

Rancangan Geometri Peledakan Berdasarkan Nilai *Blastability Index* di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk

Design of Blast Geometry Based on the Blastability Index at PT Semen Indonesia (Persero) Tbk

Muhamad Fauzi Al Hakim¹, Siti Aminah²

Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Jember,
e-mail penulis : siti.aminah@unej.ac.id

ABSTRAK

PT Semen Indonesia (Persero) Tbk merupakan perusahaan milik negara (BUMN) yang bergerak di sektor industri pertambangan batu gamping. Permasalahan utama dalam kegiatan peledakan di lokasi penelitian adalah tingginya proporsi boulder (>75 cm) yang mencapai 46,75%, melebihi ambang toleransi perusahaan sebesar 15%. Penelitian ini bertujuan untuk merancang geometri peledakan berdasarkan nilai Blastability Index (BI) guna mengoptimalkan hasil fragmentasi batuan di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pendekatan BI dipilih karena mampu memperhitungkan karakteristik geoteknik batuan yang meliputi lima parameter utama: *Rock Mass Description* (RMD), *Joint Plane Spacing* (JPS), *Joint Plane Orientation* (JPO), *Specific Gravity Influence* (SGI), dan *Hardness*. Nilai BI yang diperoleh sebesar 61,5 mengindikasikan bahwa batuan tergolong sedang hingga relatif sulit diledakkan. Berdasarkan nilai BI dan metode empiris Lilly, diperoleh rancangan geometri peledakan dengan *burden* 3,2 m dan *spacing* 3,68 m. Hasil perhitungan fragmentasi menggunakan model *Kuz-Ram* menunjukkan ukuran rata-rata fragmen sebesar 33,08 cm dengan indeks keseragaman 2,06, yang tergolong ideal. Hasil ini dibandingkan dengan kondisi aktual yang menunjukkan *burden* 2,5 m dan *spacing* 3,6 m dengan fragmentasi yang tidak memenuhi target. Rancangan berdasarkan BI terbukti meningkatkan efisiensi fragmentasi dan mengurangi persentase boulder secara signifikan. Penelitian ini merekomendasikan penerapan desain berbasis BI untuk meningkatkan efektivitas peledakan di masa mendatang.

Kata kunci: *Blastability Index, Geometri Peledakan, Kuz – ram, Fragmentasi.*

ABSTRACT

PT Semen Indonesia (Persero) Tbk is a state-owned enterprise (SOE) engaged in the limestone mining industry. The main issue in blasting activities at the research site is the high proportion of boulders (>75 cm), reaching 46.75%, which exceeds the company's tolerance limit of 15%. This study aims to design blasting geometry based on the Blastability Index (BI) to optimize rock fragmentation at PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. The BI approach was chosen because it accounts for the geotechnical characteristics of the rock, including five main parameters: Rock Mass Description (RMD), Joint Plane Spacing (JPS), Joint Plane Orientation (JPO), Specific Gravity Influence (SGI), and Hardness. The BI value obtained was 61.5, indicating that the rock is classified as moderate to relatively difficult to blast.

How to Cite:

Hakim, M.F.A., Aminah, S. 2025. Rancangan Geometri Peledakan Berdasarkan Nilai *Blastability Index* di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. *Mining Science and Technology Journal*, 4 (2): 117 – 130.

Published By:

Program Studi Teknik Pertambangan
Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Tenggara

Address:

Jl. Kapt. Piere Tendean, No. 109, Baruga, Kota
Kendari, Provinsi Sulawesi Tenggara

Article History:

Submit 28 July 2025
Received in from 30 August 2025
Accepted 30 August 2025

Based on the BI value and Lilly's empirical method, the proposed blasting geometry design consists of a burden of 3.2 m and spacing of 3.68 m. Fragmentation results calculated using the Kuz-Ram model showed an average fragment size of 33.08 cm with a uniformity index of 2.06, which is considered ideal. These results were compared with the actual conditions, which used a burden of 2.5 m and spacing of 3.6 m, resulting in suboptimal fragmentation. The BI-based design has proven to improve fragmentation efficiency and significantly reduce the proportion of boulders. This study recommends the implementation of BI-based designs to enhance blasting effectiveness in the future.

Keywords: *Blastability Index, Geometry, Kuz – Ram, Fragmentation .*

PENDAHULUAN

PT Semen Indonesia (Persero) Tbk merupakan perusahaan milik negara (BUMN) yang bergerak di sektor industri pertambangan batu gamping dan berlokasi di Kecamatan Kerek, Kabupaten Tuban, Provinsi Jawa Timur. Kegiatan penambangan yang dilakukan oleh perusahaan ini menggunakan sistem tambang terbuka (*open pit mining*). Rangkaian aktivitas penambangan dimulai dari tahap eksplorasi, pembukaan wilayah kerja, pengambilan material batuan, hingga proses pengolahan yang berujung pada produksi semen. Untuk memperkecil ukuran batu gamping yang memiliki tingkat kekerasan tinggi dan sulit dihancurkan dengan alat mekanis, perusahaan menerapkan metode peledakan (*blasting*). Peledakan sendiri merupakan teknik penghancuran massa batuan dalam skala besar menggunakan bahan peledak, sehingga material dapat dengan lebih mudah digali dan diangkut. Salah satu variabel penting yang memengaruhi efektivitas peledakan adalah parameter geometri peledakan (Safarudin dkk., 2016). Geometri peledakan merupakan desain awal sebelum dilakukannya peledakan yang meliputi *burden, spacing, stemming, powder coloumn, subdrilling*, diameter lubang ledak dan kedalaman lubang tembak (Adam Rhisky dkk., 2021).

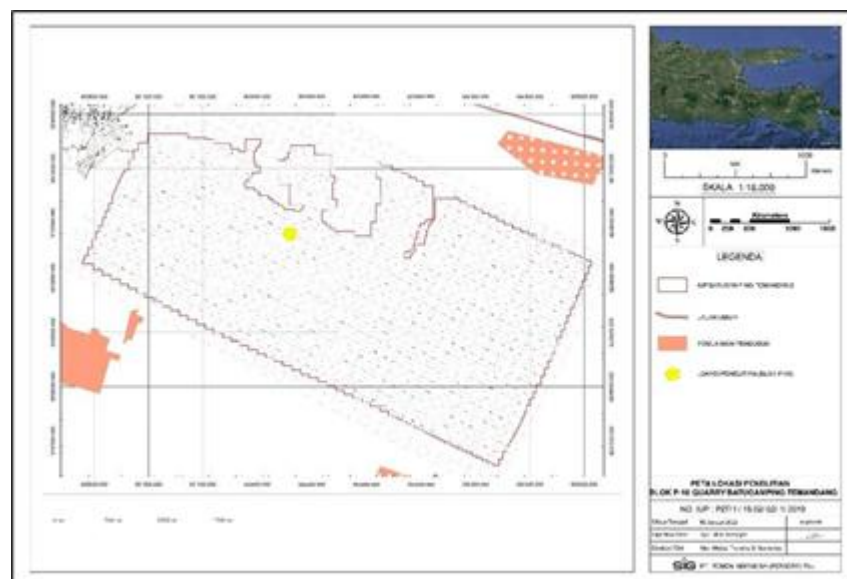
Dalam kegiatan peledakan pada sektor pertambangan, permasalahan umum yang sering muncul adalah hasil fragmentasi yang tidak sesuai harapan, seperti terbentuknya material berukuran besar (*boulder*) dalam jumlah berlebih serta penggunaan bahan peledak yang kurang efisien. Hal ini umumnya disebabkan oleh perancangan geometri peledakan yang tidak mempertimbangkan sifat geomekanik massa batuan secara menyeluruh. Di lingkungan operasional PT Semen Indonesia Tbk., ditemukan isu serupa terkait hasil fragmentasi, di mana proporsi boulder melebihi batas yang telah ditetapkan oleh perusahaan. Target maksimal ukuran fragmentasi yang diharapkan adalah ≤ 75 cm, namun kenyataannya sebesar 46,75% dari material hasil peledakan memiliki ukuran melebihi batas tersebut, sementara ambang toleransi boulder yang diperbolehkan hanya sebesar $\leq 15\%$. Ketidaksihinggaan ini disinyalir terjadi akibat geometri peledakan yang tidak dirancang berdasarkan pendekatan geomekanika batuan. Oleh karena itu, dibutuhkan penerapan pendekatan baru berbasis Blastability Index (BI) sebagai solusi untuk mengoptimalkan hasil fragmentasi.

Blastability Index (BI) merupakan suatu indeks yang digunakan untuk menilai tingkat kemudahan suatu massa batuan dalam proses peledakan. Nilai BI diperoleh dari hasil penjumlahan bobot lima parameter utama, yaitu *Rock Mass Description* (RMD), *Joint Plane Spacing* (JPS), *Joint Plane Orientation* (JPO), *Specific Gravity Influence* (SGI), dan *Hardness* (H). Selain menggambarkan tingkat kesulitan peledakan, BI juga berperan penting dalam perancangan parameter geometri peledakan, melalui pendekatan empiris yang dikembangkan oleh Lilly. Berdasarkan hasil penelitian oleh (Permanda & Kopa, 2021), terbukti menurunkan powder factor dari 0.3 kg/m^3 menjadi 0.22 kg/m^3 sekaligus menghasilkan fragmentasi sesuai target. Keunggulan utama BI terletak pada kemampuannya mengadaptasi desain burden, spacing, dan diameter lubang ledak secara dinamis berdasarkan karakteristik batuan. Output dari hasil peledakan sendiri yaitu fragmentasi, berhasil atau tidaknya sebuah peledakan tergantung dari fragmentasi hasil peledakan karena kegiatan ini mempengaruhi efisiensi operasional pada

perusahaan (Herman dkk., 2015). Penelitian ini dilakukan sebagai upaya untuk merancang geometri peledakan yang optimal berdasarkan nilai BI, mengingat masih ditemukannya material berukuran besar (boulder) di lapangan. Keberadaan boulder tersebut berpotensi menghambat proses pemuatan oleh alat muat, sehingga dapat berdampak pada terganggunya kelancaran produksi di perusahaan.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan di lokasi penambangan batugamping PT Semen Indonesia (Persero) Tbk, didesa Sumberarum, Kecamatan Kerek, Kabupaten Tuban, Provinsi Jawa Timur dengan luas wilayah 183.994,561 Ha. Secara geografis, Tuban terletak di koordinat $111^{\circ}30'-112^{\circ}35'$ BT dan $111^{\circ}40'-7^{\circ}18'$ LS, dengan ketinggian daratan antara 0-500 meter di atas permukaan laut. Bagian utara dan selatan Tuban terdiri dari dataran rendah dengan ketinggian 0-15 meter, terutama di sekitar pantai dan sepanjang Sungai Bengawan Solo. Kabupaten Tuban secara fisiografi terletak di Zona Rembang, berdasarkan pembagian fisiografi Jawa Timur terbagi menjadi enam zona, dan Tuban masuk dalam Zona Antiklinorium Rembang. Struktur geologi wilayah ini didominasi oleh antiklin dan sinklin yang umumnya berarah barat-timur dan baratlaut-tenggara. Perbukitan di Tuban terbentuk oleh struktur lipatan antiklin dengan sesar turun dan mendatar, serta sesar naik yang sejajar dengan sumbu lipatan. (Gambar 1).



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Data yang digunakan terdiri dari data primer dan sekunder, yang dimanfaatkan untuk menunjang pencapaian tujuan penelitian. Pengumpulan data dilakukan secara langsung di lapangan serta melalui berbagai referensi kredibel yang memiliki relevansi dengan fokus penelitian ini. Untuk data primer dalam penelitian ini diperoleh melalui pengukuran langsung di lokasi penelitian. Jenis data pertama adalah *Joint Plane Spacing* (JPS), yang dikumpulkan menggunakan metode *scanline*, dimulai dengan penentuan titik pengamatan, kemudian meteran ditarik secara horizontal untuk mengukur jarak antar bidang kekar, yang selanjutnya dicatat. Data kedua adalah *Rock Mass Description* (RMD), yang dilakukan secara visual dengan mengamati jenis batuan serta mendeskripsikan litologi yang ada. Terakhir, dokumentasi fragmentasi aktual dilakukan menggunakan kamera digital untuk merekam kondisi material hasil peledakan di lapangan. Sedangkan untuk data sekunder dalam penelitian mencakup beberapa informasi meliputi, densitas batuan, *Joint Plane Orientation* (JPO), diameter bor, spesifikasi bahan ledak, *skala mohs*, dan geometri peledakan aktual. Tahapan Selanjutnya pada penelitian

ini dilakukan dengan pengolahan data. Berupa data dilakukan dengan mengevaluasi karakteristik batuan melalui pendekatan parameter BI, yang mencakup *Rock Mass Description* (RMD), *Joint Plane Spacing* (JPS), *Joint Plane Orientation* (JPO), *Specific Gravity Influence* (SGI), serta tingkat kekerasan (*Hardness*). Pengamatan terhadap jenis, struktur, dan kondisi massa batuan di area peledakan bertujuan untuk memperoleh gambaran kondisi aktual di lapangan. Dokumentasi visual dilakukan dengan memanfaatkan kamera digital yang telah disiapkan sebelumnya. Setelah didapatkan nilai BI beserta parameternya, selanjutnya menghitung Fragmentasi dengan persamaan metode *Kuz-Ram* sebagai dasar untuk menentukan rancangan geometri peledakan dengan menggunakan persamaan *R.L ash*. Tahapan selanjutnya yaitu dengan melakukan perbandingan antara geometri aktual yang ada di lapangan dan geometri yang sudah dirancangan berdasarkan nilai BI dan diagram lily. Setelah data-data yang dikumpulkan sudah lengkap, dilakukan proses pengolahan data. Kemudian Langkah terakhir penentuan kesimpulan dan saran sehingga nantinya penelitian ini dapat menjadi acuan untuk penelitian selanjutnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter *Blastability Index*

Dalam *Blastability Index* (BI), parameter *Rock Mass Description* (RMD) memiliki peran penting dalam menentukan seberapa mudah suatu massa batuan dapat diledakkan. RMD mengacu pada deskripsi mengenai karakteristik fisik dan struktur internal batuan, yang diklasifikasikan berdasarkan tingkat kerapatan, keutuhan, serta tingkat fragmentasinya. Penilaian RMD yang dilakukan secara tepat akan membantu dalam memperkirakan respons batuan terhadap energi dari peledakan secara lebih akurat. Dalam penelitian oleh (Permanda & Kopa, 2021) Parameter RMD dimanfaatkan dalam perhitungan (BI) sebagai dasar untuk menilai geometri peledakan yang paling sesuai di PT. Ansar Terang Crushindo. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingginya nilai RMD turut meningkatkan nilai BI, yang pada akhirnya berdampak terhadap perancangan geometri peledakan guna memperoleh fragmentasi batuan yang optimal. Menurut metode yang dikembangkan oleh (Lilly, 1986), RMD diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama dengan pembobotan sebagai berikut:

Tabel 1. Pembobotan Nilai *Rock Mass Description*

Parameter	Nilai/Bobot
<i>Powdery/Friable</i>	10
<i>Blocky</i>	20
<i>Totally Massive</i>	50

Berdasarkan hasil analisis, nilai *Rock Mass Description* (RMD) yang diperoleh dalam penelitian ini adalah sebesar 50. Nilai tersebut dikategorikan ke dalam klasifikasi *Totally Massive*. Menurut (Hamidun, 2023) nilai RMD 50 menunjukkan batuan kompak, masif serta memiliki struktur solid, tanpa rekahan minim diskontinuitas dan dikategorikan mudah untuk diledakkan, karena sifat masifnya mendukung pergerakan energi peledakan. Secara umum, semakin tinggi nilai RMD, maka batuan cenderung memiliki kekompakan dan kekuatan yang tinggi sehingga lebih sulit diberai. Sebaliknya, nilai RMD yang rendah mencerminkan batuan yang lebih rapuh dan mudah pecah, sehingga proses peledakan menjadi lebih efisien dengan kebutuhan energi yang lebih rendah.

Joint Plane Spacing (JPS) dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis. Tahap awal dimulai dengan pemilihan lokasi pengamatan yang memiliki jenjang (*bench*) eksposur dinding batuan yang memadai. Selanjutnya, dilakukan penarikan garis ukur sepanjang 13 meter secara horizontal dikarenakan jarak antar kekar yang sejajar lalu diukur sepanjang garis *scanline*. Pada permukaan dinding batuan menggunakan metode *scanline*. Menurut (Zangerl dkk., 2022), Panjang *scanline* ideal 10 - 30 meter dipilih agar dapat merekam jumlah diskontinuitas yang cukup. Pada singkapan dengan jumlah kekar sedikit atau jarak antar kekar lebar, dibutuhkan *scanline* yang lebih panjang agar jumlah data tetap memadai. Pengukuran dilakukan dengan bantuan alat ukur

linear (seperti meteran) untuk mendokumentasikan jarak tegak lurus antar bidang rekahan yang berurutan. Data hasil pengukuran kemudian diolah untuk memperoleh nilai rata-rata JPS sebagai representasi distribusi kekar pada satuan batuan tersebut. Tahap akhir melibatkan dokumentasi visual melalui pengambilan foto untuk mencatat kondisi aktual rekahan sebagai data pendukung dalam analisis lebih lanjut.

Berdasarkan kajian empiris yang dikemukakan oleh (Lilly, 1986), parameter joint spacing merupakan salah satu komponen krusial dalam penentuan nilai (BI), karena berkaitan langsung dengan kemampuan massa batuan untuk mengalami fragmentasi saat peledakan. Hal ini diperkuat oleh temuan (Zubair dkk., 2018), yang menegaskan bahwa keberadaan serta pola distribusi bidang rekahan memiliki pengaruh signifikan terhadap efektivitas proses peledakan, mengingat bidang-bidang tersebut berperan sebagai jalur utama dalam penyebaran energi gelombang ledak. Oleh karena itu, nilai *joint spacing* tidak hanya mencerminkan kondisi struktur geologi lokal, tetapi juga memiliki implikasi langsung terhadap optimalisasi kinerja teknis dan efisiensi operasional dalam kegiatan peledakan.

Tabel 2. Pembobotan Nilai *Joint Plane Spacing* (JPS)

Parameter <i>Joint Plane Spacing</i> (JPS)	Rentang Jarak Antara Rekahan (<i>Spacing</i>)	Nilai
<i>Close</i>	< 20 cm	10
<i>Intermediate</i>	20 – 60 cm	20
<i>Wide</i>	>60 cm	50

Berdasarkan hasil pengamatan pada penelitian ini, *nilai Joint Plane Spacing* (JPS) diperoleh sebesar 50, yang tergolong dalam kategori "*wide*" atau lebar. Hal ini mengindikasikan bahwa distribusi rekahan pada massa batuan sangat jarang atau bahkan hampir tidak ditemukan rekahan aktif. Nilai JPS yang tinggi mencerminkan tingkat keutuhan batuan yang tinggi serta densitas struktur yang kompak, sehingga propagasi energi peledakan menjadi kurang efektif. Kondisi ini berkontribusi terhadap peningkatan nilai (BI), yang mengindikasikan bahwa batuan memiliki resistansi tinggi terhadap proses fragmentasi. Sebaliknya, pada batuan dengan nilai JPS rendah, rekahan lebih rapat dan melimpah, sehingga mempermudah jalannya gelombang ledak dan meningkatkan efisiensi fragmentasi, yang tercermin dari nilai BI yang lebih rendah. *Joint Plane Orientation* dimulai dari pemetaan geologi di lapangan untuk mengidentifikasi bidang rekahan (*joint*) yang muncul di dinding jenjang atau singkapan batuan. Orientasi rekahan diukur menggunakan kompas geologi, mencatat arah strike dan dip. Selanjutnya, arah hadap jenjang (*face orientation*) ditentukan dari desain tambang. Perbedaan sudut antara *strike* dan arah *face* dihitung untuk menentukan kategori orientasi kekar.

Tabel 3. Pembobotan Nilai *Joint Plane Orientation* (JPO)

Parameter <i>Joint Plane Orientation</i> (JPO)	Nilai
<i>Horizontal</i>	10
<i>Dip Out of Face</i>	20
<i>Strike Normal to Face</i>	30
<i>Dip Into Face</i>	40

Berdasarkan hasil analisis, nilai *Joint Plane Orientation* (JPO) sebesar 30 mengindikasikan bahwa orientasi strike bidang kekar berada dalam posisi hampir tegak lurus terhadap arah muka jenjang (blast face), yang dikenal sebagai kondisi strike normal to face. Konfigurasi orientasi kekar semacam ini memungkinkan penyebaran gelombang ledak berlangsung lebih efisien, karena bidang rekahan yang tegak lurus terhadap muka peledakan berperan sebagai jalur lemah yang

mempercepat perambatan energi dan memfasilitasi proses fragmentasi massa batuan. Menurut pendapat (Bedri dkk., 2023) ada hubungan yang sangat kuat antara arah retakan batuan dengan ukuran rata-rata pecahan batu hasil peledakan (X50). Saat retakan memiliki orientasi JPO 30, ukuran pecahan batu menjadi 15-30% lebih besar dibandingkan dengan orientasi yang paling baik untuk peledakan. *Specific Gravity Influence* (SGI) dimulai dengan pengukuran densitas batuan yang terdapat di lokasi penelitian PT Semen Indonesia (Persero) Tbk. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa densitas massa batuan tersebut sebesar 1,6 g/cm³. Menurut (Ahmad dkk., 2025), batugamping dengan densitas 1,6 g/cm³ tergolong batuan karbonat yang lapuk, berpori tinggi, atau mengandung bahan organik. Batugamping ini lebih mudah meledak. Nilai densitas tersebut selanjutnya digunakan sebagai input dalam perhitungan parameter SGI. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan persamaan SGI yang telah ditetapkan dalam BI sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{SGI} &= 25 \times (\rho) - 50 \\ \text{SGI} &= 25 \times (1,6) - 50 \\ \text{SGI} &= -10 \end{aligned}$$

Berdasarkan penelitian oleh (Inanloo Arabi Shad dkk., 2018), massa jenis atau densitas batuan berperan penting dalam menentukan sejauh mana energi peledakan dapat terserap dan tersebar dalam tubuh batuan, yang pada akhirnya memengaruhi kualitas fragmentasi yang dihasilkan. Nilai *Specific Gravity Influence* (SGI) sebesar -10 menunjukkan bahwa batuan memiliki kepadatan tinggi serta ketahanan signifikan terhadap energi ledak. Semakin rendah densitas batuan, nilai SGI cenderung mendekati nol atau positif, mengindikasikan bahwa batuan tersebut lebih mudah mengalami peremukan. Sebaliknya, semakin negatif nilai SGI, batuan dikategorikan sebagai sulit diledakkan dan membutuhkan energi peledakan yang lebih besar serta konfigurasi lubang ledak yang lebih rapat, yang secara langsung berdampak terhadap penurunan nilai BI. Kekerasan batuan dalam penilaian BI dilakukan berdasarkan data sekunder yang disediakan oleh pihak perusahaan. Parameter kekerasan ini mengacu pada resistansi mineral terhadap goresan, yang secara umum ditentukan menggunakan Skala Mohs sebuah sistem klasifikasi kualitatif dengan rentang nilai 1 (sangat lunak) hingga 10 (sangat keras). Berdasarkan informasi dari perusahaan, nilai kekerasan batu gamping di area penelitian tercatat sebesar 3, yang menunjukkan bahwa batuan tersebut tergolong dalam kategori kekerasan rendah hingga menengah. Nilai ini konsisten dengan karakteristik mineral utama penyusun batugamping, yaitu kalsit, yang memiliki nilai kekerasan *Mohs* sebesar 3.

Adapun nilai BI yang diperoleh dari lokasi penelitian di PT Semen Indonesia Tbk dapat dilihat pada penjabaran berikut:

Tabel 4. Hasil nilai *blastability index*

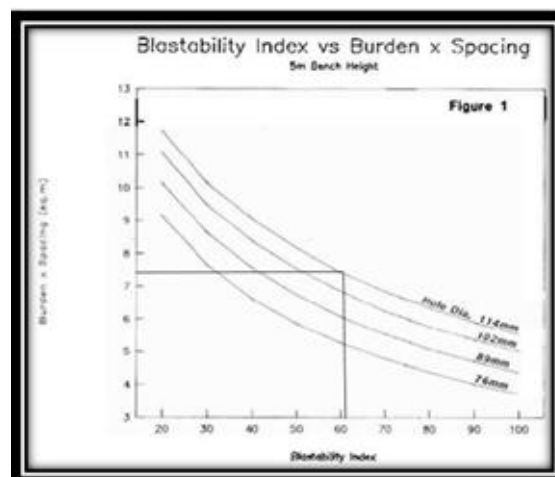
Parameter Blastability Index	Nilai
<i>Rock Mass Description (RMD)</i>	50
<i>Joint Plane Spacing (JPS)</i>	50
<i>Joint Plane Orientation (JPO)</i>	30
<i>Specific Gravity Influence (SGI)</i>	-10
<i>Hardness</i>	3
Total	123

Perhitungan nilai BI:

$$\begin{aligned} \text{BI} &= 0,5 \times (\text{RMD} + \text{JPS} + \text{JPO} + \text{SGI} + \text{H}) \\ \text{BI} &= 0,5 \times (50 + 50 + 30 + (-10) + 3) \\ \text{BI} &= 0,5 \times 123 \\ \text{BI} &= 61,5 \end{aligned}$$

Rancangan Geometri Peledakan Berdasarkan *Blastability Index*

Langkah awal dalam perancangan geometri peledakan yang sesuai dengan nilai BI dilakukan melalui pendekatan Lilly Diagram, yang memanfaatkan indeks tersebut sebagai dasar evaluasi. Nilai BI diperoleh dari penggabungan sejumlah parameter geoteknik massa batuan, meliputi tingkat kekerasan, struktur internal, serta sifat kerapuhan batuan, yang secara keseluruhan merepresentasikan kemudahan relatif batuan untuk mengalami proses peledakan. Berdasarkan pendekatan ini, estimasi awal terhadap nilai *burden* dan *spacing* dapat dilakukan dengan mempertimbangkan klasifikasi tingkat peledakan batuan. Setelah memperoleh konfigurasi geometri awal melalui Lilly Diagram, tahapan analisis dilanjutkan menggunakan pendekatan metode R.L. Ash untuk perhitungan yang lebih terperinci. Metode ini mempertimbangkan aspek teknis tambahan seperti ukuran fragmentasi yang diinginkan, tinggi jenjang (*bench height*), jenis bahan peledak yang digunakan, serta nilai powder factor yang menggambarkan rasio energi ledakan terhadap volume batuan. Hasil dari pendekatan diagram lily dan BI dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 2. Diagram Lily

Dari grafik di atas dapat diketahui *burden x spacing* sebesar 7,4 dengan diameter lubang bor 114 m, nilai BI 61,5 dan untuk hasil geometri rancangan dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Hasil Geometri Rancangan

Parameter	Nilai
Burden (m)	3,3
spacing (m)	3,68
edalaman Lubang (m)	3,8
Steaming (m)	2,24
Panjang Kolom Isian (m)	1,44
Sub Drilling (m)	0,64
Jumlah Bahan Peledak (kg)	12,58
Volume (m ³)	43,33
Powder Factor (kg/m ³)	0,29

Penetapan parameter geometri peledakan melalui pendekatan Lily Diagram didasarkan pada nilai BI, yang merepresentasikan kemudahan relatif suatu massa batuan untuk mengalami fragmentasi akibat energi peledakan. Dalam penelitian ini, diperoleh nilai BI sebesar 61,5, yang dikategorikan sebagai massa batuan dengan tingkat kemudahan peledakan sedang hingga relatif mudah. Berdasarkan nilai tersebut dan dengan mengacu pada kurva empiris dalam Lilly Diagram, ditentukan parameter *burden* sebesar 3,2 meter dan *spacing* sebesar 3,68 meter. Nilai tersebut

menghasilkan rasio spasi terhadap burden (S/B ratio) sebesar 1,15, yang berada dalam rentang optimal untuk distribusi energi yang efektif selama peledakan. Proporsi ini signifikan dalam memastikan penyebaran energi peledakan yang merata ke seluruh volume batuan, sekaligus menghindari risiko terjadinya *underbreak* (kurang pecah) maupun *overbreak* (terlalu pecah). Pemilihan diameter lubang bor sebesar 114 mm dinilai mendukung efisiensi rancangan geometri ini, karena memungkinkan penyebaran muatan bahan peledak secara proporsional terhadap konfigurasi *burden* dan *spacing* yang telah dirancang. Sinergi antara parameter geometri peledakan dan spesifikasi lubang bor tersebut diharapkan mampu menghasilkan kualitas fragmentasi yang optimal serta meningkatkan kinerja operasional di lapangan. Oleh karena itu, konfigurasi geometrik yang dihasilkan melalui metode Lilly Diagram dianggap telah sesuai dengan karakteristik massa batuan pada area penelitian dan dapat dijadikan sebagai acuan awal untuk validasi lanjutan menggunakan pendekatan lainnya, seperti metode perhitungan *R.L. Ash*, guna mencapai desain yang lebih presisi dan aplikatif di lapangan. Penentuan panjang subdrilling dilakukan dengan mengalikan faktor koreksi K_j yang berkisar antara 0,1 hingga 0,3 terhadap nilai burden. Dalam perhitungan ini, digunakan nilai konservatif $K_j = 0,2$ sebagai batas bawah. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa panjang subdrilling yang diperlukan adalah sebesar 0,64 meter. Sementara itu, estimasi nilai stemming ditentukan melalui perkalian antara faktor koreksi K_t , K_t dalam rentang 0,7 hingga 1,0 dengan nilai *burden*. Untuk kondisi minimum, digunakan $K_t = 0,7$, menghasilkan nilai *stemming* sebesar 2,24 meter. Penetapan nilai-nilai ini bertujuan untuk mengoptimalkan efektivitas peledakan dengan mempertimbangkan energi ledak serta pengendalian terhadap *flyrock* dan getaran.

Penentuan kedalaman lubang ledak dilakukan dengan mengalikan faktor koreksi K_h , K_h dalam rentang 1,0 hingga 4,0 terhadap nilai burden. Dalam konteks peledakan beruntun, nilai K_h , K_h sebesar 1,15 dipilih sebagai parameter perhitungan. Kedalaman lubang ledak yang diperoleh adalah 3,68 meter. Selanjutnya, panjang kolom bahan peledak dengan mengurangi panjang stemming dari total kedalaman lubang ledak. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa panjang kolom bahan peledak adalah 1,44 meter. Nilai berat bahan peledak dalam lubang dihitung melalui perkalian antara diameter lubang bor sebesar 4,5 inci, nilai specific gravity, dan panjang kolom bahan peledak, sehingga diperoleh massa bahan peledak sebesar 8,74 kg. Volume batuan hasil peledakan dihitung dengan mengalikan parameter geometri peledakan yaitu burden, spacing, dan kedalaman lubang, yang menghasilkan volume sebesar 43,33 m³. Selanjutnya, powder factor diperoleh dari hasil pembagian antara berat bahan peledak dengan volume batuan tersebut. Seluruh parameter ini disajikan secara komprehensif dalam Tabel 5 yang merangkum rancangan geometri peledakan berdasarkan pendekatan diagram Lilly dan metode R.L. Ash.

Tabel 6. Geometri Peledakan Aktual

Parameter	Nilai
<i>Burden</i> (m)	2,5
<i>Spacing</i> (m)	3,6
Kedalaman Lubang Ledak (m)	4,65
<i>Steaming</i> (m)	1,97
Panjang Kolom Isian (m)	2,6
Sub <i>Drilling</i> (m)	0,55
Jumlah Bahan Peledak (kg)	14,98
Volume (m ³)	41,85
<i>Powder Factor</i> (Kg/m ³)	0,35

Hasil Fragmentasi Rancangan

Perhitungan fragmentasi batuan mengacu pada model empiris *Kuz-Ram*, yang diawali dengan penentuan nilai BI untuk menilai kemudahan peledakan massa batuan. Setelah itu, ditetapkan rock factor sebagai parameter utama dalam estimasi ukuran rata-rata fragmentasi, dengan nilai acuan faktor batuan. Langkah selanjutnya meliputi estimasi volume batuan terbongkar, perhitungan kebutuhan bahan peledak per lubang, serta penyesuaian terhadap nilai Relative Weight Strength (RWS), di mana ANFO dijadikan standar bernilai 100. Hasil akhir prediksi ukuran rata-rata fragmentasi ditampilkan dalam Tabel 7.

Tabel 7. Ukuran rata – rata Fragmentasi

Parameter	Hasil
Faktor Batuan	7,38
Volume Yang Terbongkar	43,33
Jumlah Bahan Peledak Setiap Lubang	12,58
<i>Relative Weight Strength</i>	100
Rata – Rata Ukuran Fragmentasi	33,085

Berdasarkan perhitungan menggunakan model *Kuz-Ram*, metode *Kuz-Ram* digunakan karena mampu memprediksi fragmentasi berdasarkan parameter peledakan dan sifat batuan. Nilai BI memengaruhi rock factor, dimana BI tinggi menghasilkan fragmentasi lebih halus, namun metode ini kurang akurat untuk mengasumsikan distribusi fragmentasi yang belum tentu sesuai dilapangan. Diperoleh ukuran rata-rata fragmentasi sebesar 33,08 cm. Estimasi ini mempertimbangkan *rock factor* senilai 7,38, volume batuan terbongkar sebesar 43,33 m³, serta penggunaan 12,58 kg bahan peledak per lubang dengan ANFO sebagai bahan peledak utama (RWS = 100). Ukuran fragmen ini termasuk dalam kategori optimal dan masih sesuai untuk proses selanjutnya, seperti pemuatan dan pengangkutan, tanpa memerlukan peledakan sekunder secara signifikan. Mengacu pada (Hekmat dkk., 2019), rentang fragmentasi 30 - 50 cm dinilai ideal dalam operasi tambang terbuka karena mampu menekan konsumsi energi pada tahap pengolahan berikutnya. Fragmen yang berada dalam kisaran 30 - 40 cm juga berkontribusi dalam menurunkan jumlah partikel halus (*finest*) dan meningkatkan efisiensi operasional. Dengan memperhatikan nilai *rock factor* yang relatif tinggi serta konfigurasi geometri dan jumlah bahan peledak yang sesuai, fragmentasi yang dihasilkan dapat dikategorikan efisien dan mencerminkan kesesuaian desain peledakan terhadap karakteristik massa batuan di lokasi penelitian.

Penentuan indeks keseragaman dilakukan dengan menggunakan sejumlah parameter peledakan, meliputi nilai *burden*, diameter lubang ledak, standar deviasi kedalaman pengeboran, rasio spasi terhadap *burden* (S/B), panjang kolom isian, serta tinggi jenjang. Nilai indeks ini merepresentasikan sejauh mana keseragaman hasil fragmentasi dapat dicapai berdasarkan akurasi geometri pengeboran dan pengisian bahan peledak. Hasil perhitungan indeks keseragaman ditampilkan secara rinci dalam Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Indeks Keseragaman

Parameter	Hasil
Burden (m)	3,32
Diameter Lubang Ledak (mm)	114,3
Standar Deviasi dari Keakuratan Pemboran (m)	0
Rasio Perbandingan Spasi dengan Burden (S/B)	0,90
Panjang Kolom Isian (m)	1,49
Tinggi Jenjang (m)	5,28
Indeks Keseragaman	2,06

Berdasarkan hasil analisis menggunakan pendekatan Kuz-Ram, diperoleh nilai indeks keseragaman (n) sebesar 2,06, yang mengindikasikan bahwa distribusi ukuran fragmen hasil peledakan berada dalam kategori relatif seragam meskipun belum sepenuhnya homogen. Nilai ini berada dalam kisaran optimal, yakni antara 1,5 hingga 2,5, yang secara umum dianggap ideal untuk mendukung efisiensi operasi tambang terbuka. Fragmentasi dengan indeks keseragaman terlalu rendah cenderung menghasilkan fragmen *oversize* dalam jumlah signifikan, sedangkan nilai yang terlalu tinggi dapat menyebabkan dominasi partikel halus (*finer*) yang kurang diinginkan. Oleh karena itu, nilai n sebesar 2,06 mencerminkan keseimbangan yang cukup baik antara boulder dan fines dalam hasil peledakan. Menurut penelitian yang dilakukan oleh (Taiwo dkk., 2024), dimana nilai *uniformity* di kisaran 0,6 mencerminkan tingkat keseragaman yang rendah dalam sebaran ukuran fragmen hasil peledakan, sedangkan nilai sekitar 2,2 menandakan bahwa distribusi ukuran fragmen cukup seragam, dengan dominasi ukuran partikel yang mendekati nilai median atau P50. Dengan demikian, nilai indeks keseragaman (n) sebesar 2,06 dalam penelitian ini mencerminkan efektivitas desain geometri peledakan seperti ukuran fragmentasi yang sesuai target, energi bahan peledak tersalurkan dengan baik serta dalam menghasilkan fragmentasi yang relatif merata. Kondisi ini memberikan kontribusi positif terhadap efisiensi proses selanjutnya, seperti pemuatan, pengangkutan, serta pengolahan material di unit produksi. Setelah diperoleh desain geometri peledakan, nilai rata-rata ukuran fragmentasi, serta indeks keseragaman, tahap akhir analisis mencakup penentuan karakteristik distribusi ukuran fragmentasi dan estimasi persentase material tertahan pada ayakan tertentu. Pada proses ini, digunakan variasi ukuran ayakan yaitu 20 cm, 40 cm, 60 cm, dan 75 cm untuk mengevaluasi sebaran ukuran partikel hasil peledakan. Hasil perhitungan karakteristik ukuran dan persentase material tertahan dapat dilihat pada tabel 9 dan tabel 10.

Tabel 9. Karakteristik Ukuran

Karakteristik	Hasil
Ukuran (Xc)	23,16

Tabel 10. Persentase Material yang Tertahan Pada Ayakan (%)

Ukuran Ayakan	Persentase Tertahan (%)
20	0,2281
40	0,0008
60	1,0117
75	7,3891

Berdasarkan hasil analisis ayakan yang ditampilkan pada Tabel 9, karakteristik ukuran fragmen batuan (Xc) diperoleh sebesar 23,16 cm, yang mencerminkan nilai median dari distribusi partikel, dimana 50% dari total volume material berukuran lebih kecil dari nilai tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa fragmentasi berada dalam kategori ukuran menengah dengan sebaran partikel yang cukup seragam. Tabel 10 memperlihatkan persentase material tertahan pada berbagai ukuran ayakan, di mana pada ukuran 20 cm dan 40 cm masing-masing hanya tertahan sebesar 0,23% dan 0,0008%, menandakan kandungan partikel halus yang sangat minimal. Ayakan 60 cm mencatat 1,01%, sedangkan ukuran 75 cm memiliki persentase tertahan tertinggi sebesar 7,39%, namun masih dalam batas wajar. Hasil ini sejalan dengan temuan (Nanda & Pal, 2020), yang menyatakan bahwa rendahnya material tertahan mencerminkan efektivitas proses fragmentasi.

Hasil Fragmentasi Aktual

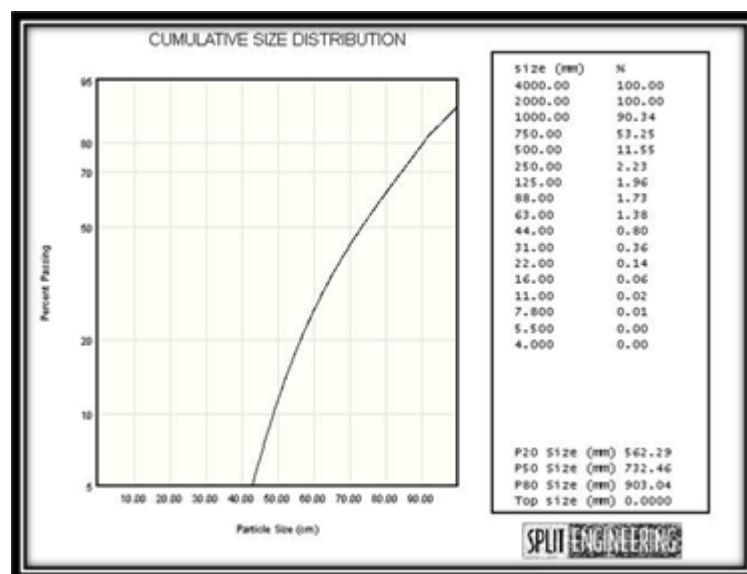
Proses analisis fragmentasi dilakukan menggunakan *software Split Desktop* versi 2.0. Langkah awal dimulai dengan memuat gambar hasil peledakan melalui opsi *open Image*, kemudian dilakukan

kalibrasi skala menggunakan fitur *scale Image* berdasarkan objek acuan di dalam foto. Setelah itu, identifikasi ukuran fragmen dilakukan secara otomatis melalui fitur *find Particles*, dan hasil segmentasi ini dapat disesuaikan secara manual apabila diperlukan. Setelah proses penyesuaian selesai, data dianalisis menggunakan fungsi *compute Size* untuk memperoleh distribusi ukuran fragmen, termasuk parameter utama seperti P20, P50, dan P80. Tahapan terakhir adalah *graphs and output*, yang menyajikan grafik distribusi kumulatif sebagai dasar evaluasi terhadap tingkat keberhasilan fragmentasi berdasarkan kriteria yang telah ditentukan.



Gambar 3. Hasil peledakan yang telah dilakukan

Perusahaan menargetkan fragmentasi batuan maksimal ≤ 75 cm. Namun pada kondisi aktualnya *boulder* yang melebihi 75 cm sekitar 46,75%, sedangkan target kompensasi *boulder* dari perusahaan yaitu $\leq 15\%$. Hasil dari fragmentasi aktual dilakukan dengan cara menggunakan software *split desktop 2.0*. pengambilan data fragmentasi aktual dilakukan dengan cara mendokumentasikan hasil daripada peledakan yang sudah dilakukan. Gambar 3. contoh dari hasil peledakan yang telah dilakukan.



Gambar 4. Hasil fragmentasi aktual

Berdasarkan hasil evaluasi fragmentasi aktual, sebesar 46,75% dari total volume material hasil peledakan tergolong sebagai *boulder* (ukuran >75 cm), yang mencerminkan dominasi fraksi

oversize dan berpotensi menghambat efisiensi proses muat, angkut, serta reduksi di unit peremuk. Nilai P_{80} sebesar 903,04 mm menunjukkan bahwa 80% material berukuran di bawah 90,3 cm, sementara 20% sisanya melebihi ukuran tersebut. Jika dibandingkan dengan spesifikasi teknis perusahaan yang menargetkan ukuran fragmentasi maksimum <75 cm, maka fragmentasi aktual belum memenuhi kriteria yang diharapkan. Hal ini menandakan perlunya optimalisasi terhadap parameter desain peledakan, seperti konfigurasi geometri lubang ledak, distribusi bahan peledak, serta sifat fisik massa batuan.

Analisis Geometri Rancangan dan Geometri Peledakan

Hasil perbandingan antara parameter desain geometri peledakan rencana dan kondisi aktual menunjukkan adanya perbedaan signifikan yang memengaruhi efektivitas fragmentasi. Kedalaman lubang dan panjang kolom isian meningkat dari 3,68 m dan 1,44 m menjadi 4,65 m dan 2,6 m, yang menyebabkan konsumsi bahan peledak naik dari 12,58 kg menjadi 14,98 kg, namun tidak diikuti dengan peningkatan kualitas fragmentasi. Nilai stemming aktual yang lebih pendek (1,97 m) dibandingkan rancangan (2,3 m) juga berdampak pada kurang optimalnya penahanan tekanan gas peledak, sehingga penyebaran energi ke massa batuan menjadi tidak efisien. Penurunan volume peledakan dari 43,33 m³ menjadi 41,85 m³ turut mengindikasikan penurunan produktivitas. Perbandingan detail parameter desain dan aktual disajikan dalam Tabel 11.

Tabel 11. Perbandingan geometri rancangan dan aktual

Parameter	Rencana	Aktual
<i>Burden</i> (m)	3,32	2,5
<i>Spacing</i> (m)	3,36	3,6
Kedalaman Lubang Ledak (m)	3,8	4,65
<i>Steaming</i> (m)	2,3	1,97
Panjang Kolom Isian (m)	1,44	2,6
<i>Sub Drilling</i> (m)	0,64	0,55
Jumlah Bahan Peledak (kg)	12,58	14,98
Volume (m ³)	43,33	41,85
<i>Powder Factor</i> (Kg/m ³)	0,29	0,35

Terdapat perbedaan antara parameter geometri peledakan hasil perancangan dan yang diterapkan di lapangan. Berdasarkan perhitungan dengan BI sebesar 61,5, rancangan menghasilkan nilai *burden* 3,32 meter dan *spacing* 3,68 meter dengan *powder factor* sebesar 0,29 kg/m³. Sebaliknya, geometri aktual menunjukkan nilai *burden* yang lebih rendah, yaitu 2,5 meter, serta *spacing* 3,6 meter dengan *powder factor* lebih tinggi, yakni 0,35 kg/m³. Perbedaan ini menunjukkan bahwa rancangan memberikan efisiensi lebih baik dalam distribusi energi peledak, pemanfaatan parameter Rock Mass Description (RMD) dan Joint Plane Spacing (JPS) yang bahan peledak yang lebih ekonomis, serta rasio S/B yang lebih proporsional. Temuan ini konsisten dengan studi oleh (Adam Rhisky dkk, 2021), yang menyatakan bahwa desain peledakan berbasis karakteristik massa batuan (BI) dan pendekatan empiris cenderung menghasilkan kinerja fragmentasi yang lebih optimal dibandingkan pendekatan konservatif di lapangan.

Analisis Fragmentasi Rancangan dan Aktual

Hasil rancangan geometri peledakan menunjukkan efisiensi yang lebih unggul dibandingkan kondisi aktual. Berdasarkan pendekatan Kuz-Ram, rata-rata ukuran fragmen hasil rancangan tercatat sebesar 33,08 cm, dengan indeks keseragaman (n) sebesar 2,06 dan ukuran karakteristik (Xc) mencapai 23,16 cm. Uji ayakan mengindikasikan bahwa hanya 7,39% material tertahan pada ayakan 75 cm, menunjukkan keberhasilan pencapaian target fragmentasi <75 cm. Sebaliknya, hasil fragmentasi aktual yang dianalisis melalui Split Desktop memperlihatkan bahwa 46,75% material tergolong *oversize* (>75 cm), dengan nilai P_{80} sebesar

903 mm, yang secara signifikan berpotensi menurunkan efisiensi kegiatan muat-angkut dan proses peremukan. Temuan ini konsisten dengan penelitian (Hekmat dkk., 2019), yang menyatakan bahwa model Kuz-Ram mampu menghasilkan fragmentasi optimal pada kisaran 30–50 cm bila desain dilakukan secara tepat.

KESIMPULAN

1. Pengamatan dan perhitungan terhadap parameter massa batuan seperti *Rock Mass Description* (50), *Joint Plane Spacing* (50), *Joint Plane Orientation* (30), *Specific Gravity Influence* (-10), dan *Hardness* (3), diperoleh nilai BI sebesar 61,5. Nilai ini mengindikasikan bahwa batugamping di lokasi penelitian tergolong dalam kategori sulit diledakkan. Karakteristik ini menunjukkan bahwa massa batuan bersifat sangat masif, berpori rendah, serta memiliki resistansi tinggi terhadap gelombang ledak, sehingga membutuhkan desain peledakan yang lebih terukur.
2. Berdasarkan perhitungan nilai *Blastability Index* sebesar 61,5 dan pendekatan metode Lilly serta perhitungan R.L. Ash, diperoleh rancangan geometri peledakan dengan burden 3,32 m, spacing 3,68 m, kedalaman lubang 5,7 m, stemming 1,5 m, dan powder factor 0,29 kg/m³. Dengan tinggi jenjang 5,28 m dan diameter lubang 114,3 mm, desain ini menghasilkan fragmentasi teoritis yang baik dengan rata-rata ukuran fragmen 33,08 cm, indeks keseragaman 2,06, dan ukuran karakteristik 23,16 cm. Rancangan ini dinilai efisien dan sesuai dengan target operasional.
3. Geometri aktual menunjukkan burden 2,5 m dan spacing 3,6 m dengan *powder factor* 0,35 kg/m³, yang berarti penggunaan bahan peledak lebih tinggi namun tidak menghasilkan fragmentasi yang baik. Sebaliknya, geometri rancangan dengan *burden* 3,32 m dan spacing 3,68 m serta *powder factor* 0,29 kg/m³ lebih efisien dan optimal dalam mendistribusikan energi ledak. Fragmentasi aktual menghasilkan 46,75% boulder (>75 cm) dan P₈₀ sebesar 903 mm, jauh dari target perusahaan. Sementara itu, fragmentasi rancangan hanya menghasilkan 7,39% material tertahan pada ukuran 75 cm. Hal ini menunjukkan bahwa desain berdasarkan *Blastability Index* lebih efektif dan sesuai standar operasional tambang.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam Rhisky, Isjudarto Agustinus, & Ali Mohammad Mustapa. (2021). Evaluasi Geometri Peledakan Terhadap Fragmentasi Hasil Pembongkaran Batugamping PT Semen Tonasa Provinsi Sulawesi Selatan. *Mining insight*, 2(2), 1–8.
- Ahmad, F. A., Permana, A. P., & Hutagulung, R. (2025). Density and Porosity Analysis of Limestone as a Groundwater Reservoir in Kayubulan Village, Gorontalo Regency. *Jambura Geoscience Review*, 4(1), 1–10. <https://doi.org/10.37905/jgeosrev.v7i1.28250>
- Bedri, K., Hamou, M. O., Filali, M., Hadji, R., & Taib, H. (2023). Optimizing The Blast Fragmentation Quality Of Discontinuous Rock Mass: Case Study Of Jebel Bouzegza Open-Cast Mine, North Algeria. *Mining of Mineral Deposits*, 17(4), 35–44. <https://doi.org/10.33271/mining17.04.035>
- Hamidun, H. (2023). Assessment Of Blastability Index In Massive Limestone From Rawang Quarry, Selangor. *Faculty of Civil Engineering Universiti Teknologi Malaysia*.
- Hekmat, A., Munoz, S., & Gomez, R. (2019). Prediction of Rock Fragmentation Based on a Modified Kuz-Ram Model. *Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection - MPES 2018, November 2018*, 69–79. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99220-4_6
- Herman, Widodo, S., & Nurwaskito, A. (2015). Analisis Pengaruh Kedalaman Lubang Ledak, Burden Dan Spacing Terhadap Perolehan Fragmentasi Batugamping. *03*, 184–188.
- Inanloo Arabi Shad, H., Sereshki, F., Ataei, M., & Karamoozian, M. (2018). Investigation of Rock Blast Fragmentation Based on Specific Explosive Energy and In-Situ Block Size. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 5(1), 2–7.



- Lilly, P. A. (1986). Empirical Method of Assessing Rock Mass Blastability. *Symposia Series – Australasian Institute of Mining and Metallurgy, October*, 89–92. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(87\)92504-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(87)92504-6)
- Nanda, S., & Pal, B. K. (2020). Analysis of Blast Fragmentation Using WipFrag. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 5(6), 1561–1566. <https://doi.org/10.38124/ijisrt20jun1086>
- Permada, N., & Kopa, R. (2021). Evaluasi Geometri Peledakan Berdasarkan Pengaruh Perhitungan Blastability Index Untuk Mendapatkan Fragmentasi Ideal Pada Front Penambangan Di PT . Ansar Terang Crushindo 1 Pangkalan Koto Baru Kabupaten Lima. *Jurnal Bina Tambang*, 6(1), 187–197.
- Safarudin, S., Purwanto, P., & Djamaluddin, D. (2016). Analisis Pengaruh Geometri Peledakan Terhadap Fragmentasi dan Digging Time Material Blasting. *Jurnal Penelitian Enjiniring*, 2(2), 54–62. <https://cot.unhas.ac.id/journals/index.php/jpe/article/view/21>
- Taiwo, B. O., Famobuwa, O. V., Mata, M. M., Sazid, M., Fissha, Y., Jebutu, V. A., Akinlabi, A. A., Ogunyemi, O. B., & Ozigi, A. (2024). Granite Downstream Production Dependent Size and Profitability Assessment: an Application of Mathematical-based Artificial Intelligence Model and WipFrag Software. *Journal of Mining and Environment*, 15(2), 497–515. <https://doi.org/10.22044/jme.2023.13731.2543>
- Zangerl, C., Koppensteiner, M., & Strauhal, T. (2022). Semiautomated Statistical Discontinuity Analyses from Scanline Data of Fractured Rock Masses. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(19). <https://doi.org/10.3390/app12199622>
- Zubair, M., Bakar, A., & Hayat, M. (2018). Influence Of Geological Discontinuities Upon Fragmentation By Blasting. *Pakistan Journal Of Science*, 65 No. 3(September).