

Evaluasi Geometri Peledakan terhadap Fragmentasi Batuan di Pit Tambang

Epsilon K.A. Fatoni, Adang Darman, Aniyatin, Lukisman

Universitas Prof. Dr. Moestopo (Beragama, Jakarta, Indonesia)
efsilonkaf@dsn.moestopo.ac.id

Abstract

Blasting activities play a crucial role in open pit mining operations, particularly in determining the quality of rock fragmentation that directly affects loading and hauling efficiency. This study aims to evaluate the blasting geometry applied in an open pit coal mine and analyze its influence on the resulting rock fragmentation. The research was conducted at Pit 3 East Banko Tengah, PT Bukit Asam Tbk, using a quantitative descriptive approach based on field observations, direct measurements, and documentation of blasting activities. Data were analyzed using the Kuz-Ram fragmentation model and image analysis with Split Desktop software to determine fragment size distribution. The results indicate that the existing blasting geometry produced uneven fragmentation with a significant proportion of oversized material. Adjustments to burden, spacing, stemming, and hole depth parameters were found to improve fragmentation distribution and reduce the occurrence of boulders. The proposed blasting geometry demonstrates better fragmentation performance, supporting more efficient excavation and loading processes. This study confirms that proper evaluation and optimization of blasting geometry are essential to achieving optimal rock fragmentation and improving operational efficiency in open pit mining.

Keywords: *blasting geometry; rock fragmentation; open pit mining; Kuz-Ram model; image analysis*

Abstrak

Kegiatan peledakan merupakan tahapan penting dalam operasi penambangan terbuka karena sangat menentukan kualitas fragmentasi batuan yang berpengaruh langsung terhadap efisiensi kegiatan penggalian dan pemuatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi geometri peledakan yang diterapkan pada tambang terbuka batubara serta menganalisis pengaruhnya terhadap fragmentasi batuan yang dihasilkan. Penelitian dilakukan di Pit 3 Timur Banko Tengah PT Bukit Asam Tbk dengan pendekatan deskriptif kuantitatif melalui observasi lapangan, pengukuran langsung, dan dokumentasi kegiatan peledakan. Analisis data dilakukan menggunakan metode Kuz-Ram dan metode image analysis dengan perangkat lunak Split Desktop untuk mengetahui distribusi ukuran fragmentasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa geometri peledakan aktual menghasilkan fragmentasi yang kurang seragam dengan masih ditemukannya bongkahan berukuran besar. Perbaikan parameter geometri peledakan berupa burden, spacing, stemming, dan kedalaman lubang terbukti mampu meningkatkan kualitas fragmentasi batuan. Geometri peledakan usulan menghasilkan fragmentasi yang lebih optimal dan mendukung peningkatan efisiensi kegiatan penambangan.

Kata Kunci: geometri peledakan; fragmentasi batuan; tambang terbuka; Kuz-Ram; analisis citra

PENDAHULUAN

Kegiatan penambangan dengan metode tambang terbuka (open pit mining) merupakan salah satu metode yang paling banyak diterapkan dalam industri pertambangan batubara di Indonesia. Metode ini dipilih karena dinilai lebih ekonomis dan efisien untuk endapan batubara yang berada pada kedalaman relatif dangkal. Salah satu tahapan penting dalam penambangan terbuka adalah kegiatan pembongkaran batuan penutup (overburden) dan batuan antar lapisan (interburden) yang umumnya dilakukan dengan metode pemboran dan peledakan (drilling and blasting). Keberhasilan kegiatan peledakan sangat menentukan kelancaran tahapan penambangan selanjutnya, khususnya proses penggalian dan pemuatan material [1].

Peledakan pada tambang terbuka bertujuan untuk memberai massa batuan agar memiliki ukuran fragmentasi yang sesuai dengan kapasitas dan kemampuan alat gali-muat yang digunakan. Fragmentasi batuan yang baik akan mempermudah proses penggalian, meningkatkan produktivitas alat, serta menurunkan konsumsi energi dan biaya operasi secara keseluruhan [2]. Sebaliknya, fragmentasi yang tidak optimal, terutama terbentuknya bongkahan batuan berukuran besar (boulder), dapat menyebabkan terhambatnya proses pemuatan dan memerlukan tindakan tambahan seperti secondary blasting atau breaking, yang pada akhirnya meningkatkan biaya, waktu, serta risiko keselamatan kerja [3].

Salah satu faktor utama yang mempengaruhi kualitas fragmentasi batuan hasil peledakan adalah geometri peledakan. Geometri peledakan mencakup sejumlah parameter teknis seperti burden, spacing, diameter lubang bor, kedalaman lubang, panjang stemming, serta panjang kolom isian bahan peledak. Parameter-parameter tersebut menentukan distribusi energi ledak di dalam massa batuan dan sangat berpengaruh terhadap mekanisme perambatan gelombang kejut serta proses pecahnya batuan [4]. Oleh karena itu, perancangan dan evaluasi geometri peledakan menjadi aspek krusial dalam perencanaan kegiatan peledakan di tambang terbuka.

Dalam praktik di lapangan, geometri peledakan sering kali ditetapkan berdasarkan pengalaman sebelumnya atau standar operasional perusahaan tanpa dilakukan evaluasi secara berkala terhadap hasil fragmentasi yang dihasilkan. Padahal, kondisi geologi dan karakteristik massa batuan dapat bervariasi antar lokasi maupun antar jenjang penambangan. Perubahan sifat batuan, seperti tingkat kekerasan, struktur diskontinuitas, serta kondisi pelapukan, dapat menyebabkan geometri peledakan yang sebelumnya efektif menjadi kurang optimal apabila tetap diterapkan tanpa penyesuaian [5]. Hal ini menunjukkan pentingnya evaluasi geometri peledakan secara sistematis berdasarkan data aktual lapangan.

Evaluasi geometri peledakan tidak dapat dilepaskan dari analisis fragmentasi batuan. Salah satu pendekatan yang umum digunakan dalam analisis fragmentasi adalah metode Kuz-Ram. Metode ini merupakan model empiris yang mengaitkan parameter peledakan dan karakteristik batuan dengan distribusi ukuran fragmentasi hasil peledakan [6]. Model Kuz-Ram banyak digunakan karena relatif sederhana dan mampu memberikan gambaran awal mengenai kualitas fragmentasi yang dihasilkan. Namun demikian, metode ini bersifat prediktif dan perlu divalidasi dengan kondisi aktual di lapangan. Selain metode prediksi, perkembangan teknologi digital memungkinkan dilakukannya analisis fragmentasi batuan secara langsung melalui metode image analysis. Metode ini memanfaatkan dokumentasi foto fragmentasi batuan hasil peledakan yang kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak khusus untuk memperoleh distribusi ukuran fragmentasi secara kuantitatif [7]. Image analysis dinilai mampu memberikan representasi fragmentasi yang lebih mendekati kondisi nyata di lapangan dibandingkan metode empiris semata. Oleh karena itu, kombinasi antara metode Kuz-Ram dan image analysis sering digunakan untuk memperoleh hasil evaluasi fragmentasi yang lebih komprehensif.

PT Bukit Asam Tbk sebagai salah satu perusahaan tambang batubara terbesar di Indonesia menerapkan kegiatan peledakan secara intensif dalam proses pengupasan overburden dan interburden. Pada salah satu area operasinya, yaitu Pit 3 Timur Banko Tengah, kegiatan pemboran dan peledakan dilakukan secara rutin untuk mendukung target produksi. Namun demikian, dalam pelaksanaannya masih dijumpai fragmentasi batuan yang kurang seragam dan terbentuknya bongkahan berukuran besar yang berpotensi menghambat kinerja alat gali-muat. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya evaluasi terhadap geometri peledakan yang diterapkan di lokasi tersebut.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada evaluasi geometri peledakan yang diterapkan di Pit 3 Timur Banko Tengah PT Bukit Asam Tbk serta pengaruhnya terhadap fragmentasi batuan hasil peledakan. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil analisis fragmentasi menggunakan metode Kuz-Ram dan metode image analysis untuk memperoleh gambaran kualitas fragmentasi secara teoritis dan aktual. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk merumuskan

geometri peledakan usulan yang diharapkan mampu menghasilkan fragmentasi batuan yang lebih optimal dan mendukung efisiensi kegiatan penambangan.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat praktis bagi perusahaan dalam meningkatkan efektivitas perencanaan kegiatan peledakan, mengurangi potensi pembentukan boulder, serta menekan biaya operasi yang timbul akibat fragmentasi yang tidak optimal. Dari sisi akademik, penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi tambahan dalam kajian mengenai evaluasi geometri peledakan dan analisis fragmentasi batuan pada tambang terbuka, khususnya pada penambangan batubara di Indonesia.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan metode studi kasus pada kegiatan pemboran dan peledakan di tambang terbuka batubara. Pendekatan ini dipilih karena penelitian bertujuan untuk mengevaluasi kondisi geometri peledakan yang diterapkan di lapangan serta menganalisis pengaruhnya terhadap fragmentasi batuan hasil peledakan berdasarkan data aktual dan hasil pengolahan kuantitatif. Studi kasus dilakukan pada Pit 3 Timur Banko Tengah PT Bukit Asam Tbk yang secara operasional menerapkan metode drilling and blasting dalam kegiatan pembongkaran lapisan interburden.

Tahapan penelitian diawali dengan pengumpulan data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung di lapangan selama kegiatan pemboran dan peledakan berlangsung. Observasi lapangan dilakukan untuk memperoleh data teknis yang merepresentasikan kondisi aktual, termasuk parameter geometri peledakan seperti burden, spacing, diameter lubang bor, kedalaman lubang, panjang stemming, serta pola lubang ledak. Pendekatan observasi langsung dipilih karena mampu memberikan data yang akurat dan kontekstual terhadap kondisi operasional di lokasi penelitian [8].

Data sekunder diperoleh dari dokumen teknis perusahaan yang berkaitan dengan kegiatan peledakan, antara lain data geologi regional, stratigrafi, karakteristik massa batuan, serta spesifikasi peralatan pemboran dan peledakan. Data sekunder digunakan untuk melengkapi dan memperkuat analisis data primer serta memberikan gambaran kondisi geologi dan operasional yang mempengaruhi hasil peledakan [9].

Analisis fragmentasi batuan dilakukan menggunakan metode Kuz-Ram untuk memperoleh distribusi ukuran fragmentasi secara teoritis. Metode Kuz-Ram mengaitkan parameter geometri peledakan dan karakteristik batuan dengan hasil fragmentasi melalui pendekatan empiris yang telah banyak diterapkan pada kegiatan peledakan di tambang terbuka [6]. Hasil analisis Kuz-Ram digunakan sebagai acuan awal dalam mengevaluasi kesesuaian fragmentasi yang dihasilkan terhadap target operasional.

Untuk memperoleh gambaran fragmentasi batuan yang lebih mendekati kondisi aktual di lapangan, dilakukan analisis fragmentasi menggunakan metode image analysis. Metode ini dilakukan dengan memproses dokumentasi foto fragmentasi batuan hasil peledakan menggunakan perangkat lunak Split Desktop. Tahapan analisis meliputi kalibrasi skala, identifikasi batas fragmen, serta pengolahan data untuk menghasilkan distribusi ukuran fragmentasi batuan secara kuantitatif [7].

Hasil analisis fragmentasi dari metode Kuz-Ram dan image analysis kemudian dibandingkan untuk mengevaluasi efektivitas geometri peledakan yang diterapkan di lapangan. Perbandingan ini menjadi dasar dalam merancang geometri peledakan usulan dengan penyesuaian parameter utama yang berpengaruh terhadap fragmentasi batuan. Tahap akhir penelitian adalah interpretasi hasil analisis untuk merumuskan kesimpulan dan rekomendasi teknis guna meningkatkan kualitas fragmentasi batuan dan efisiensi kegiatan penambangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini diperoleh dari evaluasi kegiatan pemboran dan peledakan yang diterapkan pada Pit 3 Timur Banko Tengah PT Bukit Asam Tbk. Fokus utama pembahasan diarahkan pada

hubungan antara geometri peledakan yang diterapkan dengan kualitas fragmentasi batuan yang dihasilkan, baik secara teoritis maupun berdasarkan kondisi aktual di lapangan. Analisis dilakukan secara bertahap, dimulai dari evaluasi geometri peledakan aktual, analisis fragmentasi batuan, hingga perumusan geometri peledakan usulan dengan mengacu pada prinsip-prinsip evaluasi peledakan modern [10].

Evaluasi Geometri Peledakan Aktual

Geometri peledakan aktual yang diterapkan di lokasi penelitian ditentukan berdasarkan parameter operasional yang telah ditetapkan oleh perusahaan. Parameter tersebut meliputi burden, spacing, diameter lubang bor, kedalaman lubang, panjang stemming, serta jumlah lubang dalam satu kali peledakan. Berdasarkan data lapangan, geometri peledakan aktual menunjukkan variasi nilai parameter yang disesuaikan dengan kondisi jenjang dan karakteristik massa batuan pada area peledakan, sebagaimana direkomendasikan dalam sistem evaluasi massa batuan [11], [12].

Tabel 1. Geometri Peledakan Aktual

Ket	Lokasi	Burden	Spacing	Isian (m)	Stemming	Kedalaman	Powder Factor (Kg/Bc)	Jumlah Lubang
6/4/2023	Pit 3 Timur	7,2	8,9	3	4,3	7,3	0,17	52
12/4/202	Pit 3 Timur	7,2	8,8	3	4,1	7,1	0,18	40
16/4/202	Pit 3 Timur	8,1	8,7	3,7	4,2	7,9	0,18	40
18/4/202	Pit 3 Timur	8,2	9	3	4,9	7,9	0,14	40
19/4/202	Pit 3 Timur	7,7	8,8	3,1	4,1	7,2	0,17	50
27/4/202	Pit 3 Timur	7,7	8,8	3,1	4,8	7,9	0,15	70
4/5/2023	Pit 3 Timur	7,8	8,7	3,1	3,9	7	0,17	35
7/5/2023	Pit 3 Timur	6,6	7,8	1	5,1	6,1	0,08	35
9/5/2023	Pit 3 Timur	8,6	8,7	3,1	4,6	7,1	0,14	35
10/5/202	Pit 3 Timur	8,2	9	3	4,9	7,9	0,14	20

Sumber : Data Penulis, 2023

Evaluasi awal terhadap geometri peledakan aktual menunjukkan bahwa beberapa parameter, khususnya burden dan spacing, relatif besar jika dibandingkan dengan karakteristik massa batuan yang ada. Kondisi ini berpotensi menyebabkan distribusi energi ledak yang tidak merata sehingga proses perambatan gelombang kejut tidak mampu memecah massa batuan secara optimal. Hal ini sejalan dengan pernyataan Ash yang menyebutkan bahwa ketidaksesuaian antara burden dan spacing dengan sifat batuan dapat menghasilkan fragmentasi yang kasar dan tidak seragam [4], [13], [14].

Analisis Fragmentasi Batuan Hasil Peledakan

Fragmentasi batuan hasil peledakan dianalisis menggunakan dua pendekatan, yaitu metode Kuz-Ram dan metode image analysis. Metode Kuz-Ram digunakan untuk memperoleh distribusi fragmentasi secara teoritis berdasarkan parameter geometri peledakan aktual dan karakteristik batuan. Hasil analisis Kuz-Ram menunjukkan bahwa fragmentasi dominan masih berada pada ukuran relatif besar, yang mengindikasikan bahwa energi peledakan belum dimanfaatkan secara optimal untuk memecah massa batuan, sebagaimana juga dilaporkan dalam kajian fragmentasi empiris [6], [15].

Tabel 2. Perbandingan Distribusi Fragmentasi Metode Kuz-Ram

Tanggal	Burden	Spasi	Faktor Batuan (A)	Indeks Keseragaman (n)	Ukuran Rata-rata Fragmentasi (X)	Karakteristik Ukuran (Xc) cm	Ukuran > 80 cm	
	(m)	(m)					Tertahan (R) %	Lolos (Z) %
6/4/2023	7,2	8,9	3,6	0,627	34,31	61,60	31,90	58,10
12/4/2023	7,2	8,8	3,6	0,443	33,09	75,89	36,00	64,00
16/4/2023	8,1	8,7	3,6	0,735	34,76	57,27	27,90	72,10
18/4/2023	8,2	9	3,6	0,735	40,71	67,07	32,10	67,90
19/4/2023	7,7	8,8	3,6	0,663	34,39	59,81	29,80	70,20
27/4/2023	7,7	8,8	3,6	0,602	37,19	67,99	33,30	66,70
4/5/2023	7,8	8,7	3,6	0,690	36,82	62,62	30,70	69,30
7/5/2023	6,6	7,8	3,6	0,250	49,79	199,16	45,20	54,80
9/5/2023	8,6	8,7	3,6	0,629	40,80	73,12	34,80	61,20
10/5/2023	8,2	9	3,6	0,590	40,71	75,81	35,70	64,30
Rata-rata	7,73	8,72	3,6	0,596	38,26	80,04	34,14	65,86

Sumber : Data Penulis, 2023

Hasil perhitungan Kuz-Ram ini memberikan gambaran awal bahwa geometri peledakan aktual berpotensi menghasilkan fragmentasi yang kurang sesuai dengan target operasional alat gali-muat. Cunningham menyatakan bahwa fragmentasi hasil peledakan sangat sensitif terhadap perubahan parameter burden, spacing, dan powder factor, sehingga evaluasi parameter tersebut menjadi langkah penting dalam perbaikan desain peledakan [6], [16].

Untuk memperoleh gambaran fragmentasi yang lebih mendekati kondisi aktual di lapangan, dilakukan analisis fragmentasi menggunakan metode image analysis dengan perangkat lunak Split Desktop. Analisis ini dilakukan terhadap dokumentasi foto fragmentasi batuan hasil peledakan yang diambil setelah proses peledakan selesai.



Gambar 1. Fragmentasi batuan hasil peledakan

Tabel 3. Perbandingan Distribusi Fragmentasi Metode Kuz-Ram

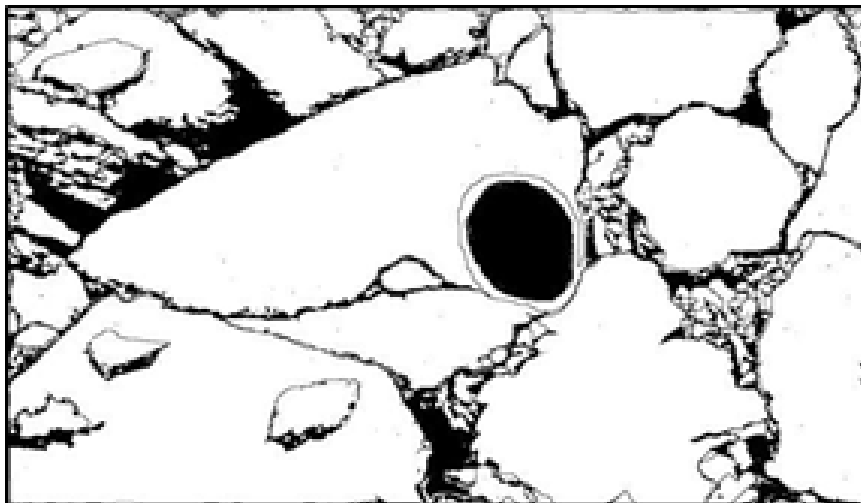
Tanggal	Burdan (m)	Spasi (m)	Faktor Batuan (A)	Indeks Keseragaman (n)	Ukuran Rata-rata Fragmentasi (X)	Karakteristik Ukuran (Xc) cm	Ukuran > 80 cm	
							Tertahan (R) %	Lolos (Z) %
6/4/2023	7,2	8,9	3,6	0,627	34,31	61,60	31,90	58,10
12/4/2023	7,2	8,8	3,6	0,443	33,09	75,89	36,00	64,00
16/4/2023	8,1	8,7	3,6	0,735	34,76	57,27	27,90	72,10
18/4/2023	8,2	9	3,6	0,735	40,71	67,07	32,10	67,90
19/4/2023	7,7	8,8	3,6	0,663	34,39	59,81	29,80	70,20
27/4/2023	7,7	8,8	3,6	0,602	37,19	67,99	33,30	66,70
4/5/2023	7,8	8,7	3,6	0,690	36,82	62,62	30,70	69,30
7/5/2023	6,6	7,8	3,6	0,250	49,79	199,16	45,20	54,80
9/5/2023	8,6	8,7	3,6	0,629	40,80	73,12	34,80	61,20
10/5/2023	8,2	9	3,6	0,590	40,71	75,81	35,70	64,30
Rata-rata	7,73	8,72	3,6	0,596	38,26	80,04	34,14	65,86

Sumber : Data Penulis, 2023

Hasil image analysis menunjukkan bahwa fragmentasi aktual di lapangan masih didominasi oleh fragmen berukuran besar, yang mengonfirmasi hasil prediksi metode Kuz-Ram. Ketidakteraturan ukuran fragmen menunjukkan bahwa proses pecahnya batuan tidak berlangsung secara merata. Maerz et al. serta Fourney et al. menyebutkan bahwa kondisi ini sering disebabkan oleh distribusi energi yang tidak seimbang dan pengaruh struktur diskontinuitas batuan [7], [16].

Perbandingan Hasil Analisis dan Diskusi

Perbandingan antara hasil analisis Kuz-Ram dan image analysis menunjukkan kecenderungan hasil yang searah, meskipun terdapat perbedaan nilai distribusi fragmentasi. Metode Kuz-Ram cenderung memberikan hasil fragmentasi yang lebih ideal karena bersifat prediktif, sedangkan image analysis merepresentasikan kondisi aktual yang dipengaruhi oleh heterogenitas massa batuan dan ketidaksempurnaan pelaksanaan peledakan [15], [17].



Gambar 2. Hasil Analisis Fragmentasi Split Desktop

Pendekatan kombinasi antara metode empiris dan metode berbasis citra diperlukan untuk memperoleh gambaran fragmentasi yang lebih komprehensif. Pendekatan ini sejalan dengan praktik evaluasi peledakan modern yang menekankan pentingnya validasi lapangan terhadap hasil perhitungan teoritis [10], [18].

Geometri Peledakan Usulan

Berdasarkan hasil evaluasi dan analisis fragmentasi, dilakukan perancangan geometri peledakan usulan dengan melakukan penyesuaian pada parameter utama, khususnya burden, spacing, dan panjang stemming. Penyesuaian ini bertujuan untuk meningkatkan distribusi energi peledakan agar lebih efektif dalam memecah massa batuan, sebagaimana direkomendasikan dalam desain peledakan permukaan [13], [14].

Tabel 4. Perbandingan Distribusi Fragmentasi Menggunakan *Software Split Dekstop 2.0*

Tanggal	X (cm)	Xmax (cm)	Tertahan 80 cm	Lolos 80
			(%)	(%)
6/4/2023	26,9	118	16,9	83,1
12/4/2023	41,9	111	16,8	83,2
16/4/2023	29,9	74,5	0	100
18/4/2023	22,1	57,2	0	100
19/4/2023	4	86,9	7,6	92,4
27/4/2023	23,3	86,8	6,1	93,9
4/5/2023	16,8	104,5	10,3	89,7
7/5/2023	46,8	120	45,5	55,5
9/5/2023	11	125	17,6	82,4
10/5/2023	4	199	13,4	86,6
Rata-rata	22,7	108,3	13,3	86,7

Sumber : Data Penulis, 2023

Hasil perancangan geometri peledakan usulan menunjukkan potensi perbaikan kualitas fragmentasi batuan dengan berkurangnya proporsi fragmen berukuran besar. Hal ini diharapkan dapat meningkatkan kinerja alat gali-muat dan menekan biaya operasi secara keseluruhan [5], [18].

Pembahasan Pengaruh Geometri Peledakan terhadap Kinerja Operasional

Fragmentasi batuan yang tidak optimal berdampak langsung terhadap kinerja operasional alat gali-muat dan alat angkut. Fragmentasi kasar meningkatkan waktu siklus pemuatan dan konsumsi bahan bakar serta keausan peralatan [2]. Kondisi ini juga meningkatkan potensi risiko keselamatan kerja dan kebutuhan secondary blasting [3], [19].

Kecojevic dan Radomsky menegaskan bahwa fragmentasi yang tidak sesuai dengan kapasitas alat merupakan penyebab utama inefisiensi operasional pada tambang terbuka [2]. Selain itu, Lottermoser menyatakan bahwa desain peledakan yang kurang optimal memiliki implikasi keselamatan dan lingkungan yang signifikan [3].

Implikasi Perancangan Geometri Peledakan Usulan

Penerapan geometri peledakan usulan diharapkan mampu meminimalkan tindakan korektif pasca-peledakan. Ash dan Bhandari menegaskan bahwa optimasi geometri peledakan merupakan pendekatan paling efektif untuk meningkatkan fragmentasi tanpa meningkatkan konsumsi bahan peledak [4], [5]. Evaluasi berkelanjutan terhadap hasil peledakan juga direkomendasikan untuk menjaga keberlanjutan operasi tambang terbuka [17], [19], [20].

Kontribusi Penelitian terhadap Praktik Peledakan Tambang Terbuka

Penelitian ini menunjukkan bahwa evaluasi geometri peledakan berbasis kombinasi metode empiris dan image analysis merupakan pendekatan yang efektif dan aplikatif. Pendekatan ini dapat

diterapkan secara berulang untuk meningkatkan produktivitas alat, menurunkan biaya operasi, dan meningkatkan keselamatan kerja pada tambang terbuka batubara [18], [20].

SIMPULAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi geometri peledakan yang diterapkan pada kegiatan pemboran dan peledakan di Pit 3 Timur Banko Tengah PT Bukit Asam Tbk serta menganalisis pengaruhnya terhadap kualitas fragmentasi batuan hasil peledakan. Berdasarkan hasil evaluasi geometri peledakan aktual, diketahui bahwa beberapa parameter utama seperti burden, spacing, dan panjang stemming belum sepenuhnya disesuaikan dengan karakteristik massa batuan di lokasi penelitian. Kondisi tersebut menyebabkan distribusi energi peledakan kurang merata dan menghasilkan fragmentasi batuan yang masih didominasi oleh fragmen berukuran besar.

Analisis fragmentasi batuan menggunakan metode Kuz-Ram menunjukkan bahwa fragmentasi teoritis yang dihasilkan dari geometri peledakan aktual cenderung menghasilkan ukuran fragmen yang relatif kasar. Hasil ini kemudian dikonfirmasi melalui analisis fragmentasi aktual menggunakan metode image analysis dengan perangkat lunak Split Desktop. Image analysis memperlihatkan bahwa fragmentasi batuan di lapangan masih belum seragam dan masih terdapat bongkahan batuan yang berpotensi menghambat kinerja alat gali-muat. Kesesuaian kecenderungan hasil antara metode Kuz-Ram dan image analysis menunjukkan bahwa geometri peledakan aktual memang belum optimal dalam menghasilkan fragmentasi yang sesuai dengan kebutuhan operasional.

Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, dilakukan perancangan geometri peledakan usulan dengan melakukan penyesuaian pada parameter utama yang berpengaruh terhadap fragmentasi batuan. Geometri peledakan usulan dirancang untuk meningkatkan efektivitas distribusi energi peledakan sehingga mampu memecah massa batuan secara lebih merata. Hasil perbandingan antara geometri aktual dan geometri usulan menunjukkan bahwa geometri usulan memiliki potensi untuk menghasilkan fragmentasi batuan yang lebih baik, mengurangi proporsi fragmen berukuran besar, serta meningkatkan efisiensi kegiatan penggalian dan pemuatan.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa evaluasi dan optimasi geometri peledakan merupakan langkah penting dalam meningkatkan kualitas fragmentasi batuan pada tambang terbuka. Penerapan geometri peledakan yang sesuai dengan kondisi massa batuan diharapkan dapat mengurangi kebutuhan secondary blasting, meningkatkan produktivitas alat, serta menekan biaya operasi. Penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi awal bagi perusahaan dalam melakukan evaluasi rutin kegiatan peledakan, serta sebagai bahan pertimbangan untuk penelitian lanjutan yang mengkaji hubungan antara fragmentasi batuan, produktivitas alat, dan efisiensi biaya secara lebih mendalam.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. de la Vergne, *Hard Rock Miner's Handbook*, 3rd ed. Edmonton, AB, Canada: Stantec Consulting Ltd., 2000.
- [2] R. Kecojevic and W. Radomsky, "Safety performance in mining operations," in *Proceedings of the SME Annual Conference & Expo*, Denver, CO, USA, 2012, pp. 1–8.
- [3] S. Lottermoser, "Mine wastes: characterization, treatment and environmental impacts," *Environmental Earth Sciences*, vol. 75, no. 3, pp. 1–14, 2016, doi: 10.1007/s12665-015-5220-4.
- [4] R. L. Ash, *Design of Blasting Rounds*, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1967.
- [5] B. Bhandari, *Engineering Rock Blasting Operations*, Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema, 1997.
- [6] C. V. B. Cunningham, "The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting," in *Proceedings of the 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, Luleå, Sweden, 1983, pp. 439–454.
- [7] J. Maerz, J. Palangio, and J. Franklin, "WipFrag image based granulometry system," *Fragblast*, vol. 1, no. 1, pp. 91–99, 1996.

- [8] J. W. Creswell, *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*, 4th ed. Thousand Oaks, CA, USA: Sage Publications, 2014.
- [9] S. Singarimbun and S. Effendi, *Metode Penelitian Survei*. Jakarta, Indonesia: LP3ES, 2006.
- [10] C. O. Olofsson, *Applied Explosives Technology for Construction and Mining*, 2nd ed. Applex, Sweden: Arla Plast AB, 1990.
- [11] J. A. Hudson, *Rock Engineering Systems: Theory and Practice*. London, UK: Ellis Horwood, 1992.
- [12] E. Hoek and J. Bray, *Rock Slope Engineering*, 3rd ed. London, UK: Institution of Mining and Metallurgy, 1981.
- [13] A. Konya and E. J. Walter, *Surface Blast Design*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1990.
- [14] M. A. Langefors and B. Kihlström, *The Modern Technique of Rock Blasting*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1978.
- [15] J. A. Sanchidrián, P. Segarra, and L. M. López, "Energy components in rock blasting," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 44, no. 1, pp. 130–147, 2007.
- [16] A. P. Fourney, D. J. Bonenberger, and J. W. Dally, "Fragmentation mechanisms in blasting," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 33, no. 6, pp. 513–524, 1996.
- [17] D. J. Scott, "Blast fragmentation: Prediction and assessment," *Mining Technology*, vol. 104, no. 1, pp. 9–17, 1995.
- [18] S. Singh and P. K. Singh, "Effect of blast design parameters on fragmentation," *Journal of Mines, Metals and Fuels*, vol. 50, no. 3, pp. 89–94, 2002.
- [19] M. Mohanty, "An overview of blasting techniques in surface mining," *Mining Engineers' Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 23–31, 2008.
- [20] A. Jimeno, C. Jimeno, and F. Carcedo, *Drilling and Blasting of Rocks*. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema, 1995.