doi:10.56099/ophi.v8i1.p33-42 http://ophiolite.uho.ac.id/

Vol. 08, No. 01, Tahun 2026: 33–42

OPHIOLITE: Jurnal Geologi Terapan

|e-ISSN 2715-4440|

Program Studi Teknik Geologi, Universitas Halu Oleo

|Research Article

Analisis Geometri Peledakan Terhadap Ukuran Fragmen Overburden pada Tambang Batubara Pit Kasturi PT Multi Tambangjaya Utama

Abdul Salam Munir[1]✉, Rahmi Sa'pang[1], Suriyanto Bakri[2], Habibie Anwar[1], Supardi Razak[3]

[1] Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Muslim Indonesia, Makassar, Sulawesi Selatan, Indonesia.
[2] Program Studi Teknik Metalurgi, Institut Teknologi Bacharuddin Jusuf Habibie, Parepare, Sulawesi Selatan, Indonesia.
[3] Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, Tangerang Selatan, Banten, Indonesia.

ARTICLE INFO

Article history:
Received: September 21, 2025
Accepted: May 20, 2026
Published: May xx, 2026

Keywords:
geometri peledakan
fragmentasi batuan
Model Kuz-Ram
overburden
tambang batubara

Corresponding author:
Abdul Salam Munir
Email: salammunir@umi.ac.id

Read online:
Scan this QR code with your smart phone or mobile device to read online.

Copyright © 2026 Authors

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

ABSTRAK

Kegiatan peledakan selama 15 hari di Pit Kasturi menghasilkan persentase fragmen *oversize* yang masih tinggi sehingga penelitian ini menganalisis geometri peledakan untuk meningkatkan kualitas distribusi fragmen. Penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi *powder factor* (PF) aktual, memprediksi ukuran fragmen secara teoretis, menganalisis distribusi ukuran fragmen aktual, dan memberikan rekomendasi desain geometri peledakan yang optimal. Metode penelitian meliputi perhitungan *Powder Factor* aktual, prediksi teoretis ukuran fragmen menggunakan Model Kuz-Ram, analisis distribusi ukuran fragmen aktual dengan bantuan program komputer, dan rekomendasi geometri dengan simulasi perhitungan R. L. Ash dan ICI Explosive Orica. Hasil penelitian menunjukkan *powder factor* aktual rata-rata sebesar 0,20 kg/m³ dengan variasi yang signifikan. Prediksi Model Kuz-Ram menghasilkan ukuran fragmen rata-rata 70,34 cm, sedangkan analisis aktual menunjukkan 50,13% fragmen berukuran di atas 60 cm (*oversize*) yang mengindikasikan ketidakefektifan desain geometri yang diterapkan. Simulasi rekomendasi geometri menggunakan teori ICI Explosive Orica memberikan hasil prediksi yang lebih unggul dengan fragmen rata-rata 34,60 cm dan hanya 31,55% *oversize*, meski memerlukan lebih banyak lubang ledak. Maka dapat disimpulkan bahwa optimasi parameter geometri, khususnya *burden* dan *spacing*, sangat penting untuk mencapai fragmentasi yang seragam dan memenuhi standar, sehingga dapat meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi biaya penanganan material berukuran besar.

ABSTRACT

Blasting activities conducted over 15 days at Pit Kasturi produced a high percentage of oversize overburden fragments, indicating that the applied blasting geometry had not yet achieved the optimal fragmentation. This study aimed to determine the actual powder factor, predict the theoretical fragment size, evaluate the actual fragment size distribution, and propose an improved blasting geometry design. The research methods included calculating the actual powder factor, predicting fragment size using the Kuz-Ram model, analyzing actual fragment distribution through image processing software, and simulating blasting geometry recommendations based on the R.L. Ash and ICI Explosives Orica approaches. The results showed that the average actual powder factor was 0.20 kg/m³ with noticeable variation among blasting activities. The Kuz-Ram model predicted an average fragment size of 70.34 cm. At the same time, the image analysis indicated that 50.13% of the fragments exceeded 60 cm, classifying them as oversize and reflecting the inadequacy of the existing blasting geometry. The simulation results demonstrated that ICI Explosives Orica produced better fragmentation performance, with an average fragment size of 34.60 cm and an oversize percentage of 31.55%, although a greater number of blast holes was required. These findings indicate that optimizing blasting geometry parameters, particularly burden and spacing, is essential for improving fragmentation uniformity, enhancing operational efficiency, and reducing the cost of handling oversized materials.

How to cite: Munir, A.S, Sa'pang, R., Bakri, S., Anwar, H., dan Razak, S. (2026). Analisis Geometri Peledakan Terhadap Ukuran Fragmen Overburden pada Tambang Batubara Pit Kasturi PT Multi Tambangjaya Utama. OPHIOLITE: Jurnal Geologi Terapan, 8(1), pp. 33-42. https://doi.org/10.56099/ophi.v8i1.p33-42

1 Pendahuluan

Penambangan batubara merupakan aktivitas ekstraksi sumber daya alam yang krusial bagi perekonomian nasional, namun seringkali dihadapkan pada tantangan operasional, terutama terkait pemberaian *overburden* untuk memudahkan proses penggalian (Pebrianto dkk., 2025). Metode yang dapat diandalkan dan banyak digunakan untuk memberai *overburden*, yakni metode peledakan. Target yang dicapai dalam kegiatan peledakan bukan hanya memberai atau memisahkan batuan dari induknya tetapi juga mendapatkan ukuran batuan atau disebut fragmen sesuai dengan rencana dan terhindar dari kegiatan peledakan ulang karena akan mengambil waktu dan biaya yang lebih. Sehingga ukuran batuan hasil peledakan sangat penting dalam perencanaan peledakan dengan menyesuaikan geometri peledakan sesuai dengan rencana fragmen batuan yang diharapkan.

Geometri peledakan mencakup berbagai parameter, seperti pola pengeboran, kedalaman lubang ledak, spasi antar lubang, *burden*, dan *powder factor* yang seluruhnya harus dipertimbangkan secara cermat untuk mencapai ukuran fragmen yang diinginkan (Simangunsong 2021; Suratman dan Dwinagara 2022). Geometri peledakan merupakan parameter penting yang mempengaruhi ukuran fragmen batuan hasil peledakan. Oleh karena itu, desain peledakan sangat esensial untuk mengontrol fragmentasi batuan dan secara konsekuen memengaruhi tingkat produktivitas serta biaya operasional. Geometri peledakan yang tidak tepat dapat menghasilkan fragmen batuan dengan distribusi ukuran yang tidak memenuhi target operasional sehingga memerlukan proses sekunder seperti pemecahan menggunakan peralatan hidraulik atau peledakan ulang. Pemilihan geometri yang tepat juga krusial untuk meminimalkan dampak negatif lingkungan, seperti getaran tanah dan kebisingan, dan untuk memastikan keselamatan operasional di area pertambangan.

Fragmen hasil peledakan memiliki klasifikasi ukuran mulai dari kerikil hingga bongkah dan bongkah yang dihasilkan melebihi dari ukuran yang direncanakan dianggap sebagai *oversize* (Munir dkk., 2023). Fragmentasi yang seragam dan sesuai ukuran sangat penting untuk mengurangi biaya operasional pada tahap pemuatan, pengangkutan, dan penghancuran material selanjutnya (Figueiredo dkk., 2023). Perencanaan geometri peledakan yang tepat dapat menghasilkan distribusi ukuran fragmen yang optimal (Yudha dkk., 2025) dan meminimalkan produksi material bongkah besar (*oversize*) maupun material terlalu kecil yang keduanya dapat menghambat efisiensi operasional (Shehu dkk., 2021). Peledakan yang tidak optimal ditandai dengan ukuran fragmen yang tidak seragam dan menghasilkan ukuran bongkah melebihi rencana, sering kali menjadi pemicu perlunya analisis rancangan geometri dan *powder factor* (Irawan dkk. 2020; Munir dkk. 2023).

Hal ini dikarenakan karakteristik massa batuan, seperti adanya bidang diskontinuitas, dapat menghambat efektivitas energi ledak, sehingga peledakan menjadi tidak optimal (Sinulingga dkk., 2022). Evaluasi desain teknis peledakan menjadi esensial untuk mengatasi hal ini, mengingat material *overburden* yang lunak sekalipun memerlukan perlakuan khusus untuk mencapai produktivitas alat berat yang maksimal (Toha dkk., 2022). Oleh karena itu, perencanaan ukuran fragmen batuan dan meminimalkan ukuran material halus menjadi salah satu yang harus diperhatikan dalam peledakan pada proses penambangan (Gao dkk., 2023). Selain ukuran fragmen, peledakan juga menghasilkan *flyrock* (batu terbang) yang dapat mengakibatkan masalah serius jika melewati radius aman peledakan (Nurwaskito dkk., 2022). Kegiatan peledakan dengan energi yang tidak terkontrol dapat berpengaruh terhadap kestabilan lereng di sekitar area peledakan (Munir dkk. 2017; Putrilia dkk. 2022) yang menyebabkan adanya perubahan perilaku geser batuan dan mengakibatkan longsor (Martireni and Munir, 2023). Peledakan yang dilakukan secara efektif untuk memperkecil ukuran massa batuan menjadi fragmen-fragmen yang lebih kecil akan sangat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efektivitas dan efisiensi kegiatan penggalian, pemuatan, pengangkutan, dan tahapan setelahnya.

Optimalisasi ukuran fragmen ini memiliki dampak langsung pada biaya operasional, di mana pengeboran dan peledakan menyumbang sekitar 15% hingga 20% dari total biaya penambangan, sehingga desain peledakan yang tepat sangat penting untuk meningkatkan efisiensi proses penambangan (Shehu dkk. 2021; Muhaemin dkk. 2019). Efisiensi ini sangat vital mengingat terus melemahnya harga jual batubara, yang menuntut penekanan berbagai komponen pengeluaran, termasuk efisiensi penggunaan bahan peledak (Sadiq, 2021). Meskipun demikian, peningkatan biaya pengeboran dan peledakan untuk mendapatkan ukuran fragmen yang lebih baik dapat diimbangi dengan penurunan biaya pada proses selanjutnya yang umumnya lebih tinggi (Yussupov dkk., 2021). Peningkatan efisiensi melalui optimasi fragmentasi batuan pasca peledakan dapat secara signifikan mengurangi konsumsi energi dalam proses penambangan hingga penanganan batubara lebih lanjut, terutama pada tahap pengecilan ukuran di *crusher*.

Ketidakstabilan harga batubara yang salah satunya disebabkan ambisi menuju energi hijau/energi terbarukan menjadikan efektivitas dan efisiensi dalam kegiatan peledakan batubara sangat perlu menjadi perhatian dalam proses penambangan. Penggunaan kegiatan peledakan dalam proses penambangan salah satunya oleh PT Riung Mitra Lestari Site Mutu. Hasil observasi selama satu pekan menunjukkan bahwa fragmentasi batuan hasil peledakan masih didominasi oleh fragmen berukuran lebih dari 60 cm yang dikategorikan sebagai *oversize*. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa geometri peledakan yang diterapkan belum mampu menghasilkan distribusi ukuran fragmen yang sesuai dengan target operasional dan berpotensi meningkatkan biaya produksi akibat perlunya penanganan lanjutan seperti peledakan lanjutan. Beberapa penelitian sebelumnya umumnya hanya berfokus pada evaluasi fragmentasi aktual atau prediksi teoritis secara terpisah, sehingga hubungan antara parameter geometri peledakan dan hasil fragmentasi aktual belum dianalisis secara komprehensif. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan melalui integrasi analisis *powder factor* aktual, prediksi ukuran fragmen menggunakan model Kuz-Ram, analisis distribusi fragmen aktual berbasis pengolahan citra digital dengan bantuan program komputer, dan simulasi rekomendasi geometri peledakan menggunakan pendekatan R. L. Ash dan ICI Explosives Orica untuk memperoleh rancangan geometri peledakan yang lebih optimal pada *overburden* Pit Kasturi PT Multi Tambangjaya Utama.

2 Metode

Penelitian ini dilakukan di salah satu dari tiga pit penambangan pada wilayah usaha pertambangan PT Multi Tambangjaya Utama, yakni Pit Kasturi. Pit ini dikelola oleh PT Riung Mitra Lestari sebagai kontraktor penambangan yang terletak di Kecamatan Gunung Bintang Awai, Kabupaten Barito Selatan, Kalimantan Tengah. Penelitian ini dilakukan dengan pengambilan data lapangan melalui PT Riung Mitra Lestari sebagai kontraktor. Kegiatan peledakan di Pit Kasturi dilakukan setiap hari untuk memberai *overburden* pada area yang akan dilakukan penambangan. Kegiatan peledakan yang dilakukan pada area rencana penambangan batubara di Pit Kasuari bertujuan untuk memberai *overburden* agar mudah dalam proses penggalian hingga pengangkutan.

Kegiatan lapangan dilakukan dengan mengukur geometri peledakan yang salah satunya mengukur kedalaman lubang ledak (Gambar 1) dan mengamati proses peledakan di lokasi penelitian selama 15 hari atau 15 kali peledakan. Pengolahan data penelitian dilakukan dengan menghitung nilai *powder factor* aktual, menghitung prediksi ukuran fragmen menggunakan Model Fragmentasi Kuz-Ram, dan mengidentifikasi ukuran fragmen hasil peledakan aktual menggunakan bantuan program komputer yang membaca gambar hasil peledakan.

Gambar 1 Pengukuran lubang ledak

Menurut Agyei dan Nkrumah (2021), *powder factor* (PF) dapat didefinisikan sebagai jumlah bahan peledak yang diperlukan untuk memberai atau menghancurkan volume atau tonase dari batuan yang dijabarkan menggunakan Persamaan 1. Perusahaan tambang yang menggunakan metode peledakan dalam memberai batuan seringkali membatasi nilai *powder factor* karena berpengaruh terhadap biaya yang harus dikeluarkan dalam kegiatan peledakan (Dwinagara dkk., 2019).

$$PF = \frac{E}{V} \quad (1)$$

Keterangan:
PF = *Powder factor*
E = Jumlah bahan peledakan (kg)
V = Volume material yang diledakkan (m^3)

Sebelum peledakan dilakukan, ukuran fragmen batuan hasil peledakan dapat dihitung secara teoretis sebagai gambaran awal mengenai potensi ukuran fragmen yang akan didapatkan setelah kegiatan peledakan dilakukan. Prediksi ukuran batuan yang telah terberai akibat peledakan dihitung menggunakan Model Fragmentasi Kuz-Ram. Model ini telah banyak digunakan dalam memprediksi fragmen pada peledakan tambang terbuka yang dihitung menggunakan Persamaan 2 (Cunningham, 2005; Salu dkk. 2024).

Penentuan nilai konstanta faktor batuan disesuaikan dengan kekerasan dan kondisi batuan melalui nilai *blastability index*. Nilai konstanta 7 untuk batuan kekerasan medium, 10 untuk batuan keras, dan 13 untuk batuan keras dengan banyak rekahan. Sedangkan nilai *relative weight strength* bahan peledak disesuaikan dengan jenis bahan peledak yang digunakan. Nilai E 100 untuk ANFO dan 115 untuk TNT

Copyright © 2026 Munir et. al.
This work is licensed under the CC-BY-SA license

(Salu dkk., 2024). Distribusi ukuran fragmen yang didasarkan pada ukuran saringan tertentu menggunakan Persamaan 3 dan karakteristik ukuran batuan pada Persamaan 4 (Cunningham, 2005; Salu dkk. 2024).

$$X=A \times \left[\frac{V}{Q}\right]^{0,8} \times Q^{0,167} \times \left[\frac{E}{115}\right]^{-0,63} \quad (2)$$

Keterangan:
X = Ukuran fragmen rata-rata (cm)
A = Konstanta faktor batuan (bergantung batuan)
V = Volume batuan yang terbongkar (m^3)
Q = Berat bahan peledak setiap lubang (kg)
E = *Relative weight strength* bahan peledak

$$R_X=e^{-\left(\frac{(X)^n}{Xc}\right)} \quad (3)$$

$$Xc = \left(\frac{X}{0,693}\right)^{1/n} \quad (4)$$

Keterangan:
Rx = Distribusi ukuran fragmen didasarkan pada ukuran saringan tertentu (%)
Xc = Karakteristik ukuran batuan (cm)
X = Ukuran ayakan (cm)
n = Indeks keseragaman

Menurut Cunningham (2005), indeks keseragaman menunjukkan ukuran fragmen batuan dengan ukuran yang sama dengan rentang nilai indeks antara 0,6-2,2 dimana semakin tinggi nilai indeksnya maka tersebut menunjukkan semakin tinggi pula tingkat keseragaman dari ukuran fragmen hasil peledakan. Nilai n didapatkan menggunakan Persamaan 5.

$$n=\left[2,2-\frac{14B}{d}\right]\sqrt{\left[\frac{1+S/B}{2}\right]}\left[1-\frac{W}{B}\right]\left[\text{abs}\left[\frac{BCL-CCL}{L}\right]+0.1\right]^{0.1}\left[\frac{L}{H}\right] \quad (5)$$

Keterangan:
n = Indeks keseragaman
B = *Burden* (m)
S = Spasi (m)
d = Diameter lubang ledak (mm)
W = Standar deviasi keakuratan pengeboran (m)
BCL = Panjang isian bahan peledak bagian dasar (m)
CCL = Panjang isian bahan peledak kolom (m)
L = Panjang isian bahan peledak (m)
H = Tinggi jenjang (m)

Ukuran fragmen batuan aktual di lapangan dari hasil peledakan diidentifikasi dan diketahui menggunakan bantuan program komputer sehingga membantu dan menyederhanakan perhitungan ukuran fragmennya dengan menginput foto fragmen hasil peledakan. Gambar 2 menunjukkan salah satu foto hasil peledakan yang akan dihitung dan dianalisis fragmennya. Proses pengambilan dokumentasi fragmentasi aktual, yaitu dengan meletakkan helm *safety* yang memiliki ukuran 27 cm sebagai pembanding fragmen. PT Riung Mitra Lestari mengklasifikasikan batuan hasil peledakan sebagai *boulder* atau berukuran besar yang tidak sesuai standar jika berukuran lebih dari 60 cm. Hasil dokumentasi berjumlah 15 foto citra digital tersebut akan dimasukkan ke program komputer untuk mengetahui distribusi ukuran fragmen dari 15 kali kegiatan peledakan.

Gambar 2 Salah satu foto hasil peledakan yang akan dianalisis

Tahap terakhir dalam penelitian ini, yakni memberikan rekomendasi geometri peledakan yang dapat digunakan untuk mencapai ukuran fragmen yang lebih sesuai dengan target operasional. Rekomendasi pertama menggunakan teori R. L. Ash yang menggunakan pendekatan empiris dengan menghubungkan antara energi bahan peledak dengan fragmen hasil peledakan untuk memprediksi ukuran rata-rata fragmen batuan hasil peledakan dengan menetapkan geometri peledakan yang akan diterapkan pada kegiatan peledakan. Selain itu rekomendasi geometri juga disimulasikan menggunakan pendekatan ICI Explosives Orica yang mengombinasikan parameter geometri peledakan dengan prediksi fragmentasi model Kuz-Ram untuk mengevaluasi ukuran fragmen rata-rata dan persentase *oversize* yang dihasilkan. Kedua pendekatan tersebut digunakan sebagai dasar evaluasi alternatif desain peledakan guna memperoleh fragmentasi *overburden* yang lebih optimal pada Pit Kasturi PT Multi Tambangjaya Utama.

3 Hasil dan Pembahasan

Peledakan *overburden* di Pit Kasuari yang merup akan area kerja PT Riung Mitra Lestari menggunakan sistem inisiasi atau detonator nonelektrik (nonel) dengan bahan peledak utama, yakni ANFO. ANFO yang digunakan memiliki *specific gravity* 0,8 gr/cc dengan *specific gravity* standar 1,2 gr/cc dan detonasi 3500 m/s dengan detonasi standar 3600 m/s dengan perbandingan campuran yang digunakan 94,5% AN

dan 5,5% FO. Material *overburden*, yaitu batulempung yang memiliki kuat tekan 16,90 MPa, dan densitas 2,4 ton/m^3 dengan densitas standar 2,5 ton/m^3. Lubang ledak yang telah dibor berdiameter lubang ledak (d) 200 mm dengan maksimal kedalaman 9 m. Pola pengeboran yang terapkan adalah *staggered squared drill pattern* yang membentuk pola zig-zag bujur sangkar dan pola peledakan yang digunakan adalah V-cut dan *row by row* serta dengan *excellent* dan *hole by hole*. Pengukuran geometri aktual dan pelaksanaan peledakan dilakukan selama 15 hari dengan jumlah data yang sama akan tetapi dalam penyajian hasil hanya menampilkan nilai rata-rata setiap data dan hasil yang diperoleh (Tabel 1). Tabel 1 menunjukkan penerapan geometri peledakan pada PT Riung Mitra Lestari dengan rata-rata, yaitu *burden* 7,4 m, *spacing* 8,4 m, *stemming* 3,5 m, *subdrilling* 0,5 m, kedalaman lubang ledak 6,8 m, kolom isian bahan peledak setiap lubang 3,4 m, tinggi jenjang 6,3 m, dan diamater lubang ledak 200 mm.

Tabel 1 Geometri peledakan aktual

Geometri Peledakan	Nilai	Satuan
Burden (B)	7,4	m
Spacing (S)	8,4	m
Stemming (T)	3,5	m
Subdrilling (J)	0,5	m
Kedalaman Lubang (L)	6,8	m
Kolom Isian (PC)	3,4	m
Tinggi Jenjang (H)	6,3	m
Jumlah Lubang (n)	141	lubang

3.1 *Powder Factor* Peledakan Aktual

Powder factor (PF) merupakan perbandingan berat pemakaian bahan peledak dengan volume batuan terbongkar yang dapat mempengaruhi ukuran fragmen batuan hasil peledakan. Semakin besar perbandingannya maka semakin baik pula ukuran fragmen yang dihasilkan karena detonasi atau kekuatan bahan peledak seimbang dengan volume yang akan diledakan. Begitu pula sebaliknya pada saat nilai perbandingannya semakin kecil, detonasi atau kekuatan yang dihasilkan juga kecil sedangkan volume yang diledakan dalam jumlah yang besar, maka menghasilkan ukuran fragmen yang kurang baik. Tabel 2 menunjukkan perbandingan berat bahan peledak per lubang dan jumlah overburden yang terbongkar per lubang ledak dari 15 kali peledakan dengan *loading density* 25 kg/m.

Data hasil peledakan overburden selama 15 hari di Pit Kasturi PT Multi Tambangjaya Utama memberikan gambaran mengenai efisiensi dan konsistensi operasi peledakan. Parameter yang dianalisis adalah perbandingan (rasio) antara berat bahan peledak (kg) dengan volume batuan yang terbongkar (m^3) yang sering juga disebut sebagai *Powder Factor* (PF). Nilai PF merupakan indikator langsung dari efisiensi energi peledakan dalam memberai batuan. Berdasarkan data analisis, nilai PF bervariasi antara 0,17 kg/m^3 hingga 0,25 kg/m^3 (Tabel 2). Variasi ini mengindikasikan bahwa terdapat fluktuasi dalam kinerja peledakan dari hari ke hari yang diduga kuat dipengaruhi oleh beberapa aspek geometri peledakan dan kondisi lapangan.

Tabel 2 Nilai *powder factor* peledakan aktual

Kegiatan Peledakan	Berat Bahan Peledak (kg)	Volume Batuan Terbongkar (m^3)	*Powder Factor* (kg/m^3)
Hari 1	89,33	443,28	0,20
Hari 2	82,75	448,94	0,18
Hari 3	77,38	345,43	0,22
Hari 4	124,20	488,50	0,25
Hari 5	79,46	431,25	0,18
Hari 6	96,14	442,96	0,22
Hari 7	59,25	291,95	0,20
Hari 8	120,74	530,69	0,23
Hari 9	126,60	529,84	0,24
Hari 10	71,11	389,03	0,18
Hari 11	67,83	316,11	0,21
Hari 12	65,48	388,66	0,17
Hari 13	86,64	445,03	0,19
Hari 14	105,50	526,99	0,20
Hari 15	102,95	466,61	0,22
Rata-rata	90,35	432,35	0,20

Secara umum, nilai PF rata-rata dari 15 kali peledakan adalah sekitar 0,20 kg/m^3. Nilai ini berada dalam kisaran yang umum diterapkan untuk peledakan *overburden* di tambang batubara yang biasanya berkisar antara 0,15 - 0,30 kg/m^3. Kegiatan peledakan seperti hari-2 (0,18 kg/m^3), hari-5 (0,18 kg/m^3), hari-10 (0,18 kg/m^3), dan terutama hari-12 (0,17 kg/m^3) menunjukkan performa kegiatan peledakan yang sangat efektif, di mana volume batuan yang dihasilkan relatif besar dibandingkan dengan konsumsi bahan peledak. Sebaliknya, hari-4 (0,25 kg/m^3) dan hari-9 (0,24 kg/m^3) menunjukkan PF lebih tinggi yang dapat diartikan bahwa setiap volume batuan yang terbongkar diperlukan lebih banyak bahan peledak. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti kekuatan batuan, dan desain geometri lubang ledak yang kurang optimal, seperti *burden* dan spasi yang terlalu besar sehingga energi peledakan terkonsentrasi dengan baik atau kedalaman lubang ledak yang tidak sesuai dengan tinggi jenjang sehingga mengakibatkan kondisi *toe* yang buruk dan memerlukan lebih banyak energi untuk memberainya.

Tabel 2 juga menunjukkan korelasi antara berat bahan peledak dan volume batuan yang dihasilkan tidak selalu linier. Sebagai contoh, pada hari-8 (120,74 kg bahan peledak menghasilkan 530,69 m^3 batuan) dan hari-9 (126,60 kg menghasilkan 529,84 m^3

Copyright © 2026 Munir et. al.
This work is licensed under the CC-BY-SA license

batuan), terlihat bahwa penambahan bahan peledak sekitar 6 kg tidak memberikan peningkatan volume yang signifikan. Ini merupakan tanda klasik dari inefisiensi yang mungkin disebabkan oleh *overloading* atau desain yang tidak tepat. Di sisi lain, pada hari-3, meskipun menggunakan bahan peledak yang relatif sedikit (77,38 kg), volume batuan yang dihasilkan juga rendah (345,43 m^3) dengan PF 0,22. Ini dapat mengindikasikan batuan yang lebih keras atau adanya masalah dalam proses pengisian (*charging*) dan penyumbatan (*stemming*) yang menyebabkan energi peledak tidak tersalurkan dengan sempurna.

Oleh karena itu, variasi dalam data ini sangat mungkin merefleksikan kondisi lapangan yang tidak homogen. Untuk mencapai fragmen yang direncanakan (ukuran fragmen batuan seragam dan sesuai dengan kemampuan alat muat) diperlukan konsistensi dalam penerapan parameter geometri peledakan. Parameter seperti burden, spasi, kedalaman lubang, diameter lubang, dan *stemming* harus ditentukan dan dikontrol dengan ketat berdasarkan karakteristik batuan.

3.2 Ukuran Fragmen Peledakan Model Kuz-Ram

Model Kuz-Ram digunakan untuk memprediksi atau menghitung ukuran fragmen hasil peledakan yang menunjukkan fragmen rata-rata, indeks keseragaman, karakteristik ukuran, dan persentase ukuran fragmen sesuai dengan standar perusahaan yang dalam penelitian ini menggunakan ukuran 60 cm dan apabila melebih standar tersebut maka akan dikategorikan sebagai *boulder*. Tabel 3 menampilkan hasil perhitungan distribusi ukuran fragmen menggunakan model Kuz-Ram.

Hasil perhitungan distribusi ukuran fragmen batuan dengan model Kuz-Ram pada 15 kali peledakan di Pit Kasturi menunjukkan adanya variasi yang signifikan pada ukuran fragmen rata-rata, indeks keseragaman, dan distribusi persentase fragmen berukuran besar (>R60) dan kecil (<R60). Ukuran fragmen rata-rata selama periode pengamatan berkisar antara 63,01 cm hingga 78,55 cm dengan nilai rata-rata keseluruhan sebesar 70,34 cm. Variasi ini menunjukkan bahwa kondisi geometri peledakan dan karakteristik massa batuan sangat mempengaruhi hasil fragmentasi, di mana peledakan dengan *burden*, spasi, dan *stemming* yang lebih optimal cenderung menghasilkan ukuran fragmen lebih kecil dan mendekati target desain.

Indeks keseragaman (n) berkisar antara 0,58 hingga 1,06 dengan rata-rata 0,91. Nilai indeks keseragaman yang mendekati 1 menunjukkan distribusi ukuran fragmen yang relatif seragam, sedangkan nilai yang lebih rendah seperti pada hari 11 (0,58) mengindikasikan bahwa hasil peledakan menghasilkan distribusi fragmen yang heterogen dengan rentang ukuran yang cukup besar. Hal ini dapat dipengaruhi oleh kondisi batuan yang tidak seragam, adanya bidang diskontinuitas, atau ketidaktepatan dalam kontrol energi peledakan. Sebaliknya, nilai indeks keseragaman di atas 1, seperti pada hari-9 (1,06), menunjukkan kecenderungan fragmentasi yang lebih terkendali dan relatif seragam.

Tabel 3 Distribusi ukuran fragmen dengan model Kuz-Ram

Kegiatan Peledakan	X (cm)	n	Xc (cm)	Persentase Ukuran	
				>R60 (%)	<R60 (%)
Hari 1	71,76	0,98	101,35	54,96	44,60
Hari 2	76,07	1,04	11,20	60,13	40,74
Hari 3	64,34	0,70	64,54	38,66	54,97
Hari 4	63,01	0,94	85,14	48,65	49,96
Hari 5	75,57	0,93	10,11	53,99	44,51
Hari 6	68,47	0,94	92,81	51,49	47,22
Hari 7	66,55	0,80	77,27	44,23	51,59
Hari 8	68,54	1,02	10,25	55,70	44,80
Hari 9	66,44	1,06	10,75	56,50	44,77
Hari 10	74,64	0,91	97,90	52,69	45,43
Hari 11	65,12	0,58	54,19	34,63	57,01
Hari 12	78,55	0,81	91,88	49,27	46,83
Hari 13	73,39	0,86	90,75	49,59	47,42
Hari 14	74,21	1,05	11,17	59,50	41,44
Hari 15	68,37	0,96	94,25	52,23	46,82
Rata-rata	70,34	0,91	60,24	50,81	49,46

Keterangan:
X = Ukuran fragmen rata-rata
n = Indeks keseragaman
Xc = Karakteristik ukuran batuan

Dari segi karakteristik ukuran batuan (Xc), terlihat adanya variasi nilai pada beberapa kegiatan peledakan, seperti hari 2, 5, 8, 9, dan 14 yang menunjukkan ukuran karakteristik relatif kecil, yakni sekitar 10–11 cm. Hal ini menandakan bahwa fragmentasi yang dihasilkan pada kegiatan peledakan tersebut cenderung lebih kecil dibandingkan hari lainnya. Variasi ukuran karakteristik ini tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya *powder factor*, tetapi juga dipengaruhi oleh kombinasi parameter geometri peledakan, distribusi energi bahan peledak, dan kondisi massa batuan pada area peledakan. Sementara itu, pada hari-hari lain nilai karakteristik ukuran batuan jauh lebih besar, misalnya 101,35 cm pada hari 1 dan 97,90 cm pada hari 10 yang mengindikasikan bahwa peledakan pada saat itu menghasilkan fragmen yang relatif besar. Perbedaan nilai ini menunjukkan adanya variasi pengaruh parameter geometri peledakan terhadap mekanisme rekahan batuan dan distribusi ukuran fragmen hasil peledakan.

Distribusi persentase ukuran fragmen besar (>R60) dan kecil (<R60) relatif seimbang, dengan nilai

rata-rata masing-masing 50,81% dan 49,46%. Namun, kecenderungan variasi tetap terlihat, misalnya pada hari 11 di mana fragmen kecil mendominasi (57,01%) akibat tingginya tingkat fragmentasi, sedangkan pada hari 2 dan 14 fragmen besar mendominasi (>59%) menunjukkan hasil peledakan yang menghasilkan material bongkah (*boulder*) dalam jumlah lebih besar. Proporsi yang seimbang secara keseluruhan menunjukkan bahwa rancangan geometri peledakan yang diterapkan sudah cukup mendekati target, meskipun masih terdapat potensi perbaikan untuk mengurangi dominasi fragmen kasar yang berlebihan.

Dengan mempertimbangkan pembahasan sebelumnya mengenai *Powder Factor* (PF), hubungan antara efisiensi bahan peledak dan kualitas fragmentasi dapat dianalisis lebih lanjut. Sebagai contoh, hari 12 memiliki PF yang sangat efisien (0,17 kg/m³) tetapi menghasilkan ukuran fragmen rata-rata terbesar (78,55 cm) dengan indeks keseragaman yang cukup rendah (0,81). Ini menunjukkan bahwa penggunaan bahan peledak yang sangat irit justru dapat menghasilkan fragmentasi yang lebih besar dan tidak merata dan pada akhirnya dapat meningkatkan biaya jika diperlukan penanganan selanjutnya, seperti peledakan ulang. Sebaliknya, hari-hari dengan PF tinggi seperti hari 4 (0,25 kg/m³) justru menghasilkan ukuran fragmen rata-rata yang relatif lebih kecil (63,01 cm). Oleh karena itu, tujuan utamanya bukan hanya meminimalkan PF, tetapi menemukan titik optimum dimana PF yang digunakan dapat menghasilkan fragmentasi yang memenuhi target ukuran dan keseragaman dengan biaya total terendah (termasuk biaya peledakan, pemuatan, pengangkutan, dan peremukan).

Secara umum, hasil ini memperlihatkan bahwa geometri peledakan berperan krusial dalam mengendalikan ukuran fragmen overburden. Parameter *burden*, spasi, *stemming*, dan kedalaman *subdrilling* perlu dioptimalkan untuk mencapai fragmentasi ideal, di mana distribusi ukuran fragmen lebih seragam dengan dominasi ukuran sedang yang sesuai untuk kegiatan pemuatan dan pengangkutan material *overburden*. Ketidakteraturan distribusi pada beberapa sesi peledakan juga mengindikasikan bahwa variasi kekerasan batuan dan keberadaan bidang lemah, turut memberikan pengaruh signifikan terhadap hasil akhir. Dengan demikian, pengendalian geometri peledakan berdasarkan teori R.L. Ash yang dipadukan dengan model Kuz-Ram dapat menjadi pendekatan efektif dalam meminimalkan fragmentasi yang tidak sesuai serta meningkatkan efisiensi operasional penambangan di Pit Kasturi.

3.3 Ukuran Fragmen Peledakan Aktual

Ukuran fragmen peledakan aktual diidentifikasi dengan bantuan program komputer yang dapat menghitung ukuran dan menganalisis distribusi fragmen dari batuan hasil peledakan dengan menggunakan algoritma pemrosesan citra digital. Analisis dilakukan terhadap 15 sampel foto sebagai representatif setiap kegiatan peledakan, dimana masing-masing foto diproses untuk menghasilkan grafik distribusi ukuran fragmen dan hasil analisis distribusi ukuran kumulatif. Proses analisis meliputi segmentasi otomatis untuk memisahkan masing-masing fragmen, deteksi batas, pengukuran parameter geometri, dan klasifikasi ukuran berdasarkan diameter ekivalen. Luarannya berupa data kuantitatif berupa kurva distribusi ukuran kumulatif, nilai fragmentasi karakteristik, indeks keseragaman, dan persentase material yang memenuhi spesifikasi target fragmentasi. Tabel 4 menunjukkan distribusi ukuran fragmen batuan aktual menggunakan bantuan program komputer. Gambar 3 menunjukkan salah satu foto hasil analisis fragmen dengan program komputer.

Tabel 4 Distribusi ukuran fragmen aktual

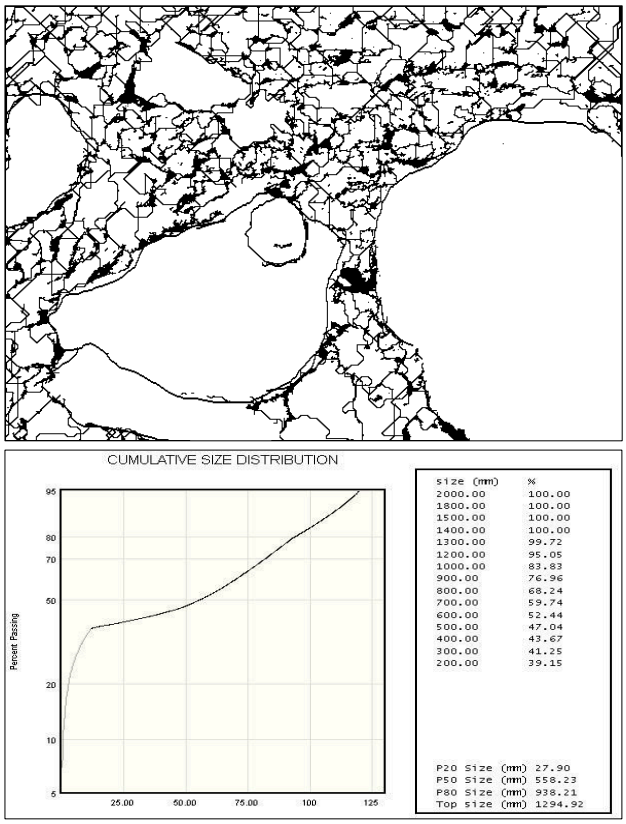
Kegiatan Peledakan	Persentase (%) lolos ukuran 60 cm	Persentase (%) tertahan ukuran 60 cm
Hari 1	47,24	52,76
Hari 2	29,32	70,68
Hari 3	59,32	40,68
Hari 4	55,35	44,65
Hari 5	47,55	52,45
Hari 6	52,44	47,56
Hari 7	56,23	43,77
Hari 8	45,53	54,47
Hari 9	45,51	54,49
Hari 10	48,7	51,3
Hari 11	60,94	39,06
Hari 12	55,04	44,96
Hari 13	51,13	48,87
Hari 14	43,76	56,24
Hari 15	49,97	50,03
Rata-rata	49,87	50,13

Persentase fragmen yang lolos dan tertahan pada ukuran 60 cm selama 15 hari peledakan memberikan gambaran terhadap kualitas fragmentasi yang dihasilkan pada kegiatan peledakan di Pit Kasturi. Ambang batas (standar) 60 cm ini umumnya dipilih karena merepresentasikan ukuran maksimum yang dapat diterima untuk penanganan lebih lanjut. Secara rata-rata, hasil peledakan menunjukkan pembagian yang hampir seimbang dengan 49,87% fragmen berhasil lolos ukuran 60 cm dan 50,13% masih tertahan. Namun, nilai rata-rata ini mengindikasikan variasi yang sangat besar dan signifikan antar hari peledakan dan menunjukkan ketidakkonsistenan dalam efektivitas geometri peledakan yang diterapkan.

Variasi persentase lolos ukuran 60 cm yang berkisar dari 29,32% di hari 2 hingga 60,94% di hari 11

Copyright © 2026 Munir et. al.
This work is licensed under the CC-BY-SA license

menunjukkan perubahan kinerja peledakan yang berbeda-beda. Hari 2 dan hari 14 dengan persentase 43,76% menunjukkan kinerja yang kurang optimal, di-



Gambar 3 Hasil analisis fragmen dengan program komputer

mana hanya kurang dari 45% material yang berukuran di bawah 60 cm. Hal ini berarti lebih dari 55% material hasil peledakan pada waktu tersebut diklasifikasikan sebagai fragmen berukuran besar yang akan memerlukan penanganan khusus. Hal ini bukan hanya menambah biaya operasional secara signifikan tetapi juga menyebabkan penundaan dalam rantai produksi dan menghambat produktivitas alat muat dan angkut. Sebaliknya, pada hari 3 dengan persentase 59,32%, Hari 11 dengan persentase 60,94%, dan Hari 7 dengan persentase 56,23% menunjukkan kegiatan peledakan menghasilkan fragmentasi yang jauh lebih baik dengan lebih dari 55% material telah memenuhi standar ukuran sehingga tidak memerlukan penanganan lebih lanjut.

Oleh karena itu, hasil analisis tersebut menyimpulkan bahwa desain geometri peledakan yang diterapkan selama 15 hari belum mencapai tingkat konsistensi yang diperlukan dalam kegiatan peledakan overburden di Pit Kasturi sehingga diperlukan rekomendasi lebih lanjut untuk mendapatkan ukuran fragmen yang sesuai dengan standar.

3.4 Rekomendasi Geometri Peledakan

Berdasarkan hasil analisis fragmentasi pada 15 hari kegiatan peledakan di Pit Kasturi maka rekomendasi geometri peledakan perlu diberikan melalui simulasi perhitungan pada dua teori yang berbeda untuk dapat diterapkan pada kegiatan peledakan selanjutnya. Rekomendasi yang diberikan menggunakan simulasi perhitungan menurut teori R. L. Ash dan ICI Explosive Orica yang ditunjukkan **Tabel 5**.

Tabel 5 Perbandingan rekomendasi geometri peledakan R. L. Ash dan ICI Explosive Orica

Parameter Peledakan	Satuan	R. L. Ash	ICI Explosive Orica
Burden (B)	m	5,2	5,0
Spacing (S)	m	6,2	6,0
Stemming (T)	m	3,6	4,0
Subdrilling (J)	m	1,0	1,6
Kedalaman Lubang (L)	m	7,8	7,6
Kolom Isian (PC)	m	4,2	3,6
Tinggi Jenjang (H)	m	6,8	6,0
Jumlah Lubang (n)	lubang	257	310
Loading Density (de)	kg/m	25	25
Jumlah Bahan Peledak (E)	kg	105	90
Volume Batuan Terbongkar (V)	m^3	217	180
Powder Factor (PF)	kg/m^3	0,48	0,50
Fragmentasi Rata-rata (X)	cm	36,61	34,60
Indeks Keseragaman (n)		1,17	1,16
Karakteristik Ukuran (Xc)	cm	62,06	53,07
Persentase Fragmen > R60	%	38,25	31,55
Persentase Fragmen < R60	%	61,75	68,45

Berdasarkan hasil simulasi, kedua rekomendasi geometri peledakan dari R. L. Ash dan ICI Explosive Orica memberikan prediksi kinerja yang berbeda dengan implikasi operasional yang signifikan bagi kegiatan peledakan di Pit Kasturi. Meskipun kedua desain memiliki *Powder Factor* (PF) yang sangat mirip,

yaitu 0,48 kg/m³ (R. L. Ash) dan 0,50 kg/m³ (ICI Explosive Orica), parameter geometri yang berbeda menghasilkan output fragmentasi yang dapat dibedakan dengan jelas. Desain ICI Explosive Orica memprediksikan ukuran fragmen rata-rata (X) yang lebih kecil, yaitu 34,60 cm dibandingkan dengan 36,61 cm pada desain R. L. Ash. Selain itu, persentase fragmen yang lolos ukuran 60 cm (<R60) pada desain ICI Explosive Orica mencapai 68,45%, lebih tinggi dibandingkan pada desain R. L. Ash sebesar 61,75%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pendekatan ICI Explosives Orica berpotensi menghasilkan distribusi fragmentasi yang lebih seragam dengan persentase fragmen oversize yang lebih rendah. Desain R. L. Ash pada dasarnya menggunakan hubungan empiris antara diameter lubang ledak dan parameter geometri peledakan, seperti burden dan spacing, untuk memperoleh rancangan peledakan yang efektif. Sementara itu, pendekatan ICI Explosives Orica mempertimbangkan keterkaitan parameter geometri peledakan dengan prediksi fragmentasi menggunakan model Kuz-Ram sehingga distribusi ukuran fragmen dapat diperkirakan secara lebih detail. Meskipun demikian, hasil pada penelitian ini masih bersifat prediktif berdasarkan simulasi perhitungan sehingga validasi melalui penerapan langsung di lapangan tetap diperlukan untuk mengevaluasi kesesuaian hasil fragmentasi aktual terhadap rekomendasi geometri yang diusulkan.

Hasil simulasi desain geometri R. L. Ash menawarkan efisiensi dalam proses pengeboran dengan jumlah lubang ledak yang lebih sedikit, namun berpotensi menimbulkan biaya tambahan yang besar akibat tingginya persentase ukuran fragmen yang oversize. Sebaliknya, desain ICI Explosives Orica, meski memerlukan lebih banyak lubang bor yang tentu meningkatkan biaya pengeboran, tetapi diprediksi memberikan penghematan biaya yang substansial pada penanganan material selanjutnya melalui fragmentasi yang lebih sesuai. Oleh karena itu, kegiatan peledakan di Pit Kasturi dapat mempertimbangkan desain ICI Explosives Orica sebagai alternatif desain geometri peledakan untuk mendukung produktivitas dan efisiensi operasional, meskipun validasi lapangan tetap diperlukan untuk memastikan kesesuaian hasil aktual terhadap hasil prediksi.

4 Kesimpulan

Berdasarkan tujuan penelitian, maka dapat disimpulkan bahwa nilai rata-rata powder factor aktual peledakan di Pit Kasturi adalah 0,20 kg/m³, namun mengindikasikan ketidakkonsistenan dalam penggunaan bahan peledak. Prediksi teoritis menggunakan Model Kuz-Ram menghasilkan ukuran fragmen rata-rata 70,34 cm yang kemudian diverifikasi melalui analisis distribusi ukuran fragmen aktual dengan perangkat lunak menunjukkan bahwa 50,13% material dikategorikan oversize (>60 cm). Hal ini membuktikan bahwa desain geometri yang berlaku belum optimal. Sebagai solusi, rekomendasi desain geometri diusulkan yang dihasilkan dari simulasi, teori ICI Explosive Orica dengan burden 5,0 m dan spacing 6,0 m diproyeksikan mampu menurunkan ukuran fragmen rata-rata menjadi 34,60 cm dan persentase oversize menjadi 31,55%, sehingga dapat mencapai fragmentasi yang lebih optimal dan efisien secara biaya untuk operasi peledakan selanjutnya.

Referensi

Agyei, G. & Nkrumah, M.O. 2021. A Review on the Prediction and Assessment of Powder Factor in Blast Fragmentation. Nigerian Journal of Technology 40, pp. 275–283. https://doi.org/10.4314/njt.v40i2.13

Cunningham, C. V. B. 2005. The Kuz-Ram fragmentation model – 20 years on. In: Holmberg, R., ed. Brighton Conference Proceedings, Brighton. European Federation of Explosives Engineers. pp. 201–210.

Dwinagara, B., Titisariwati, I., Rahma, Z.A. 2019. Kajian Teknis Metode Double Decking pada Kedalaman Lubang Bor 8 m untuk Mengurangi Isian Bahan Peledak per Delay Peledakan dengan Batasan PPV 3 mm/s di Tambang Batubara PT Kaltim Prima Coal. Jurnal Teknologi Pertambangan, 5(1), pp. 151-157.

Figueiredo, J., Torres, V., Cruz, R., Moreira, D. 2023. Blasting Fragmentation Study Using 3D Image Analysis of a Hard Rock Mine. Applied Sciences (Switzerland), 13(12), pp.7090. https://doi.org/10.3390/app13127090

Gao, P., Pan, C., Zong, Q., Dong, C. 2023. Rock Fragmentation Size Distribution Control in Blasting: A Case Study of Blasting Mining in Changjiu Shenshan Limestone Mine. Frontiers in Materials, 10, pp. 1330354. https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1330354

Irawan, J., Irvani, I., Oktarianty, H. 2020. Kajian Teknis Geometri Peledakan dan Powder Factor Terhadap Fragmentasi di PT Semen Padang Indarung. MINERAL, 5(1), pp. 1-6. https://doi.org/10.33019/mineral.v5i1.3052

Martireni, A.P., Munir, A.S. 2023. Analisa Laju Dilatansi pada Sudut Kekasaran dengan Uji Kuat Geser. Jurnal Geomine, 11, pp. 215–226. https://doi.org/https://doi.org/10.33096/geomine.v11i3.546

Copyright © 2026 Munir et. al.
This work is licensed under the CC-BY-SA license

Muhaemin, A., Wakila, M.H., Munir, A.S. 2019. Studi Teknis Aktivitas Pengeboran dan Peledakan PT Pamapersada Nusantara Distrik KPC Sangatta Kutai Timur Provinsi Kalimantan Timur, in: Seminar Nasional Perkembangan Teknologi Industri II. Fakultas Teknologi Industri UMI, Makassar, pp. 340–347.

Munir, A.S., Asmiani, N., Jafar, N., Wakila, M.H., Gouw, J.F.R.P. 2023. Analysis of Blasting Geometry on Blasting Production Results at PT Semen Bosowa Maros. International Journal of Applied Sciences and Smart Technologies, 5(2), pp. 195-212. https://doi.org/10.24071/ijasst.v5i2.6423

Munir, A.S., Sulistianto, B., Simangunsong, G.M., Widodo, N.P. 2017. A physical modelling to validate numerical modelling on rock block displacement. 4th ISRM Young Scholars Symposium on Rock Mechanics, pp. 212–215.

Nurwaskito, A., Putra, R.A., Munir, A.S., Anwar, H. 2022. Analisis Penggunaan Balldeck pada Kegiatan Peledakan untuk Meminimalisir Flyrock. Jurnal Geomine, 10, pp. 280–291. https://doi.org/10.33536/jg.v10i03.1544

Pebrianto, R., Wibowo, S., Al Hadi, A. 2025. Kajian Teknis Perencanaan Desain Peledakan Untuk Mengurangi Getaran Tanah di PT Pamapersada Nusantara Site PT Bukit Asam Tbk. MINERAL, 10(1), pp. 7-16. https://doi.org/10.33019/r2ftaz19

Putrilia, B., Poalahi, S., Rembah, R., Munir, A.S. 2022. Analisis Kestabilan Lereng pada Pit Bengkirai Tambang Terbuka Batubara di PT Guruh Putra Bersama Site Gunung Sari Kecamatan Tabang Kabupaten Kutai Kartanegara Kalimantan Timur. Jurnal Geomine, 10, pp. 156–167. https://doi.org/10.33536/jg.v10i2.1178

Sadiq, M.R. 2021. Implementasi Bottom Air Deck dan Expand Pattern secara Terintegrasi dalam Rangka Optimalisasi Penggunaan Bahan Peledak di Pit South Pinang PT Kaltim Prima Coal. Indonesian Mining Professionals Journal, 3(1), pp. 17–30. https://doi.org/10.36986/impj.v3i1.39

Salu, S.P., Gunawan, G., Ambarsari, I. 2024. Analisis Perbandingan Bahan Peledak Menggunakan Anfo dan Emulsion Matriks Terhadap Fragmentasi Peledakan Pada Penambangan Batugamping Quarry Blok B5 Utara PT Semen Tonasa Kabupaten Pangkep Provinsi Sulawesi Selatan. OPHIOLITE: Jurnal Geologi Terapan 5(2), pp. 87–94. https://doi.org/10.56099/ophi.v5i2.p87-94

Shehu, S.A., Mohd Hashim, M.H., Awang Kechik, N.A.H. 2021. Preliminary Assessment of The Effects of Blast Design Factors on Fragmentation at Lafarge Kanthan Limestone Quarry, Chemor, Perak. ASEAN Engineering Journal 10(2), pp. 58-72. https://doi.org/10.11113/aej.v10.16598

Simangunsong, G.M. 2021. Effect of Blasting Geometry and Water on Velocity of Detonation of Heavy ANFO Explosive, in: International Symposium on Earth Science and Technology 2021. Kyushu University, Fukuoka, pp. 102–107.

Sinulingga, A.P., Franto, F., Pitulima, J. 2022. Perencanaan Design Geometri Peledakan Berdasarkan Karakteristik Massa Batuan di Bench M PT Tanjung Bukit Nunggal Kabupaten Bangka Tengah. MINERAL, 7, pp. 36–40. https://doi.org/10.33019/mineral.v7i1.3336

Suratman, W.A., Dwinagara, B. 2022. Analisis Fragmentasi Batuan Hasil Peledakan Menggunakan Metode Screening Di Gunung Rego Kabupaten Kulonprogo Daerah Istimewa Yogyakarta, in: Seminar Nasional Rekayasa Teknologi dan Informasi (ReTII) Ke-17. Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, pp. 140–144.

Toha, M.T., Juniah, R., Yusuf, M. 2022. Optimalisasi Pemberaian Overburden dengan Metode Ripping dan Peledakan di Banko Barat PT Bukit Asam Tbk. Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara, 18(1), pp. 13–22. https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol18.No1.2022.1182

Yudha, W., Aldiyansyah, Tugo, L.J. 2025. Analisis Fragmentasi Hasil Peledakan Batugamping dengan Metode Pemrosesan Gambar Digital Menggunakan Perangkat Lunak Wipfrag. OPHIOLITE: Jurnal Geologi Terapan, 6(2), pp. 92–99. https://doi.org/10.56099/ophi.v6i2.p92-99

Yussupov, K., Myrzakhmetov, S., Aben, K., Nehrii, S., Nehrii, T. 2021. Optimization of The Drilling-and-Blasting Process to Improve Fragmentation by Creating of A Preliminary Stress in A Block. E3S Web of Conferences, 280, pp. 08015. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128008015