + T_i)}{A \cdot \hat{S}} \quad (16)$$

Keterangan

- F_s** : Faktor keamanan menggunakan kekuatan
- P** : Resultan vektor gaya pasif
- \hat{S}** : Arah luncuran (*sliding direction*)
- J_{i^s}** : Besarnya gaya penahan karena kekuatan geser kekar i menggunakan penyangga
- T_i** : Besarnya gaya penahan karena kekuatan tarik kekar i
- A** : Resultan vektor gaya aktif

Faktor keamanan yang diambil adalah maksimum dari ketiga faktor keamanan di atas (Persamaan 17). Penyangga diasumsikan tidak pernah mengurangi faktor keamanan dari nilai FK tanpa penyangga. Persamaan didasarkan pada tiga bidang diskontinu yang membentuk irisan tetrahedral. Perhitungan faktor keamanan limit ekuilibrium hanya mempertimbangkan kesetimbangan gaya dalam arah geser. Kesetimbangan momen tidak dipertimbangkan.

$$F = \max (F_f, F_u, F_s) \quad (17)$$

Keterangan

- F** : Faktor keamanan maksimum
- F_f** : Faktor keamanan jatuhnya baji
- F_u** : Faktor keamanan tanpa penyangga
- F_s** : Faktor keamanan menggunakan kekuatan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Geologi Terowongan Kubang Cicau 536

Terowongan Kubang Cicau 536 (Gambar 5) tersusun atas litologi tuf lapili berwarna abu-abu kecoklatan, sedikit terlapukan dan terkekarkan sedang, ditemukan urat kuarsa (pada gambar terlihat berwarna putih) dan urat *manganese* (pada gambar terlihat berwarna hitam). Tuf lapili (berdasarkan Fisher, 1966), berwarna abu-abu kecoklatan, sedikit terlapukan dan terkekarkan sedang,

ukuran butir <2 – 6 mm, sortasi sedang, permeabilitas baik, menyudut-menyudut tanggung, *low sphericity*, fragmen terdiri dari lapili (30% tersusun atas litik mafik, klorit, piroksen, *illite* hasil ubahan plagioklas) dan abu vulkanik (70% dengan 50% terubah telah menjadi *smectite* dan *illite*).



Gambar 5. Kondisi massa batuan Terowongan Kubang Cicau 536.

Perhitungan Sistem-Q

Sistem klasifikasi massa batuan Sistem-Q (1974) didasarkan pada enam parameter diskontinuitas, yaitu *Rock Quality*

(Jw), dan *Stress Reduction Factor* (SRF). Perhitungan nilai Q terdapat pada Tabel 2.

Analisis Properti Mekanik Massa Batuan

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. 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, diolah menggunakan perangkat lunak *Rocdata 4.0*, dilakukan pencocokan kurva (*curve fitting* dari kurva *Generalized Hoek-Brown* yang didekati

Tabel 2. Perhitungan nilai sistem Q (Keterangan RQD: *Rock Quality Designation*, Jn: *Joint set number*, Jr: *Joint roughness number*, Ja: *Joint alteration number*, Jw: *Joint water reduction*, SRF: *Stress Reduction Factor*).

Tanggal	RQD (%)	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Nilai Q	Kelas
7 Januari 2020	52,49 - 55,78	Tiga set + acak	Kasar, bergelombang	Dilapisi lempung pasir dengan gesekan rendah (<i>non-softening</i>)	Aliran airtanah memiliki tekanan rendah dengan kondisi kering – lembap	Zona lemah tunggal yang mengandung lempung atau batuan yang terurai secara kimiawi (kedalaman galian >50 m)	1,86	Buruk
14 Januari 2020	52,49 - 55,79	Tiga set + acak	Kasar, bergelombang	Dilapisi lempung pasir dengan gesekan rendah (<i>non-softening</i>)	Aliran airtanah memiliki tekanan rendah dengan kondisi kering – lembap	Zona lemah tunggal yang mengandung lempung atau batuan yang terurai secara kimiawi (kedalaman galian >50 m)	1,75	Buruk
17 Januari 2020	52,49 - 55,80	Tiga set + acak	Kasar, bergelombang	Dilapisi lempung pasir dengan gesekan rendah (<i>non-softening</i>)	Aliran airtanah memiliki tekanan rendah dengan kondisi kering – lembap	Zona lemah tunggal yang mengandung lempung atau batuan yang terurai secara kimiawi (kedalaman galian >50 m)	1,75	Buruk

Designation (RQD), *joint set number* (Jn), *joint roughness number* (Jr), *joint alteration number* (Ja), *joint water reduction number*

dengan kurva Mohr-Coulomb). 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.

Terowongan KK 536 terletak pada elevasi 536 mdpl dan terletak pada kedalaman 181 m. Kemajuan Terowongan KK 536 setiap kali peledakan adalah 2,4 m. Dalam penelitian kali ini dilakukan tiga kali analisis secara berturut-turut mengikuti jadwal peledakan yaitu pada tanggal 7, 14, dan 17 Januari 2020. 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 Sistem-Q (Tabel 2).

Penentuan Nilai Tegangan *In-situ* pada Terowongan

Pada desain suatu terowongan, faktor-faktor pembebanan (*loading*) menjadi faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam analisis perkuatan dan kestabilan terowongan. Sumber beban utama yang dipertimbangkan dalam analisis perkuatan dan kestabilan terowongan adalah faktor tegangan *in-situ*. 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. 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 konstanta (k) yang merupakan faktor nisbah *Poisson* dari material massa batuan. Besar tegangan vertikal dan horizontal dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Tegangan *in-situ* pada terowongan KK 536.

Lokasi	γ (Ton/m ³)	z (m)	k	σ_v (Ton/m ²)	σ_h (Ton/m ²)
KK 536 (7/01)	2,5	181	0,3	452,5	150,8
KK 536 (14/01)	2,5	181	0,3	452,5	150,8
KK 536 (17/01)	2,5	181	0,3	452,5	150,8

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 RMR_{basic} yaitu nilai RMR yang tidak menggunakan koreksi arah penerowongan terhadap orientasi dari diskontinuitas. Berdasarkan hasil analisis dapat diketahui bahwa lokasi KK 536 memiliki tipe keruntuhan baji (Tabel 4).

Tabel 4. Jenis keruntuhan pada terowongan KK 536 (berdasarkan Pratama dkk.,2015).

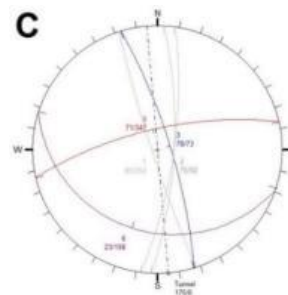
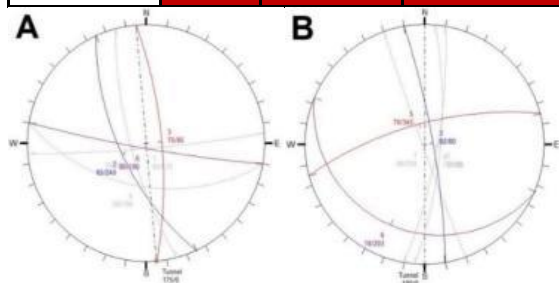
Lokasi	UCS	RQD	JS	JF	GW	RMR _{basic}	Jenis Keruntuhan
KK 536 (7/01)	7	13	8	18	10	56	Baji
KK 536 (14/01)	7	13	8	16	10	54	Baji
KK 536 (17/01)	7	13	10	14	10	54	Baji

Analisis Kestabilan Terowongan tanpa Perkuatan

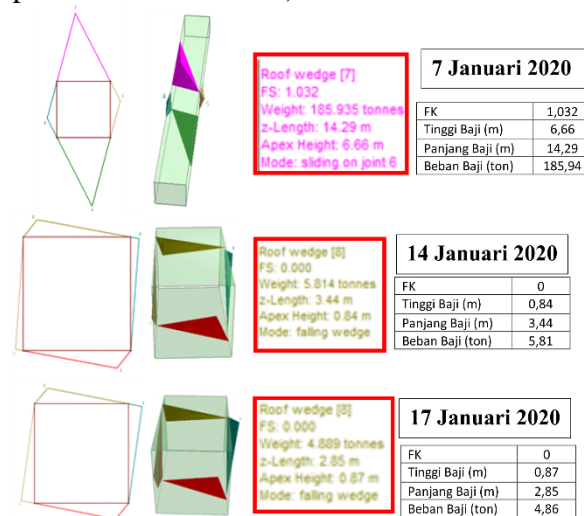
Kemajuan Terowongan KK 536 setiap kali peledakan adalah 2,4 m. Dalam penelitian kali ini, dilakukan tiga kali analisis secara berturut-turut mengikuti jadwal peledakan yaitu pada tanggal 7, 14, dan 17 Januari 2020. Terowongan mengarah ke N175°E, dengan penunjaman sebesar 0°, berat jenis 2,5 ton/m³ dan orientasi kekar dapat terlihat pada Gambar 5. Berdasarkan data tersebut kemudian dilakukan pemodelan menggunakan peranti lunak *Unwedge 3.0* (Gambar 6), sehingga didapatkan geometri baji dan nilai FK (Tabel 5). Berdasarkan hasil pemodelan, dapat dilihat pada Tabel 6 bahwa nilai FK yang didapatkan masih menunjukkan nilai yang kurang dari 1,25 (standar PT Antam UBPE Pongkor untuk terowongan *stope* produksi) sehingga diperlukan perkuatan pada lokasi KK 536.

Tabel 5. Data geometri baji pada lokasi KK 536 sebelum diberi perkuatan berdasarkan pemodelan *Unwedge 3.0*.

Lokasi	Panjang Baji (m)	Tinggi Baji (m)	Beban Baji (Ton)
KK 536 (7/01)	14,3	6,7	185,9
KK 536 (14/01)	3,4	0,8	5,8
KK 536 (17/01)	2,9	0,9	4,9



Gambar 5. Orientasi diskontinuitas pada terowongan KK 536 (Keterangan A: pada 7 Januari 2020, B: pada 14 Januari 2020, C: pada 17 Januari 2020).



Gambar 6. Analisis keruntuhan baji menggunakan *Unwedge 3.0* pada terowongan KK 536 sebelum diberi perkuatan.

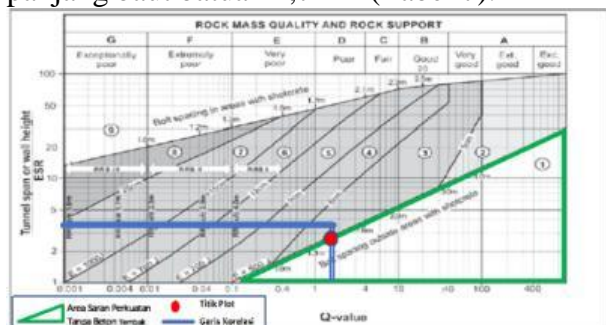
Tabel 6. Data nilai FK pada lokasi KK 536 sebelum diberi perkuatan, berdasarkan pemodelan *Unwedge 3.0*.

Lokasi	FK
KK 536 (7/01)	1,03
KK 536 (14/01)	0
KK 536 (17/01)	0

Saran Desain Perkuatan

Lokasi KK 536 memiliki kemajuan setiap kali peledakan sebesar 2,4 m. Dalam penelitian kali ini, dilakukan 3 kali analisis secara berturut-turut mengikuti jadwal peledakan yaitu pada tanggal 7, 14, dan 17 Januari 2020. Dari ketiga kali penelitian tersebut menghasilkan nilai Sistem-Q secara berurutan 1,86, 1,75, dan 1,75, yang termasuk dalam kelas buruk (*poor*).

Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan, didapatkan *span* dari terowongan adalah 5,2 m. Saran perkuatan berdasarkan Sistem-Q berupa perkuatan aktif. Saran berupa perkuatan pasif tidak dilakukan karena terowongan memiliki dimensi yang cukup kecil sehingga tidak memungkinkan untuk masuknya mesin *shortcret* (*concrete spraying machine*) dan juga PT Antam hanya memiliki mesin *shortcret* yang ditempatkan pada area tambang Ciurug sehingga jauh dari lokasi penelitian. Apabila saran perkuatan yang digunakan hanya perkuatan aktif saja, maka plot diagram klasifikasi yang dibuat oleh Grimstad (2007) mengenai perkuatan terowongan berdasarkan Sistem-Q dilakukan pada area segitiga dibagian bawah diagram, yaitu perkuatan tanpa dipasang beton tembak (Gambar 7). Setelah dilakukan plot diagram, didapatkan bahwa perkuatan yang disarankan untuk terowongan KK 536 adalah pemasangan baut batuan secara sistematis dengan jarak antar masing-masing baut batumannya adalah 1,3 – 1,6 m, dengan panjang baut batuan 1,74 m (Tabel 7).



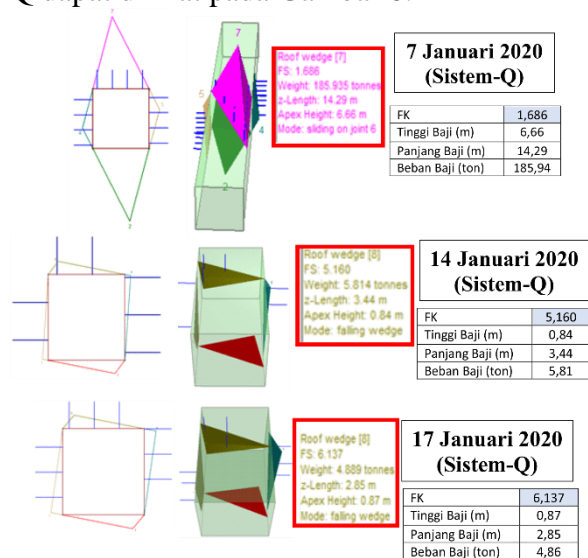
Gambar 7. Hasil plot saran perkuatan klasifikasi Sistem-Q pada lokasi KK 536. Sumber (Grimstad, 2007: 5).

Tabel 7. Ringkasan saran perkuatan menurut klasifikasi Sistem-Q pada lokasi KK 536.

Lokasi	Saran Perkuatan	Panjang Rockbolt (m)
KK 536 (7/01)	Systematic Bolting (Spacing 1,3-1,6 m)	1,74
KK 536 (14/01)	Systematic Bolting (Spacing 1,3-1,6 m)	1,74
KK 536 (17/01)	Systematic Bolting (Spacing 1,3-1,6 m)	1,74

Analisis Kestabilan Terowongan Setelah Diberi Perkuatan

Lokasi KK 536 memiliki kemajuan setiap kali peledakan sebesar 2,4 m. Dalam penelitian kali ini, dilakukan 3 kali analisis secara berturut-turut mengikuti jadwal peledakan yaitu pada tanggal 7, 14, dan 17 Januari 2020. Berdasarkan saran perkuatan yang ada, didapatkan hasil bahwa dari keseluruhan saran perkuatan yang diterapkan pada model telah menunjukkan nilai FK $\geq 1,25$ (Tabel 8), artinya keseluruhan perkuatan yang disarankan telah mampu mencapai standar yang ditetapkan oleh PT Antam UBPE Pongkor. Untuk pemodelan terowongan dengan menggunakan bantuan peranti lunak *Unwedge 3.0* pada lokasi KK 536 berdasarkan saran perkuatan dari Sistem-Q dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Analisis keruntuhan baji menggunakan *Unwedge 3.0* pada terowongan KK 536 setelah diberi perkuatan.

Tabel 8. Ringkasan hasil analisis FK pada lokasi KK 536.

Lokasi	Jenis Keruntuhan	Tinggi Baji (m)	Beban Runtuhan (ton)	FK Berdasarkan Saran Perkuatan Sistem-Q
KK 536 (7/01)	Baji	6,6	185,9	1,686
KK 536 (14/01)	Baji	0,8	5,8	5,16
KK 536 (17/01)	Baji	0,9	4,9	6,137

Keterangan:

Terowongan sudah aman, nilai FK telah melebihi 1,25 (standar minimum FK yang ditetapkan PT Antam Pongkor).

KESIMPULAN

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

- a) Berdasarkan klasifikasi Sistem-Q, massa batuan pada terowongan KK 536 termasuk kedalam kategori buruk.
- b) Jenis potensi keruntuhan yang mungkin terjadi pada terowongan KK 536 adalah runtuh baji.

Berdasarkan klasifikasi massa batuan sistem-Q, perkuatan yang disarankan pada terowongan KK 536 berupa jaring kawat dan baut batuan.

Secara umum, saran perkuatan berdasarkan klasifikasi sistem-Q telah mampu menangani keruntuhan bahkan dari segi faktor keamanan telah jauh melebihi standar yang diberikan oleh PT Antam sebesar 1,25. Namun untuk mengurangi biaya pengeluaran, jarak antar baut batuan yang dipasang dapat diperbesar sedemikian rupa sehingga jumlah baut yang dipasang lebih sedikit dengan catatan nilai FK tidak boleh kurang dari 1,25. Semakin mendekati nilai $FK \geq 1,25$ tentu akan semakin memperkecil biaya (*cost*) karena baut batuan yang dipasang lebih sedikit namun terowongan akan tetap aman. Terowongan yang menggunakan metode penambangan *cut and fill* tidak memerlukan terowongan yang permanen sehingga tidak diperlukan nilai faktor keamanan yang besar.

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., Lien, R. dan Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6, 4: 189-236.

Brady, B. H. G. dan Brown, E. T. (2004). *Rock mechanics for underground mining*. USA: Springer.

Basuki, A., Sumanagara, D. A. dan Sinambela, D. (1994). The Gunung Pongkor gold-silver deposit, West Java, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 50, 371-391.

Hoek, E. (2007). *Practical Rock Engineering*. Canada: University of Toronto.

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.

Hudson, J. A. dan Harrison, J. P. (1997). *Engineering Rock Mechanics: An Introduction to The Principle*. Oxford: Elsevier.

Hoek, E., Kaiser P. K. dan Bawden W. F. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam: Balkema.

Pratama, R., Nur, T. dan Rasyid, E. (2015). Desain penyanggaan berdasarkan pola runtuh di Tambang Bawah Tanah UBPE Pongko. *Workshop dan Seminar Nasional Geomekanika II, Bandung, Indonesia*.

Warmanda, I. W. (2006). Karakteristik mineralogi dan pengendapan emas pada endapan emas-perak epitermal Gunung Pongkor, Jawa Barat. *Media Teknik Tahun XXVIII Edisi Nopember*, 4, 32-36.