

Artikel Penelitian

## **Perancangan Geometri Peledakan Berdasarkan Karakteristik Batuan dan Struktur Geologi Permukaan Hasil Pemetaan UAV pada Batuan Metamorf di Penambangan Emas**

### ***Blasting Geometry Design Based on Rock Characteristics and Surface Geological Structure of UAV Mapping Results on Metamorphic Rocks in Gold Mining***

Samantha Michelle Frampton<sup>1\*</sup>, Singgih Saptono<sup>1</sup>, Bagus Wiyono<sup>1</sup>, Nurkhamim<sup>1</sup>, Edy Nursanto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta, Jl. Padjajaran (Lingkar Utara), Yogyakarta, 55283, Indonesia

\*Penulis korespondensi

e-mail: 112200013@student.upnyk.ac.id

#### **ABSTRAK**

Ukuran fragmentasi hasil peledakan memegang peran penting dalam keberhasilan proses ekstraksi emas di PT J Resources Bolaang Mongondow. Permasalahan yang dihadapi adalah belum optimalnya rancangan peledakan akibat belum diperhitungkannya variasi karakteristik batuan berdasarkan tipe alterasi. Fragmentasi yang tidak sesuai sasaran menghambat proses pelindian dan menurunkan efisiensi operasional. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menentukan nilai Blastability Index (BI) dari berbagai tipe alterasi batuan metamorf dan menyusun rancangan geometri peledakan yang adaptif terhadap kondisi geologi setempat, sehingga diperoleh fragmentasi batuan dengan ukuran  $P80 \leq 10$  cm. Penelitian ini dilakukan untuk menentukan nilai Blastability Index (BI) berdasarkan parameter geoteknik dari berbagai tipe alterasi batuan, serta menyusun rancangan geometri peledakan adaptif menggunakan pendekatan teoritis C.J. Konya, R.L. Ash, dan ICI Explosive. Penelitian melibatkan pemetaan struktur geologi menggunakan UAV dan fotogrametri, pengukuran BI dengan metode Lilly (1986), analisis fragmentasi aktual menggunakan Split Desktop, serta simulasi fragmentasi teoritis dengan model Kuz-Ram. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan Konya menghasilkan fragmentasi paling mendekati target ( $P80 \leq 10$  cm), terutama pada batuan dengan RF tinggi. Model Kuz-Ram efektif memprediksi distribusi ukuran berdasarkan nilai A dari BI. Pendekatan berbasis BI terbukti efisien dan adaptif, serta mampu meningkatkan kinerja pelindian. Oleh karena itu, rancangan geometri peledakan berbasis Konya direkomendasikan untuk diterapkan di lokasi penelitian.

Kata Kunci: *Blastability Index*, Geometri Peledakan, Fragmentasi peledakan, Model Kuz-Ram, UAV

#### **ABSTRACT**

*The blast fragmentation size plays a crucial role in the success of the gold extraction process at PT J Resources Bolaang Mongondow. The current issue lies in the suboptimal blasting design, which does not consider the variability of rock characteristics based on alteration types. Inadequate fragmentation hampers the leaching process and reduces operational efficiency. Therefore, this study was conducted to determine the Blastability Index (BI) for various types of metamorphic rock alterations and to develop an adaptive blasting geometry design that fits the local geological conditions, aiming for a target fragmentation size of  $P80 \leq 10$  cm. This research involved determining the BI values based on geotechnical parameters from several alteration types and designing an adaptive blasting geometry using the theoretical approaches of C.J. Konya, R.L. Ash, and ICI Explosive. Geological structure mapping was carried out using UAV and photogrammetry. BI values were calculated using Lilly's (1986) method, actual fragmentation was analyzed using Split Desktop, and theoretical fragmentation was simulated using the Kuz-Ram model. The results show that the Konya approach produced the most optimal*

|                           |                |
|---------------------------|----------------|
| Naskah masuk              | : 02 Juni 2025 |
| Revisi pertama            | : 25 Juni 2025 |
| Naskah diterima           | : 26 Juni 2025 |
| Naskah dipublikasi online | : 26 Juni 2025 |

fragmentation, meeting the  $P80 \leq 10$  cm target, especially in rocks with high RF values. The Kuz-Ram model effectively predicted size distribution based on the A value derived from BI. The BI-based design approach proved efficient and adaptable, significantly improving leaching performance. Therefore, the Konya-based blasting geometry design is recommended for implementation at the study site.

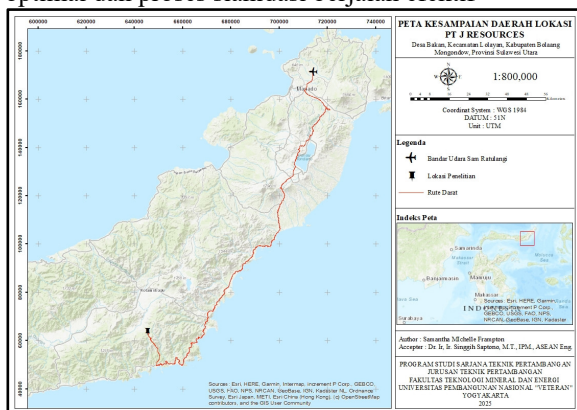
**Keywords:** Blastability Index, Blasting geometry, Blast fragmentation, Kuz-Ram model, UAV.

## I. PENDAHULUAN

PT J Resources Bolaang Mongondow merupakan perusahaan tambang emas di Desa Bakan, Kabupaten Bolaang Mongondow, Sulawesi Utara. Kegiatan penambangan dilakukan di area seluas 196,5 hektar dengan metode tambang terbuka (*open pit mining*) dan pengolahan bijih menggunakan metode *heap leach*. Proses penambangan mencakup tahapan pengeboran dan peledakan yang penting karena batuan induk tergolong keras dengan nilai *point load strength* ( $Is_{50}$ )  $> 2,4$  MPa dan *fracture spacing*  $> 1,8$  meter (Read & Stacey, 2009), sehingga membutuhkan peledakan untuk peremukan.

Keberhasilan peledakan ditentukan oleh keselamatan, pencapaian target produksi, stabilitas dinding, efisiensi bahan peledak, dan fragmentasi yang baik (Koesnaryo, 2001). Dalam sistem *heap leach* yang digunakan, hasil peledakan harus berukuran  $< 10$  cm karena tidak melalui proses peremukan (*crushing*). Namun, desain peledakan saat ini hanya didasarkan pada klasifikasi material ore dan waste tanpa mempertimbangkan variasi karakteristik batuan, sehingga sering ditemukan bongkahan besar yang menghambat proses sianidasi dan menurunkan *gold recovery*.

Fragmentasi yang sesuai dapat dicapai dengan perancangan geometri peledakan berbasis karakteristik batuan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai faktor batuan berdasarkan jenis alterasi pada batuan metamorf menggunakan pendekatan *blastability index*, serta merancang geometri peledakan yang sesuai agar fragmentasi optimal dan proses sianidasi berjalan efektif



Gambar 1. Peta Kesampaian Daerah

## II. METODE

Penelitian ini dilakukan di area penambangan emas PT J Resources Bolaang Mongondow yang

didominasi batuan metamorf teralterasi. Tujuan penelitian adalah merancang geometri peledakan berdasarkan karakteristik alterasi batuan dan struktur geologi permukaan. Akuisisi data dilakukan menggunakan drone DJI Mavic 2 Pro dengan pengukuran RTK (*Real-Time Kinematic*) untuk memastikan akurasi tinggi. Data pemetaan diproses dengan Agisoft Metashape untuk menghasilkan model 3D permukaan.

Tipe alterasi batuan diidentifikasi melalui analisis rona warna, tekstur, dan kenampakan geologi lapangan serta pada model 3D. Zona alterasi yang terbentuk kemudian menjadi dasar pembagian wilayah untuk analisis peledakan. Struktur geologi dianalisis dengan CloudCompare, dengan perhitungan jarak antar bidang diskontinuitas (*joint spacing*) menggunakan fitur *point picking* dan *point-to-distance*, yang digunakan untuk menganalisis karakteristik massa batuan.

Perhitungan *Blastability Index* (BI) mengacu pada metode Lily (1986), yang mempertimbangkan parameter geoteknik seperti kekuatan batuan (UCS), spasi diskontinuitas, dan kondisi bidang diskontinuitas. Nilai BI digunakan untuk menentukan tingkat kesulitan peledakan dan menghitung faktor batuan yang menjadi dasar dalam merancang geometri peledakan, termasuk *burden*, *spacing*, *stemming*, dan kedalaman lubang. Rancangan geometri peledakan disusun berdasarkan teori Konya (1990), R.L. Ash (1963), serta panduan teknis ICI Explosives (1993). Parameter-parameter ini disesuaikan dengan nilai BI dan kondisi geologi permukaan untuk mengoptimalkan distribusi energi peledakan.

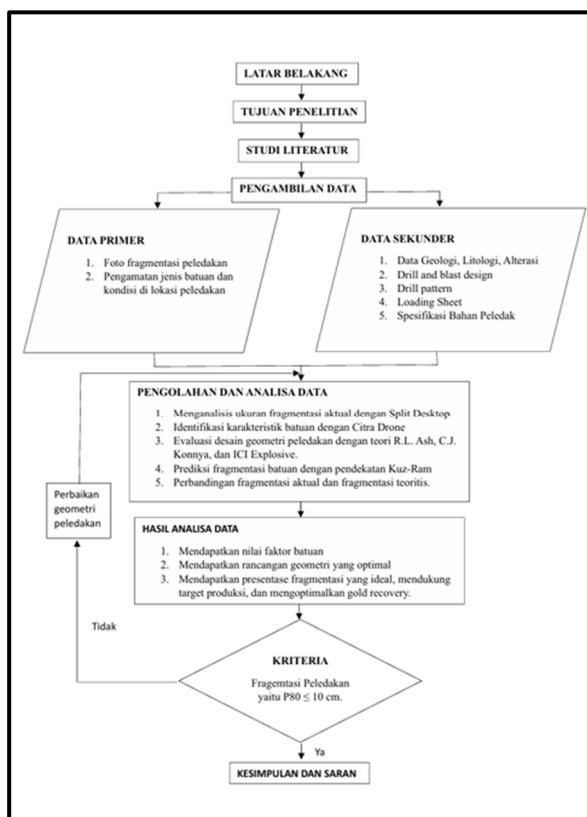
Evaluasi fragmentasi aktual dilakukan menggunakan perangkat lunak Split-Desktop, berdasarkan dokumentasi hasil peledakan di lapangan. Prediksi ukuran fragmentasi dilakukan menggunakan model Kuz-Ram untuk memperkirakan ukuran fragmen yang dihasilkan dari desain geometri peledakan yang diusulkan. Adapun diagram alir penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

Target fragmentasi ditetapkan pada ukuran  $P80 \leq 10$  cm, guna memastikan kelulusan material dalam proses pelindian, yang mendukung tujuan penelitian untuk menghasilkan rancangan peledakan yang optimal, menghasilkan fragmentasi terkendali, dan mendukung proses pemuatan serta pengolahan logam.

## III. HASIL

Hasil penelitian ini diawali dengan integrasi data pemetaan UAV dan pengukuran GNSS RTK untuk membangun model topografi 3D resolusi tinggi

(Gambar 2). Model ini mengidentifikasi sebaran alterasi batuan (*Silica Massive*, *Silica Advanced Argillic*, *Argillic*) dan struktur kekar dominan, yang menjadi dasar pembagian empat blok peledakan (635 AD, 635 AC, 630 AA, 630 AB). Analisis karakteristik fisik-mekanik (Tabel 1) menunjukkan variasi kekuatan batuan, dengan *Silica Massive* (UCS 32,58 MPa) sebagai tipe terkeras. Nilai *Blastability Index* (BI) dihitung untuk setiap blok, menghasilkan faktor batuan (A) antara 3,51–5,35, yang selanjutnya digunakan dalam simulasi fragmentasi model Kuz-Ram. Hasil fragmentasi aktual (P80: 11,73–53,73 cm) menunjukkan bahwa pendekatan Konya berpotensi mencapai target P80  $\leq 10$  cm pada batuan dengan nilai BI tinggi, seperti blok 635 AD (A=5,23) C.J. Konya untuk mencapai target P80  $\leq 10$  cm.



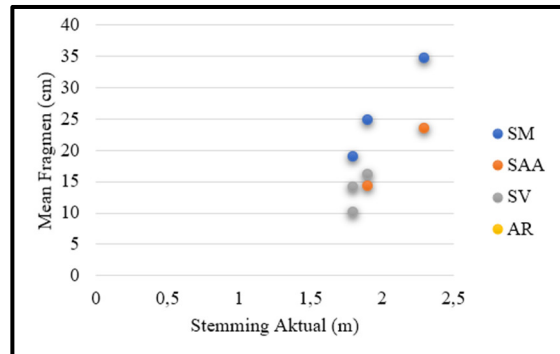
Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

### Distribusi Fragmentasi Aktual

Penelitian ini mengevaluasi pencapaian target fragmentasi ore PT J Resources Bolaang Mongondow (P80  $\leq 10$  cm) melalui analisis foto digital menggunakan *smartphone* dengan *safety helm* 30 cm sebagai skala referensi, diproses menggunakan Split Desktop 4.0. Hasil analisis menunjukkan variasi ukuran fragmentasi aktual (P80: 11,73–53,73 cm) dan persentase material lolos  $\leq 10$  cm (24–76%). Sebanyak 2 dari 29 blok, yaitu 615 JJ (P80 13,40 cm; 72% lolos) dan 610 JL P2 (P80 11,73 cm; 76% lolos), mendekati target, sementara mayoritas blok belum mencapai standar. Variasi ini mengindikasikan perlunya optimasi geometri peledakan (*burden* dan *spacing*),

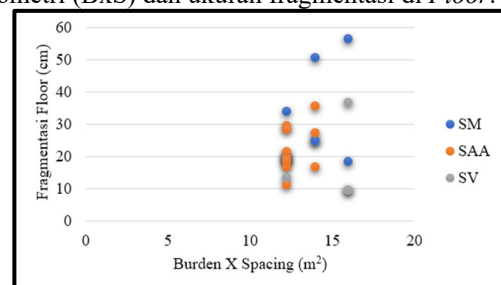
terutama pada blok dengan nilai P80 tinggi (misal: 610 JJ, P80 53,77 cm; 33% lolos).

Analisis vertikal dan pengaruh alterasi batuan (*Silica Massive*, *Silica Vuggy*, *Silica Advanced Argillic*) terhadap fragmentasi memperlihatkan perbedaan signifikan antara bagian atas (*Top*) dan bawah (*Floor*). Contohnya, pada blok 655 AO, fragmentasi SM di *Top* (P80 42,41 cm) lebih kasar dibanding *Floor* (P80 38,12 cm).



Gambar 3 Hubungan Stemming Terhadap Top Fragmentation

Gambar 3.1. di atas mengonfirmasi bahwa peningkatan *stemming* berdampak pada penurunan ukuran fragmentasi di *Top*, sedangkan Gambar 3.2. di bawah ini menunjukkan korelasi negatif antara lebar geometri (BxS) dan ukuran fragmentasi di *Floor*.



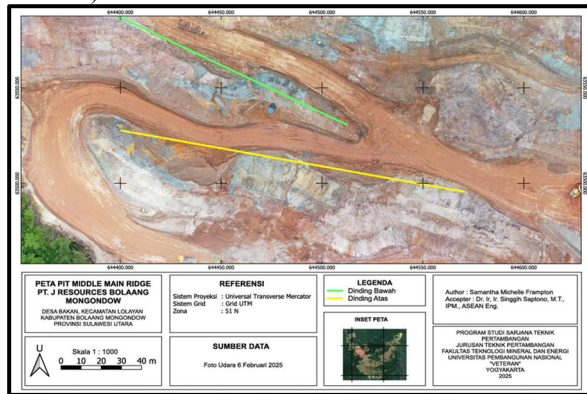
Gambar 4 Hubungan BxS Terhadap Floor Fragmentation

Temuan ini menegaskan bahwa optimasi parameter peledakan, seperti penyesuaian geometri dan *stemming*, dapat meningkatkan efisiensi fragmentasi untuk mencapai target operasional. Kedua grafik menjadi dasar rekomendasi desain peledakan yang lebih presisi, dengan mempertimbangkan variasi alterasi dan distribusi vertikal batuan

### Data Struktur Batuan dengan UAV dan GNSS

Penelitian ini mengintegrasikan teknologi UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) dan GNSS (*Global Navigation Satellite System*) untuk akuisisi data struktur batuan guna perhitungan *Blastability Index* (BI). Pemetaan topografi dan struktur kekar dilakukan dengan drone DJI Mavic 2 Pro (resolusi 1,4 cm/piksel, 483 foto) yang dikombinasikan dengan pengukuran GNSS RTK (akurasi horizontal  $< 3$  cm) untuk. Hasil pemetaan menunjukkan sebaran alterasi batuan dan struktur kekar pada area 0,4 hektare

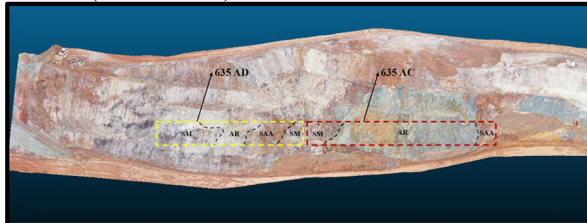
Gambar IV.3, yang menjadi dasar pembagian blok usulan geometri peledakan (635 AD, 635 AC, 630 AA, 630 AB).



Gambar 5. Peta Lokasi Usulan Geometri Peledakan

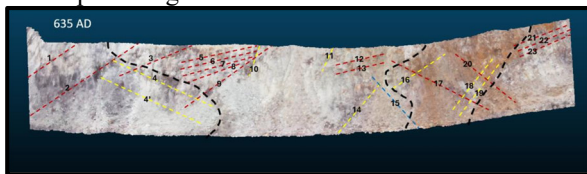
### Model 3D Permukaan dan Struktur Kekar

Pemodelan 3D permukaan batuan menggunakan fotogrametri UAV menghasilkan visualisasi domain alterasi (Gambar 3.4) di bawah ini.



Gambar 6. Hasil Analisis Alterasi Pada Blok Usulan

Pemodelan juga dilakukan pada struktur kekar (Gambar 3.4). Proses ini melibatkan digitasi bidang rekahan dengan CloudCompare untuk menentukan *Joint Plane Spacing* (JPS), hasil pemodelan memperlihatkan dominasi struktur rekahan dengan orientasi tertentu, yang sesuai dengan klasifikasi Bieniawski (1989). Data ini digunakan dalam perhitungan BI.



Gambar 7. Hasil Digitasi Struktur Kekar

### Karakteristik Massa Batuan

Karakteristik massa batuan dianalisis melalui parameter fisik-mekanik (Tabel 3.1) seperti *Specific Gravity* (SG) dan *Unconfined Compressive Strength* (UCS). Batuan *Silica Massive* (SM) memiliki SG tertinggi (2,44) dan UCS 32,58 MPa, sedangkan *Advanced Argillic* (AR) paling lemah (UCS 7,27 MPa).

Tabel 1. Sifat Fisik dan Mekanik Batuan

| Parameter                    | SM    | SAA   | AR   |
|------------------------------|-------|-------|------|
| <i>Specific Gravity</i> (SG) | 2,44  | 2,36  | 2,11 |
| UCS (MPa)                    | 32,58 | 12,98 | 7,27 |

Perhitungan faktor batuan (A) menggunakan *Blastability Index* (BI) Lilly (1986) memanfaatkan parameter geoteknik (RMD, JPS, JPO, SGI, H) untuk merancang geometri peledakan. Pembobotan parameter menghasilkan nilai BI dan A, seperti tertuang dalam Tabel 1.2 di bawah ini untuk Blok 635 AD, 635 AC, 630 AA, dan 630 AB.

Tabel 2. Nilai Faktor Batuan Berdasarkan Lilly (1986)

| Parameter  | SM1   | AR    | SAA   | SM2   |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| RMD        | 20    | 10    | 15    | 30    |
| JPS        | 25    | 15    | 20    | 17    |
| JPO        | 30    | 30    | 30    | 30    |
| 635 AD SGI | 10,93 | 2,77  | 8,89  | 10,93 |
| H          | 1,18  | 0,65  | 0,77  | 1,18  |
| BI         | 43,56 | 29,21 | 37,22 | 44,56 |
| A          | 5,23  | 3,51  | 4,48  | 5,35  |
| RMD        | 17    | 10    | 16    |       |
| JPS        | 20    | 21    | 20,5  |       |
| JPO        | 30    | 30    | 30    |       |
| 635 AC SGI | 10,93 | 2,77  | 8,89  |       |
| H          | 1,18  | 0,65  | 0,77  |       |
| BI         | 39,56 | 32,21 | 38,08 |       |
| A          | 4,75  | 3,87  | 4,57  |       |
| RMD        |       | 10    | 13    |       |
| JPS        |       | 20    | 24    |       |
| JPO        |       | 30    | 30    |       |
| 630 AA SGI |       | 2,77  | 8,89  |       |
| H          |       | 0,65  | 0,77  |       |
| BI         |       | 31,71 | 38,33 |       |
| A          |       | 3,81  | 4,60  |       |
| RMD        | 15    |       | 14    |       |
| JPS        | 20    |       | 20    |       |
| JPO        | 30    |       | 30    |       |
| 630 AB SGI | 10,93 |       | 8,89  |       |
| H          | 1,18  |       | 0,77  |       |
| BI         | 38,56 |       | 36,83 |       |
| A          | 4,63  |       | 4,42  |       |

### Pengaruh Karakteristik Bahan Peledak pada Estimasi Fragmentasi Model Kuz-Ram

Estimasi fragmentasi menggunakan model Kuz-Ram pada penelitian ini didasarkan pada karakteristik teknis bahan peledak Dabex 64, seperti densitas (2,16 g/cc), kecepatan detonasi (4730 m/s), dan *relative bulk strength* (RBS=108) (Tabel IV.7). Parameter ini menentukan akurasi prediksi ukuran fragmentasi, terutama pada batuan keras dengan kelembaban tinggi. Analisis menunjukkan bahwa RBS dan VOD berperan krusial dalam optimasi desain geometri peledakan untuk mencapai target fragmentasi.

Tabel 3. Spesifikasi Bahan Peledak DABEX 64

| Karakteristik | DABEX 64 |
|---------------|----------|
| Dstd (g/cc)   | 2,56     |
| D (g/cc)      | 2,16     |
| SGstd (g/cc)  | 1,2      |
| SG (g/cc)     | 1,28     |

|             |       |
|-------------|-------|
| Vestd (m/s) | 4000  |
| Ve (m/s)    | 4730  |
| RWS         | 90    |
| RBS         | 108   |
| De (kg/m)   | 10,45 |

## PEMBAHASAN

Bagian ini menganalisis efektivitas rancangan peledakan dan hubungan parameter teknis terhadap kualitas fragmentasi batuan. Data lapangan dan pengolahan citra UAV menggunakan *Split Desktop* menjadi dasar evaluasi fragmentasi aktual. Selain itu, dihitung *Blastability Index* berdasarkan parameter geoteknis batuan serta fragmentasi teoritis menggunakan model *Kuz-Ram*. Hasil fragmentasi aktual dibandingkan dengan prediksi teoritis untuk menilai akurasi rancangan peledakan. Analisis juga membahas korelasi antara *Blastability Index* dan ukuran fragmentasi dengan pendekatan analitis berbasis data lapangan dan teori terkait. Pembahasan mencakup aspek geometri peledakan, sifat batuan, serta kinerja fragmentasi untuk memberikan pemahaman komprehensif dalam optimasi desain peledakan.

### Analisis Fragmentasi Aktual

Analisis fragmentasi aktual menggunakan *Split Desktop* menunjukkan hanya dua dari 29 blok (615 JJ dan 610 JL P2) yang mendekati target  $P80 \leq 10$  cm, dengan nilai masing-masing 13,40 cm (72% lolos) dan 11,73 cm (76% lolos). Sebagian besar blok lainnya menunjukkan fragmentasi lebih kasar ( $P80$  rata-rata 25,03 cm, maksimal 53,77 cm), yang berpotensi mengurangi efisiensi *heap leaching* akibat berkurangnya luas permukaan kontak bijih-larutan. Variasi hasil ini disebabkan oleh perbedaan karakteristik batuan (terutama pada zona *Silica Massive* dan *breksi diatrema*) serta desain peledakan yang belum optimal, termasuk pengaruh panjang *stemming* dan *bottom priming* terhadap distribusi energi ledak di zona *top* dan *floor*.

### 4.2. Analisis Pengambilan Data Struktur Batuan

Pengambilan data struktur batuan dilakukan dengan fotogrametri UAV (DJI Mavic 2 Pro) didukung GNSS geodetik (Sokkia GRX3) untuk akurasi spasial <3 cm. Lima GCP dipasang strategis di area penelitian, dengan akuisisi data pada ketinggian 50 m (overlap 80%/60%) menghasilkan 483 foto beresolusi 1,4 cm/pixel. Data diproses menggunakan Agisoft Metashape untuk pembentukan model 3D *dense point cloud* yang memungkinkan analisis parameter geoteknik seperti *Joint Plane Spacing* (JPS).

Meskipun efisien, metode ini memiliki keterbatasan pada kondisi cuaca buruk dan permukaan batuan reflektif. Oleh karena itu, verifikasi lapangan tetap diperlukan untuk memastikan akurasi data, khususnya di area kompleks seperti lereng tambang. Integrasi antara teknologi UAV dengan pengukuran

konvensional memberikan hasil yang lebih komprehensif untuk analisis struktur batuan.

### Analisis 3D Pemodelan Dinding

Pemodelan 3D menggunakan fotogrametri UAV dan GNSS berhasil mengidentifikasi karakteristik batuan dan pola kekar di area penelitian. Model 3D yang dihasilkan melalui Agisoft Metashape menunjukkan tiga zona alterasi utama: argilik (tekstur halus), *silica massive* (permukaan padat), dan *advance argilik* (tekstur kasar). Analisis lebih lanjut dengan CloudCompare mengungkapkan pola rekahan dominan berorientasi vertikal hingga sub-vertikal dengan distribusi tidak merata, sesuai dengan struktur regional berarah timur laut-barat daya (NE-SW).

Analisis pada dinding bawah (elevasi 630 mdpl) menunjukkan kompleksitas pola rekahan yang lebih tinggi dibanding bagian atas, dengan dominasi alterasi argilik dan silika granular. Pola rekahan di zona ini bervariasi dari vertikal hingga silang, dengan kerapatan tertinggi di bagian tengah hingga bawah lereng. Data ini menjadi dasar penting untuk penentuan parameter peledakan dan perhitungan *blastability index*, sekaligus menunjukkan efektivitas metode fotogrametri dalam karakterisasi batuan tambang.

### Analisis Karakteristik Massa Batuan

Pendekatan *Blastability Index* (BI) digunakan untuk mengevaluasi karakteristik massa batuan dalam kaitannya dengan efektivitas peledakan. Hasil analisis menunjukkan variasi signifikan nilai BI antar zona alterasi, dimana *Silica Massive* (SM) mencatat nilai tertinggi (BI 44.56; A 5.35) dengan SG 2.44 dan UCS 32.58 MPa, sementara zona *Argilik* (AR) menunjukkan nilai terendah (BI 29.21; A 3.51) dengan SG 2.11 dan UCS 7.27 MPa. Perbedaan ini secara jelas menggambarkan korelasi kuat antara sifat fisik-mekanik batuan dengan kebutuhan energi peledakan, dimana batuan lebih keras dan masif memerlukan energi ledak lebih besar.

Analisis lebih lanjut mengungkap bahwa nilai BI tidak hanya dipengaruhi oleh parameter fisik seperti SG dan UCS, tetapi juga oleh karakteristik struktur rekahan (*Joint Plane Spacing* dan *Orientation*). Temuan ini konsisten dengan teori fragmentasi batuan yang menyatakan bahwa massa batuan dengan rekahan lebih rapat cenderung menghasilkan fragmentasi lebih halus dengan energi ledak lebih rendah. Data BI ini menjadi dasar kuantitatif penting untuk optimasi desain peledakan, khususnya dalam penyesuaian parameter geometri dan beban bahan peledak sesuai kondisi litologi spesifik di tiap blok penambangan.

### Analisis Geometri Teoritis dan Fragmentasi

#### Kuz-Ram

Analisis fragmentasi menggunakan model Kuz-Ram dilakukan berdasarkan tiga pendekatan teoritis desain geometri peledakan, yaitu metode C.J. Konya, R.L. Ash, dan ICI Explosive. Tujuan analisis ini adalah

mengevaluasi efektivitas rancangan geometri dalam mencapai target fragmentasi perusahaan, yaitu 80% material (P80) berukuran  $\leq 10$  cm. Nilai faktor batuan (RF) yang dihitung dari *Blastability Index* (BI) digunakan sebagai parameter A pada model Kuznetsov, yang secara langsung memengaruhi ukuran rata-rata fragmentasi ( $\bar{X}$ ). Hasil perhitungan fragmentasi aktual menunjukkan perlunya optimasi geometri untuk meningkatkan perolehan *leaching*.

Tabel 5. Geometri C.J. Konya

| Parameter          | Rentang Niai                  | Fragmentasi Rerata ( $\bar{X}$ ) |
|--------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Burden (B)         | 3,00 – 3,60 m                 | 11,34 – 13,23 cm                 |
| Spacing (S)        | 3,25 – 3,78 m                 |                                  |
| Stemming (T)       | 1,50 – 1,80 m                 |                                  |
| Subdrilling (J)    | 0,60 – 0,72 m                 |                                  |
| Powder Factor (PF) | 0,60 – 0,88 kg/m <sup>3</sup> |                                  |
| Faktor Batuan (A)  | 3,51 – 5,35                   |                                  |

Tabel 4.1 menyajikan hasil perancangan geometri menggunakan metode C.J. Konya. Rentang *burden* (B) antara 3,00–3,60 meter menunjukkan adanya variasi yang dipengaruhi oleh penyesuaian *Blastability Index* (BI) serta faktor koreksi lapangan seperti *Kr*, *Kd*, dan *Ks*. Sementara itu, fragmentasi rerata ( $\bar{X}$ ) berada pada kisaran 11,34–13,23 cm, yang mencerminkan pengaruh *Rock Factor* (RF) dengan nilai  $A = 3,51$ – $5,35$ . Pada RF tinggi ( $A = 5,35$ ), diperoleh  $\bar{X} = 13,10$  cm yang melebihi target, sedangkan RF rendah ( $A = 3,51$ ) menghasilkan  $\bar{X} = 11,53$  cm, lebih mendekati ukuran yang diharapkan. Powder Factor (PF) berkisar antara 0,60–0,88 kg/m<sup>3</sup>, menunjukkan efisiensi penggunaan bahan peledak yang cukup seimbang. Namun, pada RF tinggi, diperlukan peningkatan PF untuk memperkecil ukuran fragmen. Kesimpulannya, metode ini cukup responsif terhadap variasi RF, tetapi perlu optimasi *spacing* dan *stemming* khususnya pada blok dengan RF >5 agar hasil fragmentasi lebih optimal.

Tabel 7. Geometri R.L. Ash

| Parameter          | Rentang Niai                  | Fragmentasi Rerata ( $\bar{X}$ ) |
|--------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Burden (B)         | 3,92 m (tetap)                | 19,69 – 25,93 cm                 |
| Spacing (S)        | 3,92 – 5,09 m                 |                                  |
| Stemming (T)       | 2,74 – 3,92 m                 |                                  |
| Subdrilling (J)    | 0,78 – 1,18 m                 |                                  |
| Powder Factor (PF) | 0,24 – 0,41 kg/m <sup>3</sup> |                                  |
| Faktor Batuan (A)  | 3,51 – 5,35                   |                                  |

Berdasarkan Tabel 4.2. Geometri R.L. Ash, nilai *burden* (B) tetap pada 3,92 m karena perhitungan *burden ratio* ( $K_b$ ) telah terkoreksi, sementara *spacing* (3,92–5,09m) dan *stemming* (2,74–3,92 m) bervariasi sesuai rasio yang ditetapkan. Namun, fragmentasi rerata ( $\bar{X}$ ) yang dihasilkan berkisar antara 19,69–25,93 cm, jauh melampaui target yang diinginkan. Hal ini disebabkan

oleh *powder factor* (PF) yang terlalu rendah (0,24–0,41 kg/m<sup>3</sup>) serta *burden* yang besar, sehingga energi peledakan tidak optimal untuk menghasilkan fragmentasi halus. Kesimpulannya, metode R.L. Ash kurang sesuai untuk lokasi penelitian karena menghasilkan fragmentasi yang terlalu kasar dan kurang responsif terhadap variasi *Rock Factor* (RF). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan geometri peledakan yang lebih optimal untuk meningkatkan hasil fragmentasi.

Tabel 6. Geometri ICI Explosive

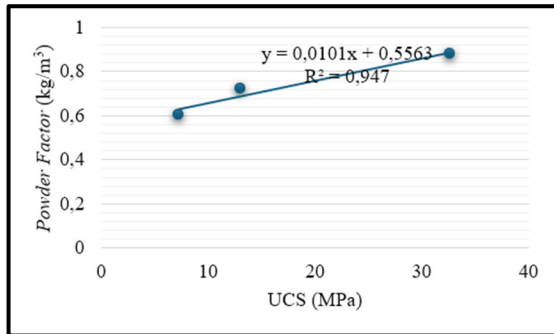
| Parameter          | Rentang Niai                  | Fragmentasi Rerata ( $\bar{X}$ ) |
|--------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Burden (B)         | 2,50 – 3,20 m                 | 9,95 – 11,87 cm                  |
| Spacing (S)        | 2,50 – 3,10 m                 |                                  |
| Stemming (T)       | 2,00 m                        |                                  |
| Subdrilling (J)    | 0,20 m                        |                                  |
| Powder Factor (PF) | 0,65 – 1,03 kg/m <sup>3</sup> |                                  |
| Faktor Batuan (A)  | 3,51 – 5,35                   |                                  |

Berdasarkan hasil analisis, *burden* (B) dengan rentang 2,50–3,20 m berhasil menghasilkan fragmentasi yang relatif halus. Hal ini disebabkan oleh nilai *burden* yang lebih kecil dan *spacing* yang rapat (2,50–3,10 m), sehingga distribusi energi peledakan lebih merata. Fragmentasi rerata ( $\bar{X}$ ) yang diperoleh berkisar antara 9,95–11,87 cm, yang memenuhi target P80 pada kondisi *Rock Factor* (RF) rendah ( $A=3,81$ ). Namun, pada RF tinggi ( $A=5,35$ ), nilai  $\bar{X}=11,87$  cm masih memerlukan optimasi lebih lanjut untuk mencapai ukuran yang lebih optimal. *Powder Factor* (PF) berada pada kisaran 0,65–1,03 kg/m<sup>3</sup>, menunjukkan penggunaan bahan peledak yang cukup intensif. Nilai PF yang tinggi ini turut mendukung tercapainya fragmentasi yang lebih halus.

Perbandingan ketiga metode mengindikasikan bahwa pendekatan C.J. Konya paling seimbang, sementara ICI Explosive lebih efektif untuk kondisi batuan dengan RF rendah. Model Kuz-Ram terbukti mampu memprediksi fragmentasi secara akurat dengan mempertimbangkan parameter RF, *burden*, dan *powder factor*. Hasil ini menjadi dasar rekomendasi optimasi geometri, seperti penyesuaian *spacing* dan *stemming* untuk mengurangi  $\bar{X}$  pada RF tinggi.

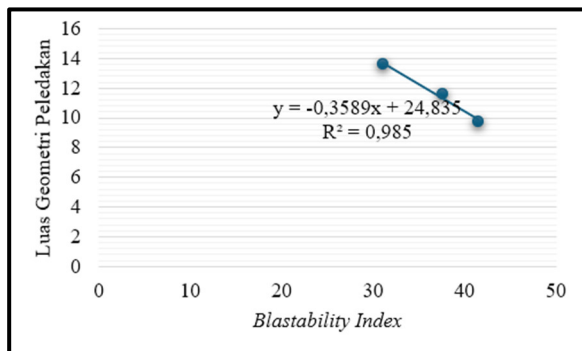
### Analisis Usulan Geometri

Rancangan geometri peledakan disusun berdasarkan pendekatan Konya, dengan mempertimbangkan kekuatan batuan (UCS), indeks *blastability* (BI), *powder factor* (PF), dan luas *burden* × *spacing*. Analisis korelasi menunjukkan bahwa UCS berbanding lurus dengan PF (Gambar 4.1.), dengan persamaan regresi linear  $y = 0,0101x + 0,5563$  dengan nilai koefisien determinasi  $R^2 = 0,947$ , yang mengindikasikan bahwa batuan lebih kuat memerlukan energi peledakan lebih besar.

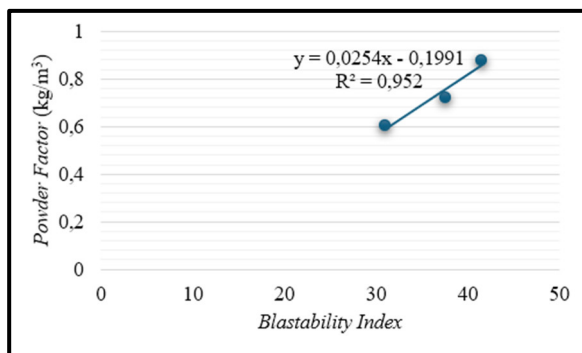


Gambar 8. Hubungan UCS Terhadap PF

Hubungan BI terhadap luas geometri menunjukkan korelasi negatif (Gambar 4.2), dengan persamaan regresi  $y = -0,3589x + 24,835$  dengan  $R^2 = 0,985$ , menandakan bahwa batuan dengan BI tinggi membutuhkan geometri peledakan yang lebih rapat. Sementara itu, hubungan positif antara BI dan PF (Gambar 4.3) dengan persamaan  $y = 0,0254x - 0,1991$  dengan  $R^2 = 0,952$  mendukung kecenderungan bahwa batuan yang sulit diledakkan memerlukan konsumsi bahan peledak lebih tinggi.

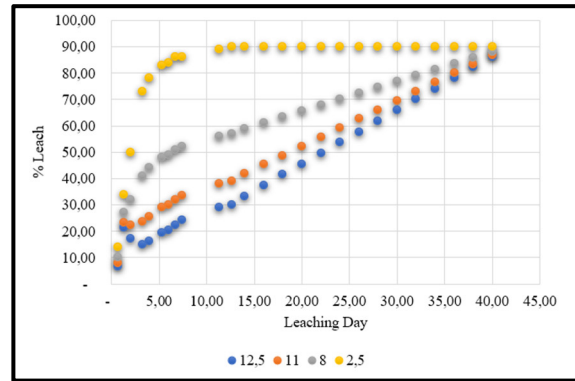


Gambar 9. Hubungan BI Terhadap Luas Geometri



Gambar 10. Hubungan BI Terhadap PF

Simulasi pelindian menunjukkan bahwa fragmentasi dari rancangan Konya ( $\bar{X} = 12\{, \}5$  cm) menghasilkan perolehan emas sebesar 82% dalam 38 hari, hanya berbeda satu hari dibandingkan ukuran fragmen lebih halus dari teori ICI (Gambar 4.4). Dengan efisiensi pengeboran dan konsumsi bahan peledak yang lebih baik, pendekatan Konya dinilai lebih optimal untuk diterapkan.



Gambar 11. Hubungan Jumlah Hari *Leaching* Terhadap Persen *Leaching*

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Nilai *Blastability Index* (BI) berhasil ditentukan untuk tiga tipe alterasi batuan metamorf: *Silica Massive*, *Silica Advance Argillic*, dan *Argillic*. Perbedaan nilai BI menunjukkan variasi tingkat kemudahan peledakan antar tipe batuan, yang menjadi dasar perancangan desain peledakan yang adaptif terhadap kondisi geologi lokal.
2. Penyesuaian desain geometri peledakan berdasarkan nilai BI terbukti menghasilkan fragmentasi yang lebih terkendali. Nilai BI tinggi memerlukan *burden-spacing* lebih rapat dan *powder factor* lebih besar. Pendekatan teoritis C.J. Konya, R.L. Ash, dan ICI Explosive mampu menyesuaikan desain dengan karakteristik massa batuan, sehingga fragmentasi lebih mendekati target  $P80 \leq 10$  cm.
3. Rancangan berbasis BI dengan pendekatan C.J. Konya paling efektif dalam menghasilkan fragmentasi yang halus dan seragam, serta mendukung efisiensi operasional, mulai dari pemuatan hingga proses *leaching* di lapangan.

Berikut saran yang dapat dilakukan dalam mengoptimalkan ukuran fragmentasi hasil peledakan untuk mencapai target *leaching ore*:

1. Disarankan dilakukan pengukuran langsung struktur geologi di lapangan, seperti *scanline mapping*, untuk memperkuat validasi nilai BI dari hasil fotogrametri.
2. Rancangan geometri peledakan berbasis teori C.J. Konya perlu diuji di lapangan guna mengevaluasi efektivitas aktual terhadap fragmentasi, pemuatan, dan *leaching*.
3. Integrasi data drone dan pengukuran langsung dalam evaluasi BI dianjurkan untuk meningkatkan keandalan desain peledakan pada kondisi geologi kompleks.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Saya mengucapkan terima kasih kepada keluarga

dan teman-teman atas dukungan moral dan motivasi yang tiada henti. Tidak lupa juga, saya berterima kasih kepada bapak dosen pembimbing saya dan rekan-rekan penelitian yang sudah memberikan masukan dan saran dalam penelitian ini serta tidak lupa ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan kontribusi dan dukungannya dalam proses penyusunan jurnal ini. Akhir kata, saya berharap jurnal ini dapat memberikan kontribusi positif dan menjadi referensi yang bermanfaat bagi penelitian-penelitian selanjutnya.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Adiansyah, J.S., 2021. Analisis Fragmentasi Peledakan dan Efisiensi Split Desktop terhadap Kinerja Unit Crusher di PT XYZ. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 17(2), pp. 85–92.
- Afeni, T.B. & Cawood, F.T., 2013. Application of UAV systems in mining. *The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 113(2), pp. 807–813.
- Ash, R.L., 1963. Design of Blasting Rounds. *Engineering and Mining Journal*, 164(3), pp. 91–96.
- Choudhary, B.S., Kumar, V. & Raina, A.K., 2012. Rock Fragmentation by Blasting – A Review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4(1), pp. 75–87.
- Choudhary, V., Pandey, V. & Jha, V.K., 2020. Use of Drones in Geological Mapping and Monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 41(10), pp. 3952–3973.
- Cunningham, C.V.B., 1983. The Kuz-Ram Fragmentation Model—20 Years On. *Explosives and Blasting Technique*, pp. 201–210.
- Eloranta, J.W., 1995. The Efficiency of Blasting Versus Crushing and Grinding. *Proc. International Symposium on Rock Fragmentation*, pp. 1–10.
- Gaunt, J., Symonds, D. & McNamara, G., 2015. Optimisation of Drill and Blast for Mill Throughput Improvement at Ban Houayxai Mine. *Proc. 11th International Mining Geology Conference*, pp. 101–110.
- Hustrulid, W.A. & Bullock, R.L., 2001. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- ICI Explosives, 1996. *Blasting Principles for Open Pit Mining*. ICI Australia Operations Pty Ltd.
- Kahrman, A., 2001. Analysis of Blasting Damage in an Underground Gold Mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(3), pp. 449–456.
- Kanchibotla, S.S., Valery, W. & Morrell, S., 1999. Fragmentation—The First Step in Comminution. *Proc. Explo 1999 Conference*, pp. 137–144.
- Konya, C.J. & Walter, E.J., 1990. *Rock Blasting and Overbreak Control*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Kuznetsov, V.M., 1973. The Mean Diameter of Fragments Formed by Blasting Rock. *Soviet Mining Science*, 9(2), pp. 144–148.
- Latham, J.P., Xiang, J. & Reddish, D.J., 2008. Modelling of Rock Fragmentation Using Digital Image Analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(1), pp. 134–144.
- Lopez, L.M. & Martin, R.C., 2011. Blast Design and Its Effect on Fragmentation in Open Pit Mines. *Mining Engineering*, 63(9), pp. 37–43.
- Mohamad, A.S., Suhardi, B. & Mustaffa, Z., 2015. Evaluation of Blast Fragmentation Using Split-Desktop Software. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(1), pp. 55–60.
- Morin, P., et al., 2007. Aerial Photogrammetry Using UAV for Mining Applications. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(10), pp. 1159–1165.
- Ouchterlony, F., 2005. The Swebrec Function: Linking Fragmentation by Blasting and Crushing. *Mining Technology*, 114(1), pp. 29–44.
- Persson, A., Holmberg, R. & Lee, J., 1994. *Rock Blasting and Explosives Engineering*. CRC Press.
- Sarma, D.S.R. & Murthy, V.M.S.R., 2002. Blasting Damage in Jointed Rocks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 20(3), pp. 197–210.
- Scott, A. & Onederra, I., 2015. Quantifying the Effect of Fragmentation on Haulage Efficiency. *Mining Technology*, 124(2), pp. 93–99.
- Sharma, P.D., 2016. Environmental Impact of Blasting Operations. *Journal of Environmental Management*, 179, pp. 147–157.
- Singh, P.K. & Narendrula, R., 2010. Blast Fragmentation and Its Impact on Crushing and Grinding. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(3), pp. 417–424.