

---

**A REVIEW ON QUANTIFICATION OF ROCK MASS  
DAMAGE AS CRITICAL CONSIDERATION IN  
STABILITY ANALYSIS**

**<sup>1,2)</sup>Sari Melati\*, <sup>1)</sup>Ridho K. Wattimena, <sup>3)</sup>David P. Sahara,  
<sup>1)</sup>Ganda M. Simangunsong, <sup>3,4)</sup>Wahyu Hidayat**

<sup>1)</sup> Mining Engineering Research Group, Faculty of Mining and Petroleum Engineering, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 40132, Indonesia

<sup>2)</sup> Mining Engineering Study Program, Faculty of Engineering, Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru, 70714, Indonesia

<sup>3)</sup> Global Geophysics Research Group, Faculty of Mining and Petroleum Engineering, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 40132, Indonesia

<sup>4)</sup> Geophysical Engineering Study Program, Faculty of Technology Mineral, UPN Veteran Yogyakarta, 55283, Indonesia

\*E-mail: [sari@ulm.ac.id](mailto:sari@ulm.ac.id)

**ABSTRAK**

Jumlah penggalian struktur berukuran besar semakin meningkat, untuk proyek penambangan, bendungan, jalan, dan proyek lainnya. Kerusakan massa batuan sekitar akibat penggalian harus dikuantifikasi dan dipertimbangkan dalam analisis kestabilan struktur. Penelaahan dilakukan terhadap sejumlah referensi primer yang membahas mengenai atau berkaitan dengan kuantifikasi kerusakan massa batuan. Hasil telaahan berupa rangkuman definisi dan faktor penyebab, parameter, serta metode kuantifikasi kerusakan massa batuan. Kerusakan mengacu pada penurunan kualitas akibat penambahan kekar atau berkurangnya kekuatan massa batuan. Kerusakan ini terjadi dalam daerah pengaruh tertentu dan mengubah sifat mekanik massa batuan. Tingkat kerusakan dinyatakan sebagai perbandingan penurunan parameter kualitas massa batuan setelah penggalian dengan kondisi awal. Kuantifikasi telah dilakukan terhadap lereng dan terowongan tambang maupun proyek lain menggunakan berbagai metode: solusi matematis, monitoring, pengujian di laboratorium, studi numerik, dan atau metode gabungan. Akurasi kuantifikasi tingkat kerusakan massa batuan di sekitar penggalian sangat bergantung pada ketepatan dalam menentukan perubahan properti kualitas massa batuan aktual. Oleh karena itu diperlukan metode pemantauan yang mampu mencakup area massa batuan terganggu sehingga kondisi kerusakan dapat teridentifikasi dengan tepat.

Kata kunci: kerusakan, kestabilan, kuantifikasi, massa batuan

**ABSTRACT**

*Number of large excavation projects are increasing significantly, for mining, dam, highway, and others project. Damage of surrounding rock mass induced by excavation should be quantified and considered in stability analysis of the excavation structures. A review has been conducted on available references discussing of subject related with the quantification of rock mass damage. The results are summarized include of definition, influence factors, parameters, and methods of quantification rock mass damage. The rock mass damage in this study refers to degradation of rock mass quality due to joint addition or weakening of rock mass strength. The damage occurs in certain area of influence and modifies the mechanical properties of rock mass. The damage degree is quantified as ratio of actual and initial condition of rock mass. Quantification have been performed on slopes or tunnels (mines and others) by using methods that include of mathematical solutions, monitoring, laboratory testing, numerical study, and combined method. The accuracy of quantification depends on the precision of determination the properties change and the actual quality of rock mass. Therefore, monitoring method covering the area where rock mass altered is a requirement to identify properly its damage condition.*

*Keywords: damage, quantification, rock mass, stability*

## A. PENDAHULUAN

Kualitas massa batuan merupakan faktor utama dalam penentuan kestabilan struktur. Secara praktis dan prosedural, pada perancangan suatu proyek, kualitas massa batuan dikuantifikasi sejak penyelidikan awal, didetilkan sebelum tahap perancangan, dan diverifikasi pada tahap konstruksi. Hasil investigasi kualitas massa batuan menjadi dasar dalam revisi atau pemantapan desain hingga konstruksi selesai (Pacalnis et al, 2007; Singh and Goel, 2011; Vibert and Vaskou, 2011). Setelah proses pembangunan selesai dan selama masa pemanfaatan proyek, kualitas massa batuan seringkali dianggap tidak berubah. Jika ada asumsi bahwa kualitas massa batuan berkurang, penyesuaian diperkirakan dengan *Strength Reduction Factor* atau SRF (Goodale et al, 2021; Gonzales et al, 2022; Jeon et al, 2022). Pemantauan dilakukan secara berkala untuk memastikan desain struktur tetap bertahan dan tujuan pemanfaatannya dapat terpenuhi. Terkadang diperlukan penyangga tambahan apabila ditemukan segmen atau zona tertentu yang mengalami kerusakan. Pendekatan yang demikian cukup praktis dan tidak masalah pada proyek berumur relatif singkat -misalnya tambang bawah tanah dengan masa produksi kurang dari 10 tahun- dan dimensi penggalian yang relatif kecil. Tantangan untuk memastikan apakah kualitas massa batuan mengalami perubahan dan berapakah tingkat perubahan tersebut jika dikuantifikasi menjadi sangat penting pada struktur penggalian yang berumur panjang dan dimensi penggalian besar.

Struktur-struktur penggalian berukuran besar pada massa batuan, seperti stasiun pembangkit listrik tenaga air, ruang penyimpanan bawah tanah, tambang metode runtunan, terowongan transportasi, tambang terbuka, bendungan, dan lain-lain, biasanya dirancang untuk pemanfaatan jangka panjang (Read, 2004; Agliardi et al, 2013; Ma et al, 2018; Flores & Catalan, 2019; Ji et al, 2021). Penggalian struktur ini akan mengganggu kondisi tegangan insitu dan menimbulkan tegangan induksi tinggi di sekitar penggalian. Massa batuan yang mengalami tegangan induksi tinggi terus menerus dapat mengalami kerusakan. Kerusakan yang terjadi berupa bertambahnya rekahan-rekahan baru atau memanjangnya rekahan-rekahan yang ada sehingga kualitas massa batuan menjadi turun. Pada kondisi tegangan insitu tinggi, baik tegangan vertikal (misalnya pada tambang dalam atau ruang penyimpanan bawah) maupun tegangan lateral (misalnya lereng tinggi dan curam), kerusakan massa batuan dapat terjadi lebih cepat dan parah.

Dengan demikian, kuantifikasi kerusakan massa batuan akibat penggalian sangat diperlukan setidaknya untuk:

- (1) mendapatkan kualitas massa batuan awal secara kuantitatif;
- (2) memantau kualitas massa batuan selama proyek aktif;
- (3) memastikan terjadi perubahan kualitas massa batuan berdasarkan parameter tertentu;
- (4) menguantifikasi tingkat perubahan kualitas massa batuan;
- (5) memetakan zona kerusakan massa batuan akibat penggalian.

Kuantifikasi massa batuan tersebut masih bersifat statis dari aspek waktu pemantauan dan analisis data, yakni hanya melihat perubahan dalam rentang waktu (periode) tertentu. Pada tingkat yang lebih kompleks, kuantifikasi sebaiknya dapat mencakup perubahan kualitas massa batuan secara dinamis, dari waktu ke waktu. Bahkan, perubahan tersebut dapat diprediksi, dan jika memungkinkan, peningkatan kerusakannya dapat diantisipasi. Pada tulisan ini, sejumlah dokumentasi penelitian awal dan penerapan metode kuantifikasi pada berbagai proyek dirangkum untuk melihat perkembangan terkini dan peluang/kesempatan perbaikan dalam upaya kuantifikasi kerusakan massa batuan.

## B. METODOLOGI PENELITIAN

Penelaahan dilakukan terhadap referensi primer berupa artikel dari jurnal ilmiah yang membahas mengenai atau berkaitan dengan kuantifikasi kerusakan massa batuan. Pertama, penelaahan dilakukan untuk merangkum parameter tolok ukur yang menyatakan tingkat kerusakan massa batuan, disertai persamaan yang digunakan. Kedua, pengumpulan informasi untuk karakterisasi obyek penelitian dan penentuan metode kuantifikasi yang sesuai. Informasi yang dikumpulkan terdiri atas:

- (1) Jenis proyek dan lokasi
- (2) Nama batu dan propertis mekanik
- (3) Ukuran penggalian
- (4) Kedalaman dan tegangan insitu
- (5) Metode kuantifikasi kondisi massa batuan
- (6) Penjelasan penerapan metode
- (7) Hasil kuantifikasi
- (8) Penulis dan tahun

Hasil telaahan berupa definisi kerusakan massa batuan dan faktor yang mempengaruhinya, parameter kerusakan, metode-metode kuantifikasi, kelebihan dan kekurangannya. Dengan demikian, perkembangan terkini mengenai upaya kuantifikasi kerusakan massa batuan diharapkan dapat tergambar dengan jelas.

## C. HASIL DAN PEMBAHASAN

### C.1. Definisi Faktor yang Mempengaruhi Kerusakan Massa Batuan

Meskipun kerap disebut, pengertian kerusakan batuan atau kerusakan massa batuan jarang didefinisikan secara eksplisit. Sehingga bisa dikatakan telah ada kesepakatan dalam memahami makna istilah tersebut. Kerusakan yang dimaksud yaitu menurunnya kualitas massa batuan, ditandai dengan penambahan rekahan pada massa batuan akibat perpanjangan rekahan lama maupun pembentukan rekahan baru, sehingga kekuatannya berkurang, muncul perilaku *softening* (menurunnya kekakuan), bahkan terjadi keruntuhan. Kerusakan tersebut biasanya terjadi pada daerah dari perimeter penggalian hingga radius atau jarak tertentu dimana kondisi massa batuan terpengaruh oleh penggalian tersebut. *Excavation Damage Zone* (zona yang rusak akibat penggalian) atau EDZ dijelaskan sebagai zona di sekitar penggalian dimana terdapat rekahan-rekahan, termodifikasi secara hidromekanika dan geokimia, sehingga perubahan propertis aliran dan transportasinya menetap (Wu, 2009).

Berdasar pada serangkaian percobaan di Laboratorium Penelitian Bawah Tanah AECL, Canada (Read, 2004), faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kerusakan lubang bukaan bawah tanah dan kestabilannya, yaitu:

1. Tegangan in situ  
Lubang bukaan yang sejajar dengan tegangan prinsipal menengah akan berpotensi mengalami kerusakan paling parah. Lubang bukaan yang sejajar tegangan prinsipal maksimum atau minimum tidak rentan rusak.
2. Keberagaman geologi  
Variasi komposisi litologi, distribusi ukuran butir, kemas batuan, dan struktur mikro, mempengaruhi karakteristik kekuatan makroskopis batuan di sekitar lubang bukaan dan menghasilkan keberagaman/anisotropi karakteristik mekanik batuan.
3. Metode penggalian  
Metode mekanis dan peledakan sama-sama membentuk zona runtuh pada daerah kompresi, namun kerusakan di dinding akibat tegangan tarik lebih terlihat pada terowongan dengan metode peledakan.
4. Geometri dan arah terowongan  
Bentuk terowongan yang optimum adalah yang menghindari lokalisasi tegangan di sekitar perimeter terowongan atau yang mendekati kondisi tegangan seragam. Bentuk-bentuk menyudut seperti persegi atau persegi panjang akan menghasilkan zona runtuh berbentuk V. Sudut-sudutnya sebaiknya dibuat melengkung sehingga desain akhir penampang terowongan menjadi lingkaran, elips, atau tapal kuda. Arah terowongan diusahakan menghindari rezim tegangan tarik di dinding.
5. Lubang galian di sekitarnya  
Pada lingkungan tegangan horizontal tinggi, penggalian di dekat lubang bukaan yang sudah ada

cukup mengganggu tegangan *near-field* sehingga menimbulkan dan memperparah kerusakan galian.

6. Praktek operasional penggalian dan penyanggaan  
*Scaling* (pengcongkelan batuan yang akan lepas) berlebih akan meningkatkan lokalisasi tegangan. Baut batuan dan *wire mesh* digunakan untuk meningkatkan kestabilan dan menghindari masalah keselamatan selama konstruksi.
7. Efek suhu dan kelembaban  
 Kerusakan lubang bukaan diperparah oleh fluktuasi suhu dan kelembaban udara ventilasi bawah tanah. Kelembaban meningkatkan kecepatan pembentukan rekahan dan tegangan termal meningkatkan konsentrasi tekanan pemampatan. Fluktuasi harian dan musiman biasa terjadi pada lubang galian tambang bawah tanah, dan bahkan perubahan kecil kondisi lingkungan dapat berdampak pada ketidakstabilan minor. Efek-efek ini dapat dikendalikan selama konstruksi dengan pengaturan suhu dan ventilasi.
8. Kualitas massa batuan  
 Kualitas massa batuan akan menentukan ukuran dan kerusakan alami pada penggalian. Secara alami, massa batuan terkekarkan mengalami deformasi yang terkumpul di perpanjangan rekahan yang sudah ada dibandingkan pembentukan rekahan baru.
9. Tekanan pemampatan  
 Tekanan pemampatan kecil dapat memperlambat terjadinya kerusakan massa batuan.
10. Efek kimia dan biologi  
 Isian bahan kimia alami dan pertumbuhan biologis dalam rekahan di massa batuan rusak merubah transmisivitas, baik dengan mengisi rekahan yang sudah ada atau mengubah permeabilitas melalui dissolusi atau aktivitas biologi. Pelindian kalsium karbonat dari sisa bahan konstruksi campuran semen standar dan struktur lainnya (seperti *grout*, semen pada pembautan batuan, dan penyangga lain) menimbulkan efek pengisian dan dapat merubah tingkat keasamannya. Pembentukan gas dari logam terkorosi atau baut batuan juga perlu dipertimbangkan.

### C.2. Parameter Kerusakan Massa Batuan

Kerusakan massa batuan mulai dimodelkan dengan berbagai pendekatan dan parameter kriteria dalam beberapa tahun terakhir. Tang et al (2015) menggunakan variabel kerusakan  $D$  untuk elemen batuan pada jangkauan sumber seismik sebagai perbandingan antara energi analisis balik  $\Delta U$  yang tersebar dalam elemen berdasarkan energi radiasi seismik dan total energi regangan yang dapat dilepaskan per satuan volume  $U^e$ .

$$D = \frac{\Delta U}{U^e} \quad (1)$$

Sehingga, dalam pertimbangan pelepasan energi mikroseismik, modulus elastis  $E_r$  dan kohesi  $c_r$  elemen batuan dapat dinyatakan dengan :

$$E_r = (1-D)E_0 \quad (2)$$

$$c_r = (1-D)c_0 \quad (3)$$

dimana  $c_0$  dan  $E_0$  adalah kohesi awal dan kekakuan modulus elastis awal batuan.

Makarov et al (2016) menggunakan model matematis untuk karakterisasi zona kerusakan massa batuan di sekitar lubang bukaan tambang bijih besi yang mengalami tegangan tinggi. Pada batas penggalian, massa batuan dianggap mengalami kerusakan, dimana parameter  $R$  tidak sama dengan 0.  $R(r)$  merupakan fungsi kerusakan batuan antara batas penggalian dan zona keruntuhan berikutnya. Sehingga, kondisi batas fungsi  $R(r)$  adalah :

$$R'(r)|_{r=0} = 0, R'(r)|_{r=r^*} = 0 \quad (4)$$

Dimana  $r^*$  merupakan jarak dari kontur lubang penggalian sampai titik tengah zona runtuh pertama, yang diperoleh dari data eksperimen.

Zhao et al (2017) menganalisis proses kerusakan batuan berdasarkan monitoring mikroseismik dan simulasi numerik di tambang bijih besi. Konsep dasarnya menggunakan model matematis variabel kerusakan  $D$  seperti yang telah digunakan Makarov (2016), dengan mempertimbangkan unit massa batuan  $m$  dan efisiensi seismik  $\eta$ .

$$D = \frac{\Delta U}{mU_D^e} = \frac{\Delta U'}{\eta mU_D^e} \tag{5}$$

Modulus elastis, kohesi, dan sudut gesek dalam dianggap mengalami penurunan yang setara dengan derajat kerusakan batuan. Kerusakan satuan massa batuan bukan proses tunggal, melainkan superposisi dari kerusakan multistahap. Jadi, modulus elastis setelah kerusakan  $E_D$ , kohesi setelah kerusakan  $c_D$ , dan sudut gesek dalam setelah kerusakan  $\varphi_D$ , dalam hubungannya dengan massa batuan, dinyatakan sebagai:

$$E_D = E_0 (1-D^k) = E_0 (1-D^{k-1}) (1 - D_k) \tag{6}$$

$$c_D = c_0 (1-D^k) = c_0 (1-D^{k-1}) (1 - D_k) \tag{7}$$

$$\tan \varphi_D = \tan \varphi_0 (1-D^k) = \tan \varphi_0 (1-D^{k-1}) (1 - D_k) \tag{8}$$

dimana  $D^k$  merupakan kerusakan kumulatif pada tahap  $k$ ,  $D_k$  adalah kerusakan instan pada tahap  $k$ , dan  $E_0$ ,  $c_0$ ,  $\varphi_0$  merupakan modulus elastis, kohesi, dan sudut gesek dalam tanpa kerusakan. Massa batuan rusak seluruhnya ketika  $D=1$ , dan tidak mengalami kerusakan ketika  $D=0$ .

Ma et al (2018) memahami mekanisme *rockburst* untuk memprediksi *rockburst* pada stasiun pembangkit listrik tenaga air menggunakan model mekanika. Persamaan konstitutif untuk kerusakan batuan berdasarkan mekanika kerusakan kontinyu:

$$\sigma = (1-D) E\varepsilon = E\varepsilon \cdot e^{-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m} \tag{9}$$

Dimana  $D$  adalah variabel kerusakan,  $\sigma$  merupakan tegangan,  $E$  adalah modulus elastis,  $\varepsilon$  adalah regangan, dan  $m$  konstanta massa batuan. Variasi variabel kerusakan  $D$  bergantung pada jenis runtuh dan keadaan regangan elemen. Sebagai contoh, kondisi tegangan elemen di bawah tegangan tarik uniaksial mencapai kerusakan pada saat:

$$\sigma_3 \leq f_t \tag{10}$$

yaitu saat tegangan tarik  $f_t$  sama dengan atau lebih dari tegangan prinsipal minimum  $\sigma_3$ .

Variabel kerusakan dapat dinyatakan menggunakan persamaan :

$$D = \begin{cases} 0, & \varepsilon_{to} \leq \varepsilon \\ 1 - \frac{f_{tr}}{E_0 \varepsilon}, & \varepsilon_{tu} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ 1, & \varepsilon \leq \varepsilon_{tu} \end{cases} \tag{11}$$

Dimana  $f_{tr}$  merupakan kekuatan sisa, dan  $\varepsilon_{to}$  dan  $\varepsilon_{tu}$  berturut-turut merupakan regangan tarik maksimum dan regangan akhir maksimum.

Gao et al (2020) mengusulkan model evolusi kerusakan batu granit pada uji kuat tekan dan kuat tarik uniaksial dengan model numerik. Menurut prinsip kesetaraan regangan dalam mekanisme kerusakan, variabel kerusakan  $D$  dijelaskan sebagai :

$$D(t) = 1 - \frac{E'(t)}{E} \tag{12}$$

dimana  $E'(t)$  adalah ekuivalensi modulus elastis yang menunjukkan modulus elastis selama proses

kerusakan. Makna fisik variabel kerusakan yaitu fenomena runtuh material akibat perambatan dan kehancuran rekahan-rekahan mikro yang ditunjukkan oleh pengurangan modulus elastisitasnya.

Wang et al (2020) menggunakan prinsip-prinsip model mekanika kerusakan kontinyu yang telah dikenalkan dari literatur sebelumnya, untuk menyelidiki evolusi kerusakan dan menganalisis kestabilan massa batuan di reservoir. Seiring dengan bertambahnya rekahan, derajat kejenuhan semakin bertambah. Kestabilan massa batuan menurun hingga 36,04%.

Ji et al (2021) menyelidiki pengaruh kerusakan kumulatif dan kriteria keselamatan pada massa batuan di sekitar terowongan berpenampang besar yang dibuat menggunakan metode peledakan *full-face*. Model kerusakan tarik digunakan untuk mempelajari kerusakan massa batuan pada penggalian dengan peledakan. Variabel kerusakan batuan  $D$  pada model ini dijelaskan sebagai fungsi probabilitas yang berhubungan dengan kerapatan rekahan  $C_d$ :

$$D = 1 - e^{-C_d^2} \tag{13}$$

$$C_d = \begin{cases} \alpha(\varepsilon - \varepsilon_{cr})^\beta t & \varepsilon > \varepsilon_{cr} \\ 0 & \varepsilon \leq \varepsilon_{cr} \end{cases} \tag{14}$$

dimana  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah konstanta material.  $\varepsilon_{cr}$  adalah regangan tarik kritis dan  $\varepsilon$  adalah regangan tarik total yang didapat dari:

$$\varepsilon_{cr} = \frac{1-2\mu}{E} \sigma_{st} \tag{15}$$

$$\varepsilon = \sum e_i^t, I = 1,2,3 \tag{16}$$

Dimana  $\mu$  dan  $E$  merupakan Ratio Poisson dan Modulus Young massa batuan.  $\sigma_{st}$  merupakan kuat tarik statis massa batuan.  $e_i^t$  merupakan regangan logaritmik tarik pada arah prinsipal. Modulus geser  $\bar{G}$  dan modulus ruah  $\bar{K}$  yang terdegradasi didefinisikan sebagai berikut:

$$\bar{G} = (1-D) G \tag{17}$$

$$\bar{K} = (1-D) K \tag{18}$$

Dimana  $G$  dan  $K$  merupakan modulus geser dan modulus ruah massa batuan. Hubungan konstitutif inkremen menggunakan hokum Hooke yang diterapkan pada pengaruh kerusakan dapat dijelaskan sebagai:

$$d\sigma_{ij} = \bar{K}d\varepsilon_{kk}\delta_{ij} + 2\bar{G}de_{ij} \tag{19}$$

dimana  $\varepsilon_{kk}$  dan  $e_{ij}$  merupakan regangan volumetrik dan regangan deviatorik, sementara  $\delta_{ij}$  merupakan delta Kronecker.

Variabel kerusakan yang diuji  $D_T$  di sekitar batuan dapat didefinisikan sebagai:

$$D_T = 1 - \left(\frac{v}{v_0}\right)^2 \tag{20}$$

dimana  $v_0$  dan  $v$  merupakan kecepatan gelombang akustik batuan sekitar sebelum dan sesudah peledakan. Kecepatan gelombang akustik terukur sebenarnya merupakan cepat rambat gelombang P karena sinyal akustik didapat dari metode refleksi detak/pulsa. Hubungan kecepatan gelombang P dan modulus geser dihitung sebagai:

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \tag{21}$$

dimana  $\lambda$  merupakan konstanta Lamé.

$$\lambda = \frac{2G\mu}{1-2\mu} \quad (22)$$

$\rho$  mewakili densitas batuan sekitar. Variabel kerusakan yang terukur  $D_T$  dapat dinyatakan dengan modulus geser batuan sekitar sebelum dan sesudah peledakan:

$$D_T = 1 - \frac{\bar{G}}{G} \quad (23)$$

Berdasarkan persamaan-persamaan yang tercantum di atas, tingkat kerusakan massa batuan umumnya diberi simbol  $D$  (damage) yang dinyatakan sebagai koefisien dari 0 sampai dengan 1. Besar nilai  $D$  diperoleh dari koefisien 1 - yang menunjukkan kondisi massa batuan tanpa kerusakan- dikurangi perbandingan antara propertis massa batuan setelah mengalami kerusakan dibanding propertis massa batuan awal. Propertis yang menjadi penentu tingkat kerusakan yang paling sering digunakan yaitu propertis elastis: untuk analisis 2D berupa Modulus Young ( $E$ ), untuk analisis 3D berupa Modulus Bulk ( $K$ ) dan Modulus Geser ( $G$ ). Perubahan propertis kekuatan seperti kohesi ( $c$ ), tegangan ( $\sigma$ ), atau regangan ( $\epsilon$ ) juga dapat dipakai untuk menyatakan tingkat kerusakan. Selain itu, tingkat kerusakan massa batuan dapat pula dikuantifikasi dari pelepasan energi seismik dan kecepatan gelombang. Perhitungan  $D$  terkadang hanya berdasarkan satu parameter saja atau bisa juga berdasar pada beberapa parameter. Semua masih bergantung pada peralatan dan metode yang tersedia untuk memperoleh data perubahan kondisi massa batuan. Satu hal yang dapat dipahami bersama yaitu bahwa penentuan atau prediksi propertis aktual menjadi kunci ketepatan dalam kuantifikasi kualitas massa batuan. Artinya, pemantauan yang dilakukan selama proyek berjalan harus diusahakan mampu merekam data-data yang dapat dianalisis untuk mengukur tingkat kerusakan. Tegangan-regangan merupakan yang paling sering dipantau karena dari data ini dapat diketahui propertis modulus dan kohesi. Batas zona kerusakan aktual pun dibutuhkan untuk memperoleh model matematis kerusakan massa batuan yang lebih akurat. Data pemantauan geofisika, misalnya sistem monitoring mikroseismik, mulai diterapkan untuk membantu dalam interpretasi kondisi massa batuan.

### C.3. Metode Kuantifikasi Kerusakan Massa Batuan

Sejumlah metode kuantifikasi telah diterapkan untuk menilai tingkat kerusakan massa batuan di sekitar penggalian. Secara umum dapat disimpulkan dari Tabel 1, ada empat metode kuantifikasi tingkat kerusakan massa batuan: solusi matematis, permodelan numerik, pengujian di laboratorium, monitoring, dan empiris. Solusi matematis dibangun dari teori mekanika media kontinyu dan mekanika batuan, berdasarkan data geometri, ukuran penggalian, dan propertis massa batuan. Sebagai teori awal untuk memprediksi kerusakan massa batuan, metode ini paling praktis, terlebih untuk asumsi sederhana batuan kontinyu, homogen, isotrop, linier, dan elastis. Akan tetapi, solusi menjadi semakin rumit ketika dihadapkan pada permasalahan batuan diskontinyu, heterogen, anisotrop, nonlinier, dan anelastis. Permodelan numerik sangat membantu ketika suatu analisis kestabilan membutuhkan simulasi berulang dan banyak dalam waktu singkat. Terkadang diperlukan proses komputasi yang cukup berat untuk simulasi numerik model skala besar, tetapi tetap jauh lebih efisien dibanding melakukan pengujian secara langsung. Tantangan solusi matematis dan simulasi numerik lebih terletak pada upaya untuk mendapatkan input parameter yang representatif. Di sinilah peranan pengujian laboratorium dan monitoring insitu berperan penting. Pengujian sampel batuan atau model fisik di laboratorium merupakan cara terpercaya untuk mendapatkan propertis dan respons batuan di bawah kondisi tegangan yang diuji. Pemilihan dan jumlah sampel batu yang diuji harus mewakili massa batuan di lapangan. Tentunya hasil uji lab memiliki keterbatasan dari aspek skala sampel dan kapasitas alat. Tetapi hal itu dapat disimulasikan dengan model numerik dan diverifikasi dengan hasil monitoring insitu. Sejauh ini, monitoring merupakan metode kuantifikasi kerusakan massa batuan yang terbaik ditinjau dari aspek aktualisasi. Data hasil monitoring sebaiknya menjadi acuan untuk memvalidasi model dan memverifikasi prediksi kerusakan massa batuan. Terakhir, metode empiris, yaitu wawasan dan penguasaan mengenai studi kasus kuantifikasi kerusakan massa batuan yang telah dilakukan sebelumnya sehingga informasi mencakup data, metode, dan hasil dapat dimanfaatkan untuk membantu proses analisis.

Berkaca pada kuantifikasi yang telah dilakukan, untuk mendapatkan hasil yang lebih komprehensif dan terpercaya, disarankan menggabungkan setidaknya dua metode. Selain itu, metode monitoring sebaiknya selalu digunakan karena metode ini paling aktual, representatif, dan dinamis. Hasil monitoring bahkan menjadi input atau tolok ukur validasi bagi metode lainnya. Metode monitoring paling sederhana, seperti pengukuran perpindahan menggunakan dilatometer atau ekstensometer adalah yang paling murah dan paling mudah dilaksanakan tetapi diperlukan waktu dan tenaga kerja untuk mengerjakan pengambilan data setiap hari. Pengukuran pun biasanya dibatasi pada segmen pendek yang dianggap mengkhawatirkan. Selain itu, perpindahan dan kerusakan yang teramati hanya bagian massa batuan yang terbuka di dinding, atap, atau muka lereng. *Scanner*, radar, atau foto udara, mampu mengatasi masalah keterbatasan waktu dan tenaga kerja. Sedikit tenaga profesional yang dibutuhkan untuk mengoperasikan alat dan memperoleh banyak data. Tetapi, keduanya hanya dapat memetakan massa batuan yang terekspos. Kekar di permukaan batuan yang tertutup vegetasi misalnya, tidak akan terpetakan. *Borehole camera* mampu memetakan kekar dengan baik pada kedalaman beberapa meter sehingga zona kerusakan dapat diketahui batasnya. Demikian juga dengan *multiple borehole extensometer*, yang mampu mengukur perpindahan di dalam massa batuan dalam zona kerusakan. Pada penggalian berukuran besar atau jaringan terowongan yang kompleks, metode monitoring mikroseismik lah yang paling handal karena mampu mencakup hingga ke dalam massa batuan sekitar dan sensitif terhadap setiap pergerakan. Data yang diperoleh sangat komprehensif dan fleksibel untuk berbagai kepentingan analisis lanjutan. Selain itu, dibutuhkan pula tenaga terdidik, terlatih, dan berpengalaman untuk menjalankan sistem monitoring ini. Metode ini memerlukan investasi di awal untuk membangun sistem dan memasang jaringan pemantau (sensor dan stasiun), tetapi operasionalnya bersifat pasif sehingga lebih efisien namun tetap efektif.

Terdapat pencapaian yang perlu dicatat dari hasil kuantifikasi yang telah dilakukan, di antaranya:

1. Kerusakan massa batuan kuat sangat dikontrol oleh struktur, tetapi pada batuan lemah kerusakannya lebih dikontrol oleh deformasi atau regangan.
2. Hasil kuantifikasi masih bersifat statis, analisis multiperiod belum dilakukan.
3. Belum semua studi kuantifikasi memberikan hasil akhir/rangkuman koefisien atau persentasi tingkat kerusakan dan batas zona kerusakan massa batuan yang terbentuk. Sebagai gambaran, lereng bendungan setinggi 200 meter mengalami kerusakan 18,64%, sedangkan massa batuan di tambang bawah tanah pada kedalaman 180 meter mengalami kerusakan dari 0,4 sampai 1 (Zhao, 2017; Wang et al, 2021).
4. Kombinasi metode kuantifikasi yang paling umum dilakukan terdiri dari uji laboratorium untuk mendapatkan properti batuan, simulasi numerik untuk menguji hasil skenario berbeda, dan monitoring untuk memvalidasi model dan memverifikasi hasil simulasi.
5. Energi yang dilepaskan untuk merusak batuan padat (diorit) lebih tinggi dibanding batuan berongga (karst) (Ma et al, 2018; Ma et al, 2019).

Terakhir, dianalisis peluang untuk pengembangan penelitian mengenai studi kuantifikasi kerusakan massa batuan ini. Struktur berdimensi besar, penggalian tambang bawah tanah metode runtuh, khususnya *block caving*, semakin populer dalam dua puluh tahun terakhir karena produktivitasnya tergolong tinggi (Gyachi Afrouz & Westman, 2018; Hidayat et al, 2022). Sampai sejauh ini, sistem monitoring mikroseismik sudah diterapkan pada tambang metode runtuh (*caving*), baik *block caving* maupun *sublevel caving* (Gosh & Shivakumar, 2018; Cao et al, 2020), tetapi belum ditemukan hasil kuantifikasi kerusakan massa batuan di sekitarnya. Hasil kuantifikasi akan sangat membantu dalam memberikan analisis kestabilan yang lebih aktual dan representatif.



Tabel 1. Penerapan metode kuantifikasi kerusakan massa batuan

No.	Site/Obyek	Massa Batuan	Ukuran	Kedalaman	Metode Kuantifikasi	Penjelasan	Hasil	Referensi
1.	Terowongan penyimpanan limbah nuklir bawah tanah, <i>Atomic Energy of Canada Limited (AECL), Tunnel Test di Underground Research Laboratory (URL)</i>	Granit dan granodiorit (dyke), $\sigma_c \approx 200$ MPa, $E = 65$ GPa; c.	Diameter terowongan 3,5 meter	Kedalaman $\pm 420$ m. Tegangan insitu $\sigma_H = 60$ MPa > $\sigma_h = 45$ MPa > $\sigma_v = 11$ MPa	Monitoring perpindahan dengan ekstensometer, monitoring mikroseismik dan permodelan numerik	Model numerik diberi perlakuan <i>softening</i> dengan mempertimbangkan kerapatan kekar dari model rekahan tarik hasil interpretasi data mikroseismik. Pengaruh kekar diuji dengan 2 matriks penyesuaian: isotropi dan anisotropi, kemudian dibandingkan dengan perpindahan aktual.	Kekar terkumpul pada dua kutub sejajar tegangan insitu minimum akibat tegangan tarik. Batas zona kerusakan sekitar 2 kali radius terowongan jika diperkirakan dari perpindahan radial optimum ( $\pm 0,5$ mm), dan zona pengaruh ( <i>near field</i> ) terbatas pada 10,5 kali radius terowongan (perpindahan menjadi 0). Perlakuan <i>softening</i> anisotropi mendekati hasil pengukuran perpindahan aktual dengan ekstensometer.	Cai et al, 2001
2.	<i>Shaft di URL, AECL</i>	Granit berkekar subvertical, $\sigma_c \approx 200$ MPa	Diameter shaft 3,5 meter	Kedalaman $\pm 420$ m. Tegangan insitu $\sigma_H = 60$ MPa > $\sigma_h = 45$ MPa > $\sigma_v = 11$ MPa	Monitoring perpindahan dengan pengujian dilatometer	Pengujian dengan dilatometer pada lubang bor dengan kedalaman 15 meter untuk mengukur modulus deformasi massa batuan.	Modulus meningkat dari 20 GPa di dekat <i>shaft</i> hingga 70 GPa di sekitar 9 meter dari <i>shaft</i> . Perpindahan masih terukur sampai 2,5 meter dari dinding <i>shaft</i> .	Read, 2004
3.	Tambang bawah tanah Taimyrskii dan Oktyabrskii, model fisik	$E = 0,15$ , $\nu = 0,2$ . Material model Gypsum berlapis	Lebar 5 meter, tinggi 3 meter.	Kedalaman 1050 dan 957	Empiris, monitoring dan uji lab	Metode empiris (Cai, 2002). Pengamatan zona retakan di sekitar perimeter terowongan dan pengujian lab model fisik.	Kedalaman kritis tambang 1038,9 meter. Zona disintegrasi terjadi pada kedalaman berbeda, tergantung karakteristik konsentrasi tegangan dan indeks mekanik massa batuan	Wu et al, 2008
4.	Bendungan PLTA Xiaowan,	Batuan keras dan getas	Lebar 800 meter, tinggi 200 meter	Di permukaan	Monitoring	Monitoring dengan kamera ke dalam 200 lubang bor untuk menyelidiki rekahan akibat penggalan,	Tingkat kerusakan 18,64% dan 2,01%	Wu et al, 2009
5.	Kuari Gunung	Riolit, $\sigma_c > 150$	Tinggi	Di	Monitoring	Pemetaan <i>Geological Strength</i>	Massa batuan di lereng kuari	Agliardi et

No.	Site/Obyek	Massa Batuan	Ukuran	Kedalaman	Metode Kuantifikasi	Penjelasan	Hasil	Referensi
6.	Gorsia, Italia Terowongan	MPa Batugamping, $\sigma_c = 70$ MPa, $\sigma_t = 7$ MPa, $\nu = 0,3$	lereng 170 dan 250 meter, kemiringan $37^\circ$ Terowongan tapalan kuda. Tinggi 2,5 meter; lebar 2 meter.	permukaan numerik, kedalaman 10 m. Tegangan $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 10$ MPa.	dan permodelan numerik Solusi matematis zona kerusakan penggalan	<i>Index (GSI), Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)</i> , model numerik kontinyu dan diskontinyu Penentuan propertis massa batuan di zona kerusakan di sekitar penggalan akibat aktivitas peledakan menggunakan solusi matematis berdasarkan perubahan <i>Geological Strength Index (GSI)</i> . Sistem monitoring mikroseismik terdiri dari 28 saluran dipasang pada 5 elevasi berbeda mencakup area $400 \times 400 \times 600$ m. Monitoring mikroseismik dan simulasi numerik	dikelompokkan atas tidak rusak, rusak (ketidakstabilan dikontrol struktur), dan residual (longsor besar). Model numerik dengan penurunan GSI pada zona kerusakan dari 65 menjadi 55 dan penurunan Modulus Deformasi massa batuan dari 19,8 menjadi 11,2 memberikan hasil yang lebih tepat dibanding estimasi faktor D 0,8. Setelah aktivitas mikroseismik dipertimbangkan, faktor keselamatan (FK) lereng berkurang 0,11.	al, 2013 Torbica & Lapčević, 2015 Tang et al, 2015
7.	Lereng bendungan Pembangkit Listrik Tenaga Air, Jinping I	Batuserpil pasir dan marmer, $E = 3$ s.d. 25 GPa; $\nu = 0,25$ s.d. 0,35.	Tinggi lereng $\pm 185$ meter	Di permukaan, elevasi 1730 s.d. 1915 m	Monitoring mikroseismik dan simulasi numerik	Sistem monitoring mikroseismik terdiri dari 22 sensor dipasang pada 11 elevasi berbeda mencakup area $600 \times 600 \times 400$ m. Zona retakan pertama $r^*$ diprediksi dengan fungsi kekuatan batuan dan ukuran lubang bukaan tambang $r^0$ pada 4 kedalaman tertentu.	FK lereng dengan kekuatan 1,83, atau lebih tinggi 51,25 dari FK lereng tanpa kekuatan. Model matematis cukup mendekati hasil pengukuran perpindahan aktual dengan deviasi $\pm 2,7$ s.d. 24,3%. Ratio jari-jari zona kerusakan dengan jari-jari lubang bukaan	Tang et al, 2015 Makarov et al, 2016
8.	Lereng bendungan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Dagangshan, Cina	Diabas (dyke), $\sigma_c < 10$ s.d. 80 MPa; $E_{tm} = 0,2$ s.d. 25 GPa; $\nu = 0,25$ s.d. $> 0,35$ ; $c = 0,175$ s.d. 2	Tinggi lereng $\pm 321$ meter	Di permukaan elevasi 979 s.d. 1300 m	Monitoring mikroseismik dan simulasi numerik	Sistem monitoring mikroseismik terdiri dari 22 sensor dipasang pada 11 elevasi berbeda mencakup area $600 \times 600 \times 400$ m. Zona retakan pertama $r^*$ diprediksi dengan fungsi kekuatan batuan dan ukuran lubang bukaan tambang $r^0$ pada 4 kedalaman tertentu.	FK lereng dengan kekuatan 1,83, atau lebih tinggi 51,25 dari FK lereng tanpa kekuatan. Model matematis cukup mendekati hasil pengukuran perpindahan aktual dengan deviasi $\pm 2,7$ s.d. 24,3%. Ratio jari-jari zona kerusakan dengan jari-jari lubang bukaan	Tang et al, 2015 Makarov et al, 2016
9.	Tambang bijih bawah tanah Nikolaevskij, Dalnegorsk, Russia	$\sigma_c \approx 150$ MPa	Jari-jari lubang bukaan tambang = 1,75 s.d. 3 meter	Elevasi 520 s.d. 1320 m	Model matematis dikonfirmasi dengan pengukuran perpindahan	Sistem monitoring mikroseismik terdiri dari 22 sensor dipasang pada 11 elevasi berbeda mencakup area $600 \times 600 \times 400$ m. Zona retakan pertama $r^*$ diprediksi dengan fungsi kekuatan batuan dan ukuran lubang bukaan tambang $r^0$ pada 4 kedalaman tertentu.	FK lereng dengan kekuatan 1,83, atau lebih tinggi 51,25 dari FK lereng tanpa kekuatan. Model matematis cukup mendekati hasil pengukuran perpindahan aktual dengan deviasi $\pm 2,7$ s.d. 24,3%. Ratio jari-jari zona kerusakan dengan jari-jari lubang bukaan	Tang et al, 2015 Makarov et al, 2016

No.	Site/Obyek	Massa Batuan	Ukuran	Kedalaman	Metode Kuantifikasi	Penjelasan	Hasil	Referensi
10.	Tambang bijih besi bawah tanah Shirengou, Hebei Iron and Steel Group, Cina	Badan bijih dan batuan sekitar: densitas 3,06 & 2,64 ton/m <sup>3</sup> , kuat tarik 1,09 & 0,45 MPa, koehesi 2,43 & 0,89 MPa, sudut gesek dalam 38° & 36°, E = 4,70 & 4,41 GPa, $\nu$ 0,21 & 0,22	Jaringan lubang galian bekas tambang terdiri atas 129 goafs dalam area ±480 m x 180 m	Kedalaman > 60 s.d. - 180 m.	Monitoring mikroseismik dan simulasi numerik	Monitoring mikroseismik menggunakan 25 sensor pada kedalaman -180 m, -165 m, -120 m dan -60 m level, mencakup 22 sensor geofon triaksial dan 3 sensor geofon triaksial. Pada simulasi numerik, parameter massa batuan yang terdampak event mikroseismik dimodifikasi menurut parameter kerusakan D.	tambang $t_0 = 1,03 - 4,54$ . Perubahan aktivitas mikroseismik diamati dari Oktober 2009 s.d. Maret 2010. Fase kerusakan dimulai dari mode rekahan tarik menjadi mode rekahan geser, yang ditandai dengan semakin besarnya energi seismic yang dilepaskan. Tingkat kerusakan massa batuan di dua lokasi pengamatan berkisar antara 0,8 - 1 dan 0,4 - 0,6.	Zhao et al, 2017
11.	Penggalian terowongan dengan Tunneling Boring Machine, PLTA Jinping II, Sinchuan, Cina	Karts, terdapat rongga	Diameter dengan penyangga a beton 12,4 m	Kedalaman 1500 s.d. 2525 m. Tegangan prinsipal maksimum 46 - 75 MPa	Monitoring mikroseismik	Aktivitas mikroseismik digunakan untuk karakterisasi peristiwa <i>rockburst</i>	<i>Rockburst</i> terjadi pada rekahan, baik yang sudah ada maupun yang baru terbentuk. Tidak dibutuhkan pelepasan energi yang besar untuk meretakkan atau memecahkan batuan.	Ma et al, 2018
12.	Terowongan tol Bazhong-Shaanxi, Pegunungan Micang, Cina	Diorit kuarsa	Azimuth terowongan 10° dari sumbu terowongan, Panjang 13,8 km.	Kedalaman 900 s.d. 1070 m. Tegangan prinsipal maksimum horizontal 30 MPa	Permodelan numerik dari pengukuran struktur dan monitoring mikroseismik	Model sintetik massa batuan dibangun untuk simulasi rekahan di batuan keras. Event mikroseismik dominan dikoreksi dan disesuaikan dengan hasil pengukuran kedudukan struktur untuk memodelkan distribusi rekahan makro.	Event mikroseismik di batuan tipe runtuh keras umumnya terjadi pada pelepasan energi tinggi.	Ma et al, 2019
13.	Bendungan Three Gorges Project, Sungai Yangtze, Cina	Granit, $\sigma_c \approx 41,5$ MPa; E = 68 GPa, $\nu = 31$ MPa, sudut gesek dalam 48,47°, kuat tarik 2,7 MPa.	Tinggi bendungan 185 meter	Di permukaan	Pengujian di laboratorium, solusi matematis dan permodelan numerik	Pengembangan persamaan matematis baru untuk menilai tingkat kerusakan massa batuan pada kondisi tegangan tarik dan tekan 3 dimensi, yang divalidasi dengan hasil uji lab dan simulasi numerik.	Hasil prediksi model matematis cukup mendekati hasil uji lab. Kerusakan akibat tegangan tekan dan tarik, berturut-turut 0,69 dan 0,64.	Gao et al, 2020
14.	Tebing	Batugamping, marl,	Tinggi	Massa	Pengujian di	Uji UCS pada berbagai	Massa batuan runtuh pada	Wang et

No.	Site/Obyek	Massa Batuan	Ukuran	Kedalaman	Metode Kuantifikasi	Penjelasan	Hasil	Referensi
	Jianchuan dong, Sungai Yangtze, Cina	dolomit. $\sigma_c \approx 13,24$ s.d. $19,07$ MPa; kuat tarik $1,1$ MPa; sudut gesek dalam $32,6^\circ$ ; kohesi $3,36$ MPa; $E = 0,39$ s.d. $0,41$ MPa, $\nu = 0,30$	tebing $135$ m	batuan berbahaya di jalur belokan sungai (patahan)	laboratorium, solusi matematis	pengulangan siklus jenuh dan kering. Analisis tingkat kerusakan dan dampaknya pada kestabilan tebing	tingkat kerusakan $0,2$ .	al, 2020
15.	Terowongan jalan tol Longnan, Cina.	Batupasir, batupasir metamorf, dan granit. Densitas $2,7$ ton/m <sup>3</sup> , $E = 40-55$ MPa, $\nu = 0,18 - 0,20$ ; $\sigma_c = 60$ MPa, sudut gesek dalam $30^\circ - 36^\circ$ , $c = 24 - 31$ MPa.	Tinggi $11,8$ m dan lebar $14,4$ m. Kemajuan per peledakan $4,2$ meter	Tidak disebutkan	Pengukuran lapangan dan simulasi numerik	Kombinasi model kerusakan Drucker Prager dan kerusakan tarik. Kerusakan dihitung dari kecepatan terukur setelah dan sebelum peledakan.	Zona kerusakan penampang terowongan hingga $4$ meter.	Ji et al, 2021
16.	Lereng jalan di Pangerang, Johor, Malaysia	Granit, fillit, serpih, sabak, batupasir, dan sekis. Granit $27$ kN/m <sup>3</sup> , JCS $250$ MPa	Tinggi lereng $10$ s.d. $15$ m	Di permukaan, Elevasi $12$ s.d. $35$ meter	Analisis kinematik, survey udara, pemetaan geologi, dan schmidth hammer	Pendekatan frekuensi rekahan digunakan untuk mengkuantifikasi kualitas massa batuan dan menilai kestabilan lereng	Dikhawatirkan ada potensi jatuhnya batuan karena $56\%$ lereng merupakan area terkekarkan, dan $26\%$ ditutupi material lempung lepas.	Junaid et al, 2022

## D. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelaahan terhadap referensi yang telah dipelajari:

1. Kerusakan massa batuan terjadi karena ukuran struktur penggalan yang besar menimbulkan konsentrasi *stress* yang semakin tinggi, terlebih pada kedalaman jauh dari permukaan.
2. Metode kuantifikasi kerusakan massa batuan terdiri dari solusi matematis, permodelan numerik, pengujian di laboratorium, monitoring insitu, dan empiris. Kombinasi metode yang sering diterapkan yaitu uji lab, model numerik, dan monitoring insitu.
3. Tingkat kerusakan dapat dipengaruhi oleh kedalaman dan kekuatan massa batuan. Tercatat massa batuan di lereng mengalami kerusakan hingga 18,24% dan massa batuan di terowongan mengalami kerusakan dari 40 s.d. 100%. Batuan padat membutuhkan energi yang lebih tinggi untuk rusak dibanding batuan berpori.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Kami menyampaikan terima kasih kepada semua rekan dosen, teknisi, dan mahasiswa di Laboratorium Geomekanika dan Peralatan Tambang; Laboratorium Vulkanologi dan Panas Bumi; Laboratorium Instrumentasi dan Elektronika Geofisika; Laboratorium Mineralogi, Mikroskopi, dan Geokimia; serta Center of Research Excellence (CORE) Underground Mining and Mine Safety, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan Institut Teknologi Bandung atas kerjasamanya, fasilitas, dan dukungannya. Artikel ini merupakan salah satu luaran/publikasi yang didanai pada Program Riset ITB tahun 2022.

## DAFTAR PUSTAKA

- Agliardi, F., Crosta, G. B., Meloni, F., Valle, C., Rivolta, C. (2013): Structurally-controlled instability, damage and slope failure in a porphyry rock mass, *Tectonophysics*, **605**, 34–47.
- Cai, M., Kaiser, P.K., Martin, C.D. (2001): Quantification of rock mass damage in underground excavations from microseismic event monitoring, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **38**, 1135 – 1145.
- Cao, W., Durucan, S., Cai, W., Shi, J.Q., Korre, A., Jamnikar, S., Rošer, J., Lurka, A. Siata, R., (2020): The role of mining intensity and pre-existing fracture attributes on spatial, temporal and magnitude characteristics of microseismicity in longwall coal mining. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **53**(9), pp.4139-4162.
- Flores, G., Catalan, A. (2019): A transition from a large open pit into a novel “macroblock variant” block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **11**(3), 549-561.
- Gao, W., Chen, X., Hu, C., Zhou, C., Cui, S. (2020): New damage evolution model of rock material, *Applied Mathematical Modelling*, **86**, 207-224.
- Ghosh, G. K., Sivakumar, C. (2018): Application of underground microseismic monitoring for ground failure and secure longwall coal mining operation: a case study in an Indian mine. *Journal of Applied Geophysics*, **150**, 21-39.
- Gonzalez, Y. T., Schaefer, V., Rollins, D. K. (2022): Applications of Statistical Design of Experiments to Study the Factor of Safety of Unreinforced Slopes. In *Proceedings of the technical sessions of the international foundations congress & equipment expo ASCE*, Dallas, Texas, May 10-14, 2021.
- Goodale, E. I. T. J., & Fisher, B. (2021): Global stability assessment of open pit slopes using LEM and FEM: A comparison between the factor of safety and strength reduction factor. In *The Evolution of Geotech-25 Years of Innovation* (pp. 436-442). CRC Press.
- Ghaychi Afrouz, S., & Westman, E. C. (2018): Review and simulation of passive seismic tomography in block cave mining. In *Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Australian

- Centre for Geomechanics, Perth.
- Hidayat, W., Sahara, D. P., Widiyantoro, S., Suharsono, S., Wattimena, R. K., Melati, S., Putra, I.P.R.A., Prahastudhi, S., Sitorus, E., Riyanto, E. (2022): Testing the Utilization of a Seismic Network Outside the Main Mining Facility Area for Expanding the Microseismic Monitoring Coverage in a Deep Block Caving. *Applied Sciences*, **12**(14), 7265.
- Jeon, B., Jeong, H., Choi, S., & Jeon, S. (2022): Assessment of Subsidence Hazard in Abandoned Mine Area Using Strength Reduction Method. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1-21.
- Ji, L., Zhou, C., Lu, S. Jiang, N., Li, H. (2021): Modeling study of cumulative damage effects and safety criterion of surrounding rock under multiple full-face blasting of a large cross-section tunnel, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **147**, 104882.
- Junaid, M., Abdullah, R.A., Sa'ari, R., Rehman, H., Shah, K.S., Ullah, R., Alel, M.N.A., Zainal, Z., Zainuddin, N.E. (2022): Quantification of Rock Mass Condition Based on Fracture Frequency Using Unmanned Aerial Vehicle Survey for Slope Stability Assessment, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 1-14.
- Makarov, V.V., Guzev, M.A., Odintsev, V.N., Ksendzenko, L.S. (2016): Periodical zonal character of damage near the openings in highly-stressed rock mass conditions, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **8**, 164-169.
- Ma, C., Li, T., Zhang, H., Jiang, Y. Song, T. (2019): A method for numerical simulation based on microseismic information and the interpretation of hard rock fracture, *Journal of Applied Geophysics*, **164**, 214-224.
- Ma, T. H., Tang, C.A., Rang, S. B., Kuang, L., Yu, Q., Kong, D. Q. Zhu, X. (2018): Rockburst mechanism and prediction based on microseismic monitoring, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **110**, 177-188.
- Pakalnis, R., Brady, T. M., Hughes, P., Caceres, C., Ouchi, A. M., MacLaughlin, M. M. (2007): Weak Rock Mass Design For Underground Mining Operations; *Proceedings Of The International Workshop On Rock Mass Classification In Underground Mining*.
- Read, R.S. (2004): 20 years of excavation response studies at AECL's Underground Research Laboratory, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **41**, 1251 – 1275.
- Singh, B., Goel, R. K. (2011): *Engineering rock mass classification* (pp. 1755-1315). Boston: Butterworth-Heinemann.
- Tang, C., Li, L., Xu, N., Ma, K. (2015): Microseismic monitoring and numerical simulation on the stability of high-steep rock slopes in hydropower engineering, *International Journal of Rock Mechanics & Geotechnical Engineering*, **7**, 493 – 508.
- Torbica, S., Lapčević, V. (2015): Estimating extent and properties of blast-damaged zone around underground excavations, *Rem: Revista Escola de Minas*, **68**, 441-453.
- Vibert, C., Vaskou, P. (2011): Use of rock mass classifications for design: recommendations and suggestions. *In 12th ISRM Congress*. OnePetro.
- Wang, L., Yin, Y., Huang, B. Dai, Z., (2020): Damage evolution and stability analysis of the Jianchuandong Dangerous Rock Mass in the Three Gorges Reservoir Area, *Engineering Geology*, **265**, 105439.
- Wu, H., Fang, Q., Guo, Z. (2008): Zonal disintegration phenomenon in rock mass surrounding deep tunnels, *Journal of China University of Mining and Technology*, **18**(2), 187–193.
- Wu, F., Liu, J., Liu, T., Zhuang, H., Yan, C. (2009): A method for assessment of excavation damaged zone (EDZ) of a rock mass and its application to a dam foundation case, *Engineering Geology*, **104**(3-4), 254–262.
- Zhao, Y., Yang, T., Zhang, P., Zhou, J., Yu, Q., Deng, W. (2017): The analysis of rock damage process based on the microseismic monitoring and numerical simulations, *Tunnelling and Underground Space Technology*, **69**, 1-17.