

Analisis Komparatif Fragmentasi Aktual dan Kuz-Ram untuk Optimasi Geometri Peledakan Batugamping

Elang Alfari Akbar, Nofrohu Retongga, Asep Neris Bachtiar*

Program Studi Teknik Pertambangan, Sekolah Tinggi Teknologi Industri Padang

**Email: nofrohuretongga@sttind.ac.id*

SARI

Kegiatan peledakan pada tambang batugamping PT Semen Padang memerlukan geometri yang sesuai agar fragmentasi memenuhi target perusahaan dan mendukung proses peremukan. Penelitian ini membandingkan fragmentasi aktual hasil analisis Split Desktop dengan prediksi Kuz-Ram serta menyusun rekomendasi geometri menggunakan metode R.L. Ash. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif-komparatif dengan data dari 10 kegiatan peledakan selama periode penelitian. Data primer meliputi geometri peledakan dan dokumentasi fragmentasi, sedangkan data sekunder meliputi data geologi dan laporan perusahaan. Hasil analisis Split Desktop menunjukkan P80 aktual sebesar 23,53 cm dan top size sebesar 31,88 cm. Perhitungan Kuz-Ram menghasilkan ukuran rata-rata X sebesar 11,60 cm, ukuran karakteristik Xc sebesar 14,46 cm, dan indeks keseragaman n sebesar 1,66. Dengan persamaan Rosin-Rammler yang sama, diperoleh P80 teoritis sebesar 19,3 cm. Pada basis statistik yang sama, P80 aktual lebih besar sekitar 22,0% daripada P80 teoritis, sehingga fragmentasi aktual cenderung lebih kasar daripada prediksi Kuz-Ram. Metode R.L. Ash menghasilkan rekomendasi burden 2,78 m, spacing 3,36 m, stemming 1,95 m, subdrilling 0,83 m, tinggi jenjang 6,12 m, kedalaman lubang 6,95 m, diameter lubang 3 inci, serta powder factor 0,51 kg/m³. Rekomendasi tersebut masih bersifat teknis awal karena belum diverifikasi melalui trial blast serta belum disertai evaluasi biaya dan pemantauan flyrock, airblast, dan ground vibration. Target fragmentasi <80 cm diperlakukan sebagai target operasional perusahaan; angka 80 cm merupakan 80% dari nilai maksimum feed 100 cm yang dilaporkan, bukan asumsi bahwa 100 cm merupakan gape crusher.

Kata kunci: *Peledakan; fragmentasi; Kuz-Ram; R.L. Ash; Geometri Peledakan.*

How to Cite: Akbar, E.A., Retongga, N. dan Bachtiar, A.N. 2026. Analisis Komparatif Fragmentasi Aktual dan Kuz-Ram untuk Optimasi Geometri Peledakan Batugamping. Jurnal Geomine, 14 (2): 56-66.

Published By:

Fakultas Teknologi Industri
Universitas Muslim Indonesia

Address:

Jl. Urip Sumoharjo Km. 05
Makassar, Sulawesi Selatan

Email:

geomine@umi.ac.id

Article History:

Submit April 20, 2026

Received in from May 15, 2026

Accepted August 2, 2026

Lisensec By:

[Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



ABSTRACT

Blasting activities at LLC Semen Padang's limestone quarry require an appropriate blast geometry to achieve the company's fragmentation target and support downstream crushing. This study compares actual fragmentation analyzed using Split Desktop with fragmentation

predicted by the Kuz-Ram model and develops a preliminary blast-geometry recommendation using the R.L. Ash method. A quantitative descriptive-comparative approach was applied to data from 10 blasting events during the study period. Primary data comprised blast geometry and fragmentation documentation, supported by geological data and company reports. Split Desktop produced an actual P80 of 23.53 cm and a top size of 31.88 cm. The Kuz-Ram calculation produced a mean fragment size (X) of 11.60 cm, a characteristic size (X_c) of 14.46 cm, and a uniformity index (n) of 1.33. Applying the same Rosin-Rammler equation gives a theoretical P80 of 19.3 cm. On the same statistical basis, the actual P80 is approximately 22.0% larger than the theoretical P80, indicating coarser field fragmentation than predicted by Kuz-Ram. The R.L. Ash design gives a preliminary burden of 2.78 m, spacing of 3.36 m, stemming of 1.95 m, subdrilling of 0.83 m, bench height of 6.12 m, hole depth of 6.95 m, hole diameter of 3 in, and powder factor of 0.51 kg/m³. The recommendation remains a preliminary technical design because it has not been verified by a controlled trial blast and has not been supported by a cost comparison or direct monitoring of flyrock, airblast, and ground vibration. The <80 cm fragmentation target is treated as the company's operational target; 80 cm is 80% of the reported 100 cm maximum feed size, not an assumption that 100 cm represents crusher gape.

Keywords: *Blasting; fragmentation; Kuz-Ram; R.L. Ash; blasting geometry.*

PENDAHULUAN

PT Semen Padang merupakan perusahaan yang bergerak di bidang pertambangan batugamping sebagai bahan baku pembuatan semen di kawasan Bukit Karang Putih, Kelurahan Indarung, Kota Padang, Sumatera Barat. Sistem penambangan menggunakan kuari terbuka dengan pembongkaran batuan melalui pengeboran dan peledakan. Fragmentasi yang melebihi ukuran umpan yang dapat diterima oleh *crusher* dapat meningkatkan kebutuhan *secondary breaking* dan mengganggu kelancaran proses peremukan. Dalam penelitian ini, perusahaan menetapkan target fragmentasi <80 cm, sedangkan 100 cm merupakan nilai maksimum *feed* yang dilaporkan dalam data penelitian. Nilai 80 cm dihitung sebagai 80% dari 100 cm dan diperlakukan sebagai target operasional perusahaan. Nilai tersebut tidak secara otomatis disamakan dengan *gape crusher* karena data penelitian tidak menyatakan bahwa 100 cm merupakan ukuran bukaan (*gape*). Secara umum, aturan F80 pada *jaw crusher* menghubungkan ukuran umpan dengan *gape*, yaitu sekitar 80% material umpan harus berukuran lebih kecil dari *gape*; karena itu, istilah *maximum feed size* dan *gape* harus dibedakan dalam interpretasi hasil penelitian (McLanahan, 2023).

Penelitian sebelumnya tentang geometri peledakan dan fragmentasi telah banyak dilakukan. Contohnya, Harahap & Yulhendra (2020) yang mempelajari pengaruh geometri peledakan terhadap fragmentasi *limestone* di perusahaan yang sama, serta Fadel & Kopa (2021) yang menilai geometri peledakan berdasarkan *blastability index* dan metode R.L. Ash di area Bukit Karang PT. Semen Padang. Secara lebih luas, studi internasional oleh Adebola dkk. (2016) menegaskan bahwa ketidakteraturan fragmentasi hasil peledakan sering menjadi masalah utama dalam kegiatan pembongkaran batu di tambang terbuka, sehingga diperlukan optimasi berkelanjutan terhadap parameter geometri peledakan. Meskipun model prediksi seperti Kuz-Ram sudah banyak diverifikasi dan dimodifikasi dalam berbagai kondisi geologi (Gheibe dkk. 2009; Hekmat dkk. 2019), penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa optimalisasi geometri peledakan merupakan upaya yang terus berlangsung, baik di lokasi penambangan batugamping PT. Semen Padang maupun semen tambang batugamping/kapur secara umum.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa perkembangan teknologi analisis citra digital telah meningkatkan akurasi dalam mengevaluasi fragmentasi hasil peledakan dibandingkan dengan metode pengukuran tradisional. Sujatono (2024) Melaporkan bahwa perangkat lunak Split Desktop dapat menghasilkan estimasi distribusi ukuran fragmentasi dengan tingkat kesalahan yang relatif kecil dibandingkan dengan hasil di lapangan. Temuan ini sejalan dengan

laporan Hekmat dkk. (2019), yang membandingkan prediksi model Kuz-Ram modifikasi dengan analisis citra digital di tambang terbuka, serta Gheibe dkk. (2009), yang mengusulkan modifikasi indeks keseragaman berdasarkan *blastability index* untuk meningkatkan prediksi ukuran fragmentasi. Oleh karena itu, gabungan metode empiris Kuz-Ram dan analisis citra digital semakin banyak digunakan dalam evaluasi desain peledakan karena memberikan gambaran yang lebih lengkap tentang keberhasilan proses pembongkaran batuan.

Berdasarkan observasi lapangan, geometri lubang ledak dan kondisi massa batuan berpengaruh terhadap hasil fragmentasi. Hasil fragmentasi aktual yang diperoleh melalui analisis citra tidak selalu sama dengan prediksi empiris Kuz-Ram karena model prediksi menyederhanakan kondisi massa batuan dan pelaksanaan peledakan. Penelitian ini membandingkan fragmentasi aktual dan prediksi Kuz-Ram pada parameter statistik yang sama, yaitu P80, kemudian menggunakan metode R.L. Ash untuk menyusun rekomendasi geometri. Kebaruan penelitian terletak pada penyetaraan basis statistik sebelum perbandingan, sehingga perbedaan antara P80 aktual dan P80 teoritis dapat ditelusuri secara langsung. Pendekatan ini juga menempatkan rekomendasi geometri sebagai desain awal yang harus divalidasi melalui uji ledak, bukan sebagai desain yang langsung siap diterapkan dalam operasi rutin.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan deskriptif-komparatif dan termasuk dalam penelitian terapan (*applied research*). Tahapan analisis meliputi evaluasi geometri aktual, analisis fragmentasi aktual menggunakan Split Desktop 4.0, prediksi fragmentasi menggunakan Kuz-Ram, serta perancangan geometri awal menggunakan R.L. Ash. Perbandingan aktual dan teoritis dilakukan pada parameter P80 agar kedua hasil berada pada basis statistik yang sama. Parameter yang tidak tersedia secara lengkap dalam dokumen penelitian tidak diestimasi ulang; hal ini dinyatakan sebagai keterbatasan.

Penelitian dilaksanakan di Pit Limit Barat (PLB), salah satu front penambangan batugamping PT Semen Padang, di Kelurahan Indarung, Kecamatan Lubuk Kilangan, Kota Padang, pada ketinggian sekitar 200–350 mdpl, selama 1–31 Oktober 2025. Sebanyak 10 kegiatan peledakan yang terdokumentasi selama periode penelitian dianalisis. Variabel bebas meliputi *burden*, *spacing*, *stemming*, *subdrilling*, tinggi jenjang, diameter lubang, panjang kolom isian, dan *powder factor*. Variabel terikat meliputi P80, *top size*, serta distribusi ukuran fragmentasi. Dokumen sumber tidak mencantumkan secara lengkap jumlah foto per kegiatan, resolusi setiap foto, dan metadata pengambilan foto; oleh sebab itu, ketiga informasi tersebut tidak dibuat-buat dan dicantumkan sebagai keterbatasan dalam dokumentasi penelitian.

Data yang digunakan terdiri atas data primer, yaitu data geometri peledakan dan dokumentasi fragmentasi hasil pengukuran langsung di lapangan, serta data sekunder berupa peta geologi, peta kondisi wilayah, dan laporan geometri peledakan dari perusahaan. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui studi lapangan dan studi literatur, dengan mengacu pada teori dasar peledakan (Koesnaryo, 2001; Saptono, 2006).

Pengolahan data dilakukan melalui beberapa tahapan: (1) rekapitulasi geometri aktual dari 10 kegiatan peledakan; (2) analisis citra fragmentasi aktual menggunakan Split Desktop 4.0; (3) penentuan *blastability index* dan *rock factor*; (4) perhitungan ukuran rata-rata fragmentasi dan distribusi Kuz-Ram; (5) penyetaraan hasil teoritis ke P80 menggunakan fungsi Rosin-Rammler; dan (6) perancangan geometri awal menggunakan R.L. Ash. Pada analisis Split Desktop, skala citra dikalibrasi menggunakan objek pembanding berupa helm berdiameter sekitar 27 cm, sebagaimana didokumentasikan dalam data penelitian. Hasil P80 digunakan sebagai parameter utama perbandingan. Jumlah foto per peledakan, resolusi foto, dan prosedur penggabungan beberapa citra tidak tersedia dalam dokumen sumber, sehingga hasil analisis tidak diklaim sebagai estimasi ketidakpastian yang terkuantifikasi.

HASIL PENELITIAN

Geometri Peledakan Aktual

Data geometri peledakan aktual diperoleh dari pengamatan langsung di lapangan selama periode penelitian pada 10 kegiatan peledakan. Rekapitulasi nilai rata-rata parameter geometri peledakan aktual disajikan pada Tabel 1.

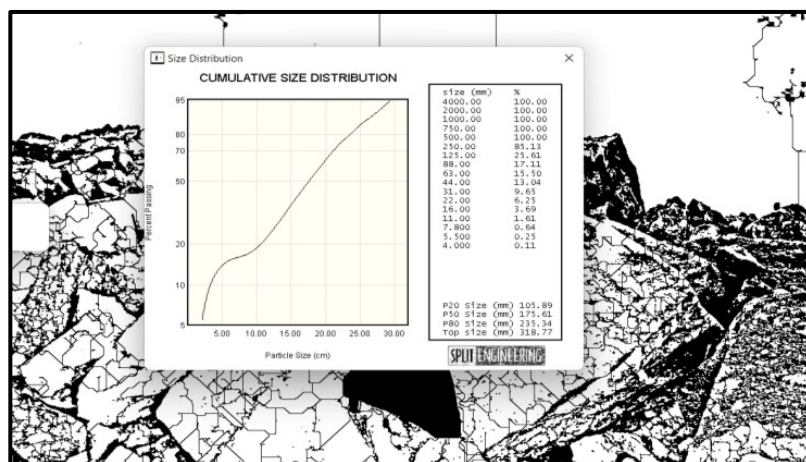
Tabel 1. Rata-Rata Geometri Peledakan Aktual di Lapangan

Parameter	B (m)	S (m)	J (m)	L (m)	H (m)	T (m)	PC (m)	De (inci)
Rata-rata	3,80	3,90	0,80	10,05	11,03	4,00	7,00	5,00

Geometri aktual dari 10 kegiatan peledakan memiliki *burden* rata-rata 3,80 m dan *spacing* 3,90 m. Data per kegiatan menunjukkan variasi *burden* 3–4 m dan *spacing* 3–5 m, sedangkan *subdrilling*, *stemming*, panjang kolom isian, dan diameter lubang masing-masing tercatat sekitar 0,80 m, 4,00 m, 7,00 m, dan 5 inci. Rata-rata tinggi jenjang yang diperoleh dari nilai L pada masing-masing baris data adalah sekitar 10,05 m. Rasio *spacing* terhadap *burden* (S/B) sebesar 1,03. Nilai ini digunakan sebagai deskripsi kuantitatif geometri aktual dan tidak ditafsirkan secara langsung sebagai bukti bahwa distribusi energi belum optimal, karena penilaian tersebut juga dipengaruhi oleh karakteristik massa batuan, diameter lubang, bahan peledak, *stemming*, serta akurasi pemboran.

Fragmentasi Aktual (Split Desktop 4.0)

Fragmentasi hasil peledakan dianalisis menggunakan perangkat lunak Split Desktop 4.0. Dokumentasi foto menggunakan helm berdiameter sekitar 27 cm sebagai objek skala sebagaimana tercantum dalam data penelitian. Dengan skala tersebut, hasil analisis menunjukkan P80 sebesar 23,53 cm dan *top size* sebesar 31,88 cm. Karena dokumen sumber tidak menyediakan pengukuran ulang diameter helm pada setiap foto, resolusi foto, atau estimasi ketidakpastian kalibrasi, nilai tersebut diperlakukan sebagai hasil analisis dataset yang tersedia, bukan sebagai pengukuran dengan ketidakpastian statistik yang telah dihitung.



Gambar 1. Distribusi Fragmentasi Aktual Hasil Analisis Split Desktop 4.0

Nilai P80 sebesar 23,53 cm dan *top size* sebesar 31,88 cm berada di bawah target operasional perusahaan sebesar 80 cm. Dengan demikian, berdasarkan parameter fragmentasi yang tersedia, hasil peledakan aktual memenuhi batas ukuran yang ditetapkan oleh perusahaan. Namun, pemenuhan target ukuran tidak dengan sendirinya membuktikan bahwa *secondary breaking* tidak diperlukan sama sekali, karena keputusan tersebut juga dipengaruhi oleh distribusi ukuran, bentuk fragmen, kondisi *crusher*, dan prosedur operasi.

Fragmentasi Teoritis (Metode Kuz-Ram)

Perhitungan fragmentasi teoritis diawali dengan penentuan *blastability index* (BI) menggunakan persamaan Lily (1986): $BI = 0,5 \times (RMD + JPS + JPO + SGI + H)$. Nilai yang digunakan adalah $RMD=20$, $JPS=20$, $JPO=40$, $SGI=12,2$, dan $H=7$, sehingga $BI = 0,5 \times (20+20+40+12,2+7) = 49,60$. *Rock factor* dihitung dengan $A = 0,12 \times BI = 5,95$ dan dibulatkan menjadi 5,96 seperti pada data penelitian. Kategori yang mendasari skor tersebut adalah $RMD=$ blocky, $JPS=$ sedang, $JPO=$ dip ke dalam bidang bebas, $SGI=12,2$, dan $H=7$. Dengan demikian, asal skor dapat ditelusuri dari kategori yang tercantum dalam Tabel 2a. Perlu dicatat bahwa $SGI = 12,2$ ekuivalen dengan berat jenis sekitar $2,49 \text{ g/cm}^3$, berdasarkan $SGI = 25SG - 50$.

Tabel 2. Parameter Penyusunan *Blastability Index*

Parameter	Skor
<i>Rock Mass Description</i> (RMD)	20
<i>Joint Plane Spacing</i> (JPS)	20
<i>Joint Plane Orientation</i> (JPO)	40
<i>Specific Gravity Influence</i> (SGI)	12,2
<i>Hardness</i> (H)	7
<i>Blastability Index</i> (BI)	49,60
<i>Rock Factor</i> (A)	5,96

Setiap parameter penyusun BI diberi skor berdasarkan skala penilaian baku Lily (1986), yang ringkasnya dirangkum pada Tabel 2a, sehingga nilai pada Tabel 2 dapat dengan mudah direproduksi dan diverifikasi oleh pembaca.

Tabel 2a. Skala Penilaian Parameter *Blastability Index* menurut Lily (1986)

Parameter	Kategori	Skor
RMD	<i>Powdery/friable - Blocky - Totally massive</i>	10 - 20 - 50
JPS	Rapat (<0,1 m) - Sedang (0,1-1 m) - Jarang (>1 m)	10 - 20 - 50
JPO	Horizontal - Dip keluar bidang bebas - Tegak lurus - Dip ke dalam bidang bebas	10 - 20 - 30 - 40
SGI	$SGI = 25 \times SG - 50$ (SG = berat jenis batuan)	sesuai SG
H	Skala kekerasan batuan (relatif)	1 - 10

Berdasarkan skala Lily (1986), skor $RMD=20$ merepresentasikan massa batuan *blocky*, $JPS=20$ merepresentasikan spasi kekar sedang, $JPO=40$ merepresentasikan bidang kekar yang dip, dan $H=7$ merepresentasikan tingkat kekerasan relatif. $SGI = 12,2$ diperoleh dari berat jenis sekitar $2,49 \text{ g/cm}^3$. Kombinasi tersebut menghasilkan $BI = 49,60$. Nilai $A=5,96$ kemudian digunakan dalam perhitungan Kuz-Ram. Karena sebagian input numerik Kuz-Ram, seperti volume batuan per lubang, massa bahan peledak per lubang, dan *relative weight strength*, tidak ditampilkan secara terpisah dalam dokumen sumber, nilai keluaran $X=11,60 \text{ cm}$ dipertahankan sebagai hasil perhitungan penelitian dan tidak direkonstruksi menggunakan asumsi baru.

Nilai faktor batuan digunakan untuk menghitung ukuran rata-rata fragmentasi (X) menggunakan persamaan Kuz-Ram. Bentuk persamaan yang digunakan adalah $X = A(V/Q)^{0,8} Q^{0,167} (E/115)^{-0,633}$, dengan X sebagai ukuran rata-rata fragmentasi (cm), A sebagai *rock factor*, V sebagai volume batuan per lubang (m^3), Q sebagai massa bahan peledak per lubang (kg), dan E sebagai *relative weight strength* bahan peledak. Indeks keseragaman

Cunningham dihitung dengan bentuk umum $n = (2,2 - 14B/D)(1-W/B)[1+(S/B-1)/2]^{0,5(L/H)}$, dengan B sebagai burden (m), D sebagai diameter lubang (mm), W sebagai deviasi pemboran (m), S sebagai spacing (m), L sebagai panjang kolom isian (m), dan H sebagai tinggi jenjang (m). Untuk data penelitian diperoleh $X=11,60$ cm, $X_c=14,46$ cm, dan $n \approx 1,66$. Nilai n tersebut dapat diverifikasi dari hubungan $X_c = X/(0,693)^{(1/n)}$.

Tabel 3. Persentase Distribusi Ukuran Fragmentasi Metode Kuz-Ram

Ukuran (cm)	Tertahan (%)	Lolos (%)
10	58,15	41,85
20	18,00	82,00
30	3,48	96,52
40	0,45	99,55
50	0,04	99,96
60	0,00	100,00
70	0,00	100,00
80	0,00	100,00

Tabel 3 menunjukkan bahwa pada ukuran ayakan 80 cm, 100% material telah lolos, yang menandakan bahwa secara teoritis optimasi geometri dapat menghasilkan fragmentasi yang halus dan seragam, serta memenuhi target ukuran perusahaan. Distribusi berdasarkan persamaan Rosin-Rammler, $R(x) = 100 \times \exp[-(x/X_c)^n]$, digunakan untuk menghitung distribusi, di mana $R(x)$ adalah persentase bahan yang tertahan pada ukuran x , X_c adalah ukuran karakteristik sebesar 14,46 cm, dan n adalah indeks keseragaman yang menentukan kemiringan kurva distribusi. Nilai n dihitung dari hubungan $X_c = X/(0,693)^{(1/n)}$, dengan X sebagai rata-rata ukuran fragmentasi sebesar 11,60 cm, sehingga didapatkan n sekitar 1,66. Nilai ini berada dalam kisaran yang wajar untuk model Kuz-Ram (0,7-2,2) dan menunjukkan distribusi fragmentasi yang cukup seragam. Dengan menambahkan nilai n , parameter ini melengkapi data sebelumnya dan memudahkan verifikasi hasil perhitungan persentase lolos/tertahan. Meski model Kuz-Ram merupakan model empiris yang banyak digunakan di industri pertambangan, hasil prediksinya dipengaruhi oleh asumsi bahwa massa batuan bersifat homogen. Di lapangan, faktor seperti rekahan alami, perubahan litologi, tingkat pelapukan, dan variasi bahan peledak menyebabkan hasil fragmentasi aktual tidak selalu selaras dengan prediksi. Oleh karena itu, metode Kuz-Ram lebih cocok sebagai prediksi awal dalam perencanaan peledakan sebelum dilakukan evaluasi berbasis data lapangan.

Tabel 4. Hasil Fragmentasi Aktual (Split Desktop) dan Hasil Prediksi Teoritis (Kuz-Ram) pada Basis Statistik yang Setara

Parameter Fragmentasi	Aktual (Split Desktop)	Teoritis (Kuz-Ram)	Keterangan
P80 (cm)	23,53 (terukur langsung)	19,3 (dihitung dari Rosin-Rammler)	Basis statistik setara P80
Top size (cm)	31,88 (terukur langsung)	-	Ukuran maksimum aktual

Perbandingan aktual dan teoritis dilakukan pada P80 karena kedua nilai tersebut merupakan persentil yang sama. P80 aktual hasil Split Desktop sebesar 23,53 cm, sedangkan P80 teoritis berdasarkan $X_c = 14,46$ cm dan $n = 1,66$ sebesar sekitar 19,3 cm. Selisih kedua nilai tersebut sekitar 4,23 cm, sehingga P80 aktual lebih besar sekitar 22,0% daripada prediksi teoritis. Hal ini menunjukkan bahwa fragmentasi aktual cenderung lebih kasar dibandingkan dengan prediksi Kuz-Ram.

Perbedaan P80 aktual dan teoritis dapat dijelaskan secara hati-hati sebagai akibat dari perbedaan antara asumsi model dan kondisi di lapangan. Kuz-Ram merupakan model empiris yang menyederhanakan kondisi massa batuan dan parameter peledakan, sedangkan fragmentasi aktual dipengaruhi oleh diskontinuitas, variasi pelapukan dan kekompakan, deviasi pemboran, distribusi energi bahan peledak, serta kondisi pelaksanaan peledakan. Karena penelitian ini tidak mengukur setiap faktor tersebut secara kuantitatif, penjelasan tersebut diposisikan sebagai interpretasi mekanistik, bukan sebagai pembuktian kausal.

Hasil ini menunjukkan bahwa Kuz-Ram dapat digunakan sebagai alat prediksi awal, tetapi hasilnya perlu divalidasi terhadap fragmentasi aktual. Pada penelitian ini, validasi dilakukan melalui perbandingan P80, bukan dengan menyamakan P80 dan mean size. Pendekatan tersebut menghindari pencampuran dua statistik yang berbeda dan membuat interpretasi perbedaan 23,53 cm versus 19,3 cm lebih mudah ditelusuri.

Temuan ini menunjukkan bahwa model Kuz-Ram tetap berguna sebagai alat evaluasi awal dalam perencanaan peledakan, namun hasil prediksinya harus divalidasi dengan data lapangan yang sebenarnya. Gabungan analisis teoritis dan analisis citra digital menyediakan dasar evaluasi yang lebih lengkap, sehingga keputusan tentang optimalisasi geometri peledakan tidak hanya bergantung pada model empiris, tetapi juga mempertimbangkan kondisi operasi yang sebenarnya.

Tabel 5. Data Geometri Peledakan Aktual pada 10 Kegiatan Peledakan

No	Tanggal	B (m)	S (m)	J (m)	L (m)	H (m)	T (m)	PC (m)	De (inci)
1	17 Oktober 2025	4	4	0,8	10,05	11	4	7	5
2	19 Oktober 2025	4	4	0,8	9,30	10,7	4	7	5
3	20 Oktober 2025	4	4	0,8	10,10	11	4	7	5
4	23 Oktober 2025	4	4	0,8	10,43	11,3	4	7	5
5	24 Oktober 2025	4	4	0,8	9,98	11	4	7	5
6	25 Oktober 2025	4	4	0,8	10,05	11	4	7	5
7	26 Oktober 2025	3	3	0,8	9,97	11	4	7	5
8	29 Oktober 2025	3	3	0,8	10,10	11	4	7	5
9	30 Oktober 2025	4	4	0,8	10,30	11,2	4	7	5
10	31 Oktober 2025	4	5	0,8	10,20	11,1	4	7	5

Geometri aktual memiliki *burden* 3,80 m dan *spacing* 3,90 m dengan rasio S/B sebesar 1,03. Nilai tersebut hanya digunakan untuk menggambarkan konfigurasi pola aktual. Perubahan fragmentasi tidak dapat dikaitkan hanya dengan *burden* dan *spacing* karena parameter lain, seperti diameter lubang, *stemming*, panjang isian, sifat bahan peledak, kondisi massa batuan, dan deviasi pemboran, juga berpengaruh.

Hasil penelitian ini sejalan secara konseptual dengan studi yang menunjukkan bahwa prediksi empiris dan analisis citra digital dapat menghasilkan perbedaan karena kondisi massa batuan aktual tidak sepenuhnya tercermin dalam model. Temuan Yilmaz (2023) juga menunjukkan bahwa penentuan *rock factor* merupakan bagian penting dalam penggunaan Kuz-Ram dan bahwa data hasil peledakan aktual dapat digunakan untuk mengevaluasi parameter model. Oleh karena itu, hasil Kuz-Ram pada penelitian ini diperlakukan sebagai prediksi awal yang perlu dikalibrasi atau divalidasi dengan data lapangan.

Baik P80 aktual 23,53 cm maupun P80 teoritis sekitar 19,3 cm berada di bawah target operasional perusahaan sebesar 80 cm. Hasil ini menunjukkan bahwa kedua pendekatan

memprediksi fragmentasi yang memenuhi batas ukuran yang ditetapkan oleh perusahaan. Namun, pemenuhan target tersebut tidak cukup untuk menyimpulkan efisiensi *crusher* atau penghilangan *secondary breaking* tanpa data operasi peremukan.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat dipahami bahwa evaluasi fragmentasi sebaiknya tidak hanya bergantung pada satu metode analisis. Metode Kuz-Ram berfungsi sebagai alat prediksi pada tahap perencanaan peledakan, sementara analisis menggunakan Split Desktop memberikan gambaran kondisi nyata hasil peledakan di lapangan. Penggabungan kedua metode ini menyediakan dasar evaluasi yang lebih lengkap dan menjadi acuan untuk memperbaiki parameter *burden*, *spacing*, serta *powder factor* pada kegiatan peledakan berikutnya.

Geometri Peledakan Optimasi (Metode R.L. Ash)

Perhitungan geometri optimasi menggunakan metode R.L. Ash menghasilkan *burden* 2,78 m. Persamaan yang digunakan adalah $B = (K_b \times D_e/12) \times A_f \times V_f$, dengan $K_b = 38$ sebagai koefisien desain untuk kondisi batuan keras-kompak sebagaimana diterapkan dalam penelitian, $D_e = 3$ inci, $A_f = (SG_e/1,6)^{(1/3)}$ sebagai faktor koreksi densitas, dan $V_f = (VOD/12.000)^{(1/3)}$ sebagai faktor koreksi kecepatan detonasi. Nilai $SG_e = 1,30 \text{ g/cm}^3$ dan $VOD \approx 4.000 \text{ m/s}$ merupakan parameter desain yang dicantumkan dalam dokumen sumber, bukan hasil pengukuran lapangan. Karena dokumen tidak melampirkan lembar spesifikasi primer bahan peledak yang direncanakan, kedua nilai tersebut harus diperlakukan sebagai asumsi desain dan perlu diverifikasi terhadap produk yang benar-benar digunakan sebelum uji ledak dilakukan. Perhitungan menghasilkan $B \approx 2,78 \text{ m}$. Pemilihan diameter 3 inci juga merupakan hasil desain R.L. Ash, bukan bukti bahwa diameter tersebut sudah layak secara operasional.

Tabel 6. Geometri Peledakan Optimasi Metode R.L. Ash

Parameter	B (m)	S (m)	T (m)	J (m)	H (m)	L (m)	PC (m)	De (inci)
Nilai	2,78	3,36	1,95	0,83	6,12	6,95	5,00	3,00

Berdasarkan geometri optimasi, tinggi jenjang (H) ditetapkan sebesar 6,12 m, sedangkan kedalaman lubang (L) ditetapkan sebesar 6,95 m. Hubungan keduanya konsisten dengan subdrilling (J) sebesar 0,83 m, sehingga $L = H + J = 6,12 + 0,83 = 6,95 \text{ m}$. Volume batuan per lubang dihitung menggunakan tinggi jenjang, yaitu $V = B \times S \times H = 2,78 \times 3,36 \times 6,12 \approx 57,12 \text{ m}^3$. Dengan demikian, H digunakan sebagai tinggi jenjang pada perhitungan volume, sedangkan L digunakan sebagai kedalaman lubang.

Perbandingan Geometri Aktual dan Optimasi

Perbandingan parameter geometri peledakan aktual dan optimasi disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan Geometri Peledakan Aktual dan Optimasi

Parameter	Aktual	Rekomendasi	Selisih	Keterangan
<i>Burden</i> (m)	3,80	2,78	-1,02	Lebih rapat
<i>Spacing</i> (m)	3,90	3,36	-0,54	Lebih rapat
<i>Stemming</i> (m)	4,00	1,95	-2,05	Lebih pendek
<i>Subdrilling</i> (m)	0,80	0,83	+0,03	Relatif sama
Tinggi jenjang (m)	10,05	6,12	-3,93	Lebih rendah

Nilai *burden* dan *spacing* pada geometri rekomendasi lebih kecil daripada aktual, tetapi interpretasi distribusi energi tetap harus dipandang sebagai hipotesis desain yang perlu

divalidasi. Perubahan *stemming* juga penting karena memengaruhi *confinement* dan potensi energi yang terlepas ke atas.

Rasio *stemming* terhadap burden pada geometri rekomendasi adalah $T/B = 1,95/2,78 \approx 0,70$. Rasio tersebut merupakan indikator desain dan tidak dapat diperlakukan sebagai jaminan keselamatan. Karena nilainya berada pada batas bawah rentang yang dirujuk dalam literatur, desain ini harus divalidasi melalui uji ledak terkontrol dengan pemantauan *flyrock*, *airblast*, dan *ground vibration* sebelum digunakan dalam operasi rutin. Kesimpulan keselamatan tidak dibuat hanya berdasarkan rasio T/B.

Penurunan *burden* dan *spacing* dirancang untuk memperkecil luas pola per lubang dan berpotensi meningkatkan kontrol distribusi energi. Namun, efek aktual terhadap fragmentasi harus dibuktikan melalui uji ledak. Dengan perubahan geometri, evaluasi juga perlu mencakup produktivitas pemboran, konsumsi bahan peledak, fragmentasi, serta dampak lingkungan.

Perubahan diameter lubang dari 5 inci menjadi 3 inci merupakan rekomendasi teknis awal. Luas pola per lubang berubah dari $3,80 \times 3,90 = 14,82 \text{ m}^2$ menjadi $2,78 \times 3,36 = 9,34 \text{ m}^2$, atau berkurang sekitar 37%. Namun, jumlah lubang yang dibutuhkan untuk volume produksi yang sama tidak dapat ditentukan hanya dari rasio luas pola karena tinggi jenjang dan panjang lubang juga berubah. Data produktivitas alat bor, waktu pemboran, harga pemboran, harga bahan peledak, dan biaya peremukan tidak tersedia dalam dokumen sumber. Oleh karena itu, analisis ekonomi tidak dihitung secara numerik, dan rekomendasi 3 inci diposisikan sebagai desain teknis awal yang memerlukan evaluasi *time-and-motion*, meter pemboran, jumlah lubang, konsumsi bahan peledak, serta biaya total sebelum diterapkan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi Split Desktop, Kuz-Ram, dan R.L. Ash dapat digunakan sebagai kerangka evaluasi awal untuk peledakan batugamping. Keunggulan pendekatan ini adalah bahwa perbandingan aktual dan teoritis dilakukan pada parameter P80 yang sama, sehingga perbedaan hasil tidak disebabkan oleh perbedaan definisi statistik. Namun, rekomendasi geometri tetap harus diperlakukan sebagai desain awal sampai dibuktikan melalui uji coba ledak.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, yaitu: (1) optimasi belum diverifikasi melalui *trial blast*; (2) *powder factor* aktual belum tersedia sebagai pembanding; (3) data jumlah foto per peledakan, resolusi citra, dan ketidakpastian kalibrasi Split Desktop tidak terdokumentasi secara lengkap; (4) input numerik lengkap untuk merekonstruksi seluruh perhitungan Kuz-Ram tidak disajikan dalam dokumen sumber; (5) spesifikasi primer bahan peledak untuk desain 3 inci, produktivitas alat bor, biaya pemboran, biaya peledakan, dan biaya peremukan belum tersedia; serta (6) *flyrock*, *airblast*, dan *ground vibration* belum dimonitor secara kuantitatif. Keterbatasan tersebut membatasi interpretasi hasil sebagai rekomendasi teknis awal, bukan sebagai desain yang siap diterapkan dalam operasi rutin.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, analisis Split Desktop menghasilkan P80 aktual sebesar 23,53 cm dan *top size* sebesar 31,88 cm. Prediksi Kuz-Ram menggunakan $X_c = 14,46 \text{ cm}$ dan $n = 1,66$, sehingga P80 teoritis yang diperoleh dari kurva Rosin-Rammler adalah sekitar 19,3 cm. P80 aktual lebih besar sekitar 4,23 cm atau 22,0% dibandingkan P80 teoritis, menunjukkan kecenderungan fragmentasi aktual yang lebih kasar daripada prediksi teoritis. Metode R.L. Ash menghasilkan *burden* 2,78 m, *spacing* 3,36 m, *stemming* 1,95 m, *subdrilling* 0,83 m, tinggi jenjang $H = 6,12 \text{ m}$, kedalaman lubang $L = 6,95 \text{ m}$, diameter lubang 3 inci, dan *powder factor* $0,51 \text{ kg/m}^3$. Volume batuan yang digunakan dalam perhitungan adalah sekitar $57,12 \text{ m}^3$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Semen Padang yang telah memberikan izin penelitian serta menyediakan data dan fasilitas selama pelaksanaan penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Program Studi Teknik Pertambangan Sekolah Tinggi Teknologi Industri Padang atas dukungan akademik yang diberikan. Penghargaan turut disampaikan kepada seluruh dosen pembimbing, penguji, dan seluruh pihak yang telah

memberikan arahan, bantuan, serta masukan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

PUSTAKA

- Adebola, J. M., Ajayi, O. D., & Elijah, O. P. (2016). Rock Fragmentation Prediction using Kuz-Ram Model Rock Fragmentation Prediction using Kuz-Ram Model. *Journal of Environment and Earth Science*, 6(5), 110–115.
- Ash, R. L. (1963). The mechanics of rock breakage, parts I–IV. *Pit & Quarry*, 56(2–5), 98–100; 118–122; 126–131; 109–118. Metadata part II (standards for blasting design) dikonfirmasi pada *Pit & Quarry*, 56(3), 118–122.
- Dyno, N. (2010). *Blasting and explosives quick reference guide*. Dyno Nobel Asia Pacific.
- Fadel, M., & Kopa, R. (2021). Kajian Teknis Geometri Peledakan Berdasarkan Analisis Blastability Index dengan Perhitungan RL Ash Combine Vertical Energy Distribution (VED) Pada Penambangan Batu Kapur di Area 15.15 PT Semen Padang Bukit Karang Putih Kecamatan Lubuk Kilangan Kota Padang. *Bina Tambang*, 6(4), 112–120.
- Fauzy, M., Widodo, S., & Jafar, N. (2015). Analisis Biaya Peledakan Pada Proses Pembongkaran Batugamping Pt. Semen Bosowa Maros Provinsi Sulawesi Selatan. *Jurnal Geomine*, 3(1), 143–147. <https://doi.org/10.33536/jg.v3i1.15>
- Gheibe, S., Aghababaei, H., Hoseinie, S. H., & Pourrahimian, Y. (2009). Modified Kuz–Ram fragmentation model and its use at the Sungun Copper Mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(6), 967–973. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.05.003>
- Harahap, L. B. A., & Yulhendra, D. (2020). Analisis Pengaruh Geometri Peledakan Terhadap Fragmentasi Hasil Peledakan Limestone Pada PT. Semen Padang, Kota Padang. *Bina Tambang*, 6, 133–139.
- Hekmat, A., Munoz, S., & Gomez, R. (2019). Prediction of Rock Fragmentation Based on a Modified Kuz-Ram Model. *Springer International Publishing*, 69–79. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99220-4_6.
- Koesnaryo, S. (2001). *Teori Peledakan*. Bandung: Pusat Pendidikan dan Pelatihan Teknologi Mineral dan Batubara (Pusdiklat TekMIRA).
- Lily, P. A. (1986). *The Use of the Blastability Index in the Design of Blasts for Open Pit Mines. Dalam Proceedings of the AusIMM/TEAust Large Open Pit Mining Conference*.
- McLanahan. (2023). How to Size a Jaw Crusher. *McLanahan Corporation*. <https://www.mclanahan.com/blog/how-to-size-a-jaw-crusher>.
- Mpofu, M., Ngobese, S., Maphalala, B., Roberts, D., & Khan, S. (2021). The influence of stemming practice on ground vibration and air blast. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 121(1), 1–10. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1204/2021>.
- Murad, M., Setiawati, S., & Mukhtar, W. (2023). Rancangan geometri peledakan yang efisien untuk mendapatkan distribusi ukuran fragmentasi batu gamping. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 19(2), 95–110. <https://doi.org/10.30556/jtmb.vol19.no2.2023.1386>.
- Putera, W. T. W., Santoso, E., & Annisa, A. (2024). Pengaruh powder factor terhadap fragmentasi batuan hasil peledakan overburden di PT Amanah Anugerah Adi Mulia. *Jurnal Himasapta*, 9(2), 83. <https://doi.org/10.20527/jhs.v9i2.13281>.
- Sanchidrián, J. A., Segarra, P., Ouchterlony, F., & Gómez, S. (2022). The Influential Role of Powder Factor vs. Delay in Full-Scale Blasting: A Perspective Through the Fragment Size-Energy Fan. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(7), 4209–4236. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-02856-1>.
- Saptono, S. (2006). *Teknik Peledakan*. Diktat Kuliah Jurusan Teknik Pertambangan.
- Sujatono, S. (2024). Application Of Image Digital Processing To Evaluate Accuracy In Predicting Rock Fragmentation Induced By Blasting. *Jurnal Teknologi Full*, 8(4), 1–9.
- Suparno, F. A., Haeruddin, Aminah, S., & Andalas, D. T. (2022). Analisis Perbandingan Metode Kuz-Ram dan Digital Image Analysis pada Tanah Penutup Tambang Batubara PT Comparative Analysis of Kuz-Ram Method and Digital Image Analysis on Coal Mining

- Overburden, PT. XYZ, East Kalimantan. *Jurnal Teknologi Sumberdaya Mineral*, 3(2), 61–68.
- Tosun, A., & Konak, G. (2015). Determination of specific charge minimizing total unit cost of open pit quarry blasting operations. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(2), 1133–1144.
- Yilmaz, Ö. (2023). Rock factor prediction in the Kuz–Ram model and burden estimation by mean fragment size. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 33, 100415. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2022.100415>