

PREDIKSI FRAGMENTASI BATUAN HASIL PELEDAKAN DENGAN PENDEKATAN MODEL *KUZ-RAM* PADA RENCANA PELEDAKAN BATUGAMPING DI KAMPUS LAPANGAN PPSDM-GEOMINERBA

Rock Fragmentation Prediction by Blasting Based on Kuz-Ram Model on Limestone Blasting Plan at PPSDM-Geominerba Field Campus

Awang Suwandhi¹, Charles Tambunan²

¹Program Studi Teknik Pertambangan Sekolah Tinggi Teknologi Mineral Indonesia (STTMI),
Jln. Gatot Subroto 313, Bandung 40262.
Email: awang.suwandhi@gmail.com

²Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Geologi, Mineral dan Batubara
Jln. Jend. Sudirman No. 623 Bandung 40211.
Telp. (022) 6076756; Faks. (022) 6035506

ABSTRAK

Distribusi fragmentasi hasil peledakan batugamping adalah salah satu aspek yang dinilai pada diklat Pengelola Peledakan yang rencananya dilakukan di Kampus Lapangan PPSDM-Geominerba. Hasil peledakan harus mempertimbangkan tiga syarat, yaitu fraksi ukuran lebih besar daripada 80 cm (*boulder*) maksimum 5%, *powder factor* (PF) maksimum 0,30 kg/m³, dan ukuran fragmentasi terdistribusi merata. Geometri peledakan dirancang dengan tinggi jenjang vertikal 8 m, kedalaman lubang rata-rata 9,4 m dengan kemiringan 20°, spasi 3,45 m, dan *burden* 2,67 m. Berat total bahan peledak (ANFO) adalah 396,3 kg di dalam 18 lubang ledak dengan diameter 76 mm. Prediksi distribusi fragmentasi batuan model *Kuz-Ram* memperlihatkan hasil akhir peledakan mengandung *boulder* 9,53%, PF 0,28 kg/m³, dan indeks keseragaman 1,39. Rancangan geometri peledakan dimodifikasi dengan mengubah *burden* menjadi 2,4 m dan parameter lainnya relatif sama. Hasil peledakan diprediksi menyisakan *boulder* 5,76%, indeks keseragaman membaik jadi 1,50, tetapi PF meningkat 0,31 kg/m³. Modifikasi tersebut merupakan rancangan geometri peledakan optimum yang layak diterapkan pada awal peledakan di kampus lapangan.

Kata kunci: *fragmentasi batuan hasil peledakan, model kuz-ram, geometri peledakan, batugamping*

ABSTRACT

Fragmentation of blasting results is one of the aspects assessed in the training of the 1st Class Blaster whose the plan of blasting is carried out at the PPSDM-Geominerba field campus. The results of blasting must consider three conditions including a fraction size greater than 80 cm (boulder) maximum of 5%, a powder factor (PF) maximum of 0.30 kg/m³, and evenly fragmentation size distribution. Blasting geometry is designed with a vertical level of 8 m, average holes depth of 9.4 m with a slope of 20°, spaced 3.45 m, and burden 2.67 m. Total weight of explosives (ANFO) of 396,3kg charged in to the 18 blast holes with diameter of 76 mm. Rock fragmentation distribution predicted by Kuz-Ram model exposed a final result of blasting containing boulder of 9,53%, PF of 0,28 kg/m³, and uniformity index of 1,39. The design of blasting geometry is modified by changing the burden to 2.4 m and the other parameters being

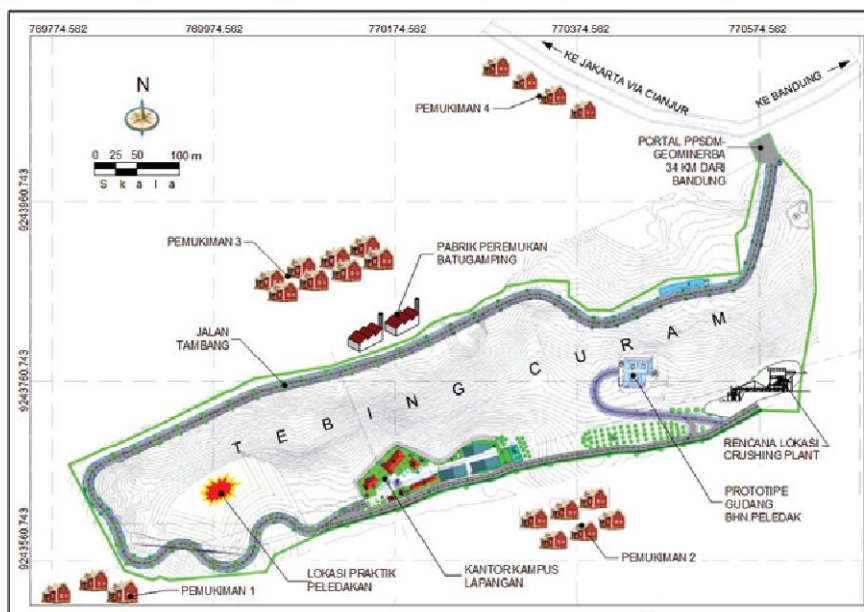
relatively the same. The results of blasting are predicted to leave a boulder of 5.76%, the uniformity index improves to 1.50, but the PF increases by 0.31 kg/m³. The modification is the optimum design of blast geometry that is feasible to be applied at the beginning of blasting activity on the field campus.

Keywords: rock fragmentation by blasting, kuz-ram model, blast geometry, limestone

PENDAHULUAN

Rencana praktikum diklat Pengelola Peledakan (Juru Ledak Kelas 1) dilaksanakan pada batugamping di Kampus Lapangan PPSDM-Geominerba yang lokasinya terletak di Bukit Arimbi, Desa Gunung Masigit, Kecamatan Cipatat, Kabupaten Bandung Barat, Provinsi Jawa Barat, sekitar 34 km dari Kota Bandung (Gambar 1). Praktikum peledakan pada hakikatnya merupakan penajaman ilmu peledakan agar setiap Pengelola Peledakan di perusahaan pertambangan memiliki kemampuan praktis dalam memprediksi distribusi ukuran fragmentasi sebelum peledakan dilakukan. Keterampilan memperkirakan distribusi fragmentasi hasil peledakan diperlukan karena berkaitan dengan efektivitas pemanfaatan fragmentasi tersebut pada tahap pekerjaan berikutnya. Distribusi tersebut antara lain pemuatan-pengangkutan, proses kominusi pada unit *crusher*, dan penjualan langsung ke konsumen.

Hasil peledakan batugamping diangkut ke unit *stone crusher* yang akan dibangun di areal kampus lapangan. Ukuran bukaan mulut *crusher* dirancang 1 m² dan ukuran ini merupakan parameter yang harus dipertimbangkan sebagai batas ukuran fraksi butir terbesar pada distribusi fragmentasi hasil peledakan. Berdasarkan pengalaman empiris di lapangan diperoleh bahwa proses kominusi (peremukan batu) di dalam unit *crusher* dapat bekerja efektif jika umpan batuan terbesar berukuran 80% dari ukuran mulut *crusher*. Dengan demikian, fraksi berukuran 80 cm merupakan ukuran fragmen terbesar untuk unit *crusher* di kampus lapangan dan ukuran fragmen lebih besar dari 80 cm tergolong *boulder*. Tujuan pengkajian ini adalah merancang geometri rencana peledakan jenjang (*bench blasting*) di kuari batugamping Kampus Lapangan PPSDM-Geominerba agar diperoleh distribusi fragmentasi yang dapat digerus dalam *crusher* berukuran bukaan mulut 100 cm secara efektif. Distribusi fragmentasi tersebut dipersyaratkan mengandung persentase fragmen berukuran lebih besar dari 80 cm (*boulder*) maksimum sekitar 5% dengan disertai *powder factor* (PF) kurang atau sama dengan 0,30 kg/bcm sebagaimana lazimnya PF pada tambang terbuka.



Gambar 1. Lokasi Kampus Lapangan di Desa Gunung Masigit, Kecamatan Cipatat, Kabupaten Bandung Barat, Provinsi Jawa Barat (Sumber: Pusdiklat Minerba, 2013)

METODOLOGI

Distribusi fragmentasi hasil peledakan diperoleh dari model *Kuz-Ram* yang pertama kali diperkenalkan oleh Cunningham (1983), berdasarkan persamaan Kuznetsov dan Rosin-Rammler. Model *Kuz-Ram* dievaluasi (Cunningham, 2005) dan hasilnya cukup akurat digunakan untuk memprediksi distribusi fragmentasi hasil peledakan sampai saat ini (Singh, dkk., 2016 dan Kobwe, 2018).

1. Persamaan *Kuznetsov*:

$$\bar{x} = A \left(\frac{V_o}{Q} \right)^{0,8} Q^{0,17} \quad (1)$$

Keterangan : $\bar{x}$ = ukuran fragmen rata-rata, cm

A = faktor batuan, yaitu 7 untuk batuan berkekuatan sedang, 10 untuk batuan keras dan banyak retakan, dan 13 untuk batuan keras dan sedikit retakan. Sampai saat ini digunakan faktor batuan paling kecil adalah 8 sekalipun untuk jenis batuan lemah. Belum ditemukan batuan dengan faktor lebih besar daripada 12.

V_o = volume batuan per lubang ledak, yaitu $B \times S \times H$, m^3

Q = berat bahan peledak TNT yang ekuivalen dengan energi dari muatan bahan peledak pada setiap lubang, kg

Apabila:

Q_e = berat bahan peledak yang digunakan per lubang.

E = *Relative Weight Strength* bahan peledak yang dipakai (ANFO = 100) ekuivalen dengan TNT (*Relative Weight Strength* = 115), maka:

$$Q_e \times E = Q \times 115$$

$$Q = Q_e \frac{E}{115}$$

Masukkan ke Persamaan (1): $\bar{x} = A \left(\frac{V_o}{Q_e} \right)^{0,8} Q_e^{0,17} \left(\frac{E}{115} \right)^{0,17} \left(\frac{E}{115} \right)^{-0,8}$; atau

$$\bar{x} = A \left(\frac{V_o}{Q_e} \right)^{0,8} Q_e^{0,17} \left(\frac{E}{115} \right)^{-0,63} \quad (2)$$

Nilai $\left(\frac{V_o}{Q_e} \right)$ merupakan inversi dari nilai *powder factor*, PF (kg/m^3) sehingga Persamaan (2) akan lebih bermanfaat bagi pelaksanaan di lapangan jika diubah menjadi Persamaan (3) di bawah ini.

$$\bar{x} = A (PF)^{-0,8} Q_e^{0,17} \left(\frac{115}{E} \right)^{0,63} \quad (3)$$

Dengan menggunakan Persamaan (3) akan mudah mendapatkan ukuran fragmentasi rata-rata pada nilai PF tertentu.

2. Persamaan distribusi fraksi batuan Rosin-Rammler:

$$R = e^{-\left(\frac{x}{x_c} \right)^n} \quad (4)$$

Keterangan: R = jumlah material tertahan di atas ayakan

x = ukuran ayakan

$$x_c = \frac{\bar{x}}{(0,693)^{1/n}}$$

n = indeks keseragaman butir

3. Indeks keseragaman butir algoritma Cunningham:

$$n = \left(2,2 - \frac{14B}{d} \right) \left(1 - \frac{W}{B} \right) \left(1 + \frac{A-1}{2} \right) \left(\frac{L}{H} \right) \quad (5)$$

Keterangan: B = burden, m

d = diameter lubang, mm

W = standar deviasi akurasi lubang bor, m

A = rasio spasi/burden

L = isian bahan peledak (PC), m

H = tinggi jenjang, m

Nilai n dalam kisaran 0,8 s.d. 2,2 dan menentukan bentuk kurva distribusi ukuran fragmentasi hasil peledakan. Distribusi ukuran butir cenderung seragam jika nilai n tinggi. Sebaliknya jika n bernilai kecil terjadi perbedaan yang besar antara porsi ukuran fragmen batuan yang kecil (*fine*) dan yang besar (*oversize*). Berdasarkan Persamaan (2), (4), dan (5) dapat dikembangkan kurva distribusi fragmentasi, yaitu kurva yang mengekspresikan persentase kumulatif lolos variasi ukuran fragmen. Di samping itu, dapat pula dibuat analisis frekuensi ukuran fragmen.

Desain peledakan dibangun berdasarkan parameter d, B, θ , S, L, dan J yang bentuk desainnya seperti terlihat pada Gambar 2. Tabel 1 memperlihatkan perhitungan setiap parameter dengan menerapkan rumusan empiris dari Konya (1990), Dyne-Nobel (2016), dan Orica (2017).

Tabel 1. Perhitungan parameter geometri peledakan

Parameter		Perhitungan parameter	Satuan
Diameter lubang	(d)		Mm
Burden terukur	(B _a)	25d – 40d	M
Kemiringan lubang	(θ)		(°)
Burden sebenarnya	(B _t)	B _a Cos(θ)	m
Spasi	(S)	1,1B _a – 1,4B _a (1,15B _a menghasilkan distribusi energi terbaik pada pola staggered)	m
Subdrill	(J)	8d – 12d	m
Stemming	(T)	0,7B _a – 1,2B _a atau 20d – 30d	m
Densitas ANFO	(ρ_{ANFO})		0,8 g/cc
Faktor muatan	(L _D)	($\rho_{ANFO} \times d^2$)/1273	kg/m
Kedalaman lubang	(L)		m
Kolom bhn. peledak	(PC)	(L – T)	m/lubang
Muatan bhn. peledak	(W _e)	PC x L _D	kg/lubang
Produksi	(P _B)	B _t x S x H	m ³ /lubang
Powder factor	(PF)	W _e /P _B	kg/m ³

HASIL PENGKAJIAN

Rancangan Peledakan

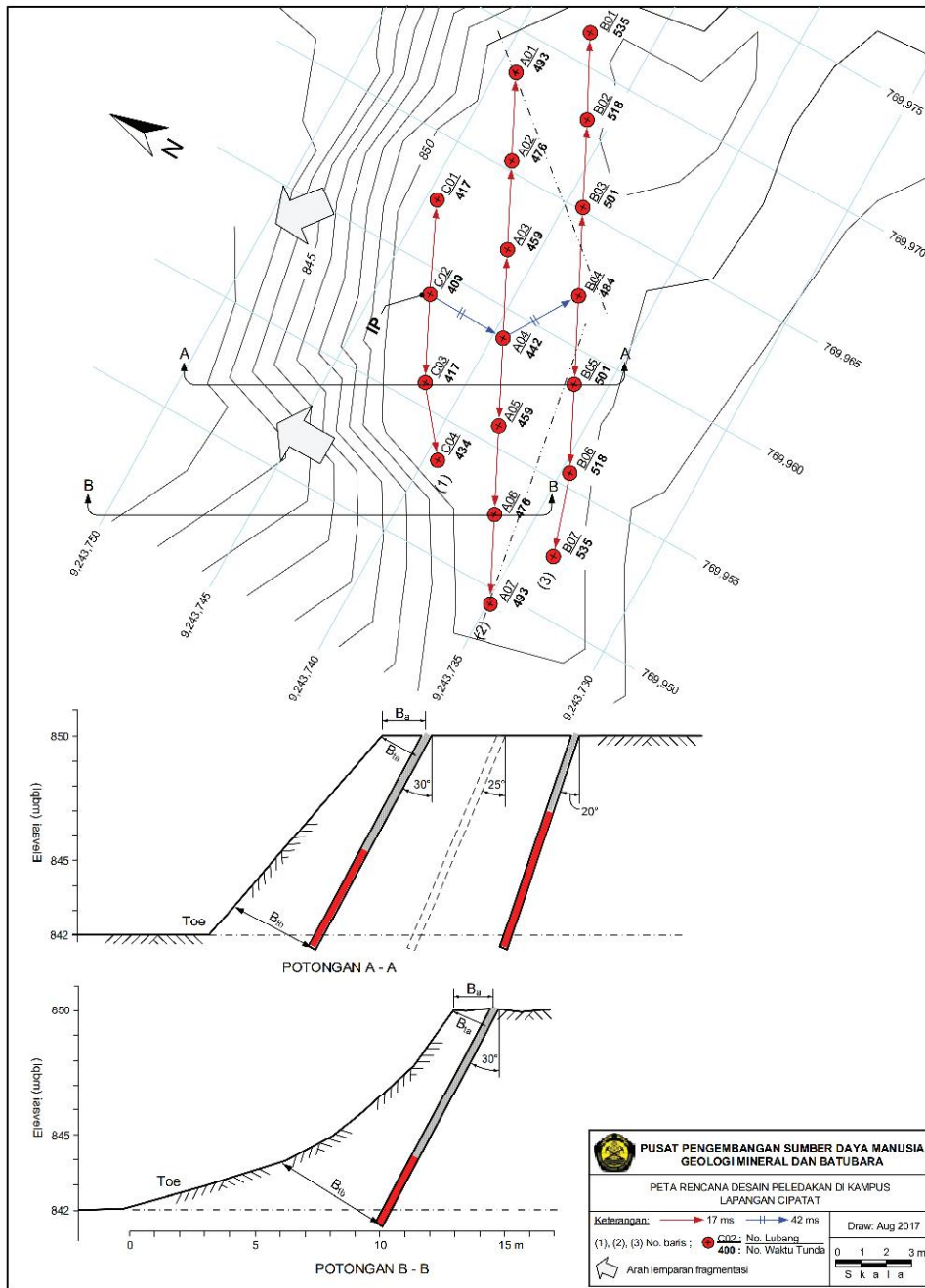
Pada rancangan peledakan ini ditetapkan diameter lubang ledak 76 mm (3 inci) dengan menggunakan alat bor CRD Furukawa HCR910-DS milik PPSDM-Geominerba. Dari hasil pengujian sifat fisik diperoleh densitas batugamping (ρ_r) antara 2,40 – 2,44 t/m³ (Pusdiklat Minerba, 2015). Untuk tujuan rancangan peledakan digunakan ρ_r rata-rata 2,42 t/m³. Peledakan akan menggunakan bahan peledak ANFO berdensitas 0,80 gr/cc dengan menerapkan sistem inisiasi *nonel* (lihat Gambar 2). Menurut (Suwandhi, dkk. 2017), jumlah lubang ledak pada awal peledakan yang ideal adalah 18 lubang setelah mempertimbangkan luas area yang akan diledakkan berdasarkan profil topografi yang ada (Gambar 2).

Lemparan hasil peledakan mengarah ke Barat Laut yang lerengnya memiliki kemiringan bervariasi antara 25° s.d. 35°. Dengan mempertimbangkan kemiringan lereng dan arah lemparan fragmentasi ke Barat Laut maka kemiringan seluruh lubang ledak pada posisi paling depan meliputi A01, C01, C02, C03, A06, dan A07 dibuat 30°, kecuali lubang C04 dibuat 25° karena kemiringan lerengnya sekitar 25°. Konsekuensinya, burden sebenarnya atau *true burden* (B_t) bagian atas dan bawah setiap lubang ledak tersebut berbeda. Dalam perhitungan produksi diterapkan B_t rata-rata, yaitu $(B_{ta} + B_{tb})/2$. B_{ta} adalah burden sebenarnya bagian atas lubang yang dihitung sebesar $B_a \cos(\theta)$ dan B_{tb} adalah burden sebenarnya bagian bawah yang diukur pada peta.

Kemiringan lubang pada baris ke-2 meliputi A02 s.d. A05 adalah 25° dan pada baris ke-3 seluruhnya 20°. Burden semu atau *apparent burden* (B_a) dari lubang ledak pada baris ke-2 dan ke-3 dihitung sebesar 40d. Jadi, dengan $d = 76$ mm maka $B_a = 3,04$ m (dibulatkan = 3 m). Dalam perhitungan produksi digunakan burden sebenarnya (B_t) yang diperoleh dari $B_t = B_a \cos(\theta)$. Untuk $\theta = 25^\circ$ pada lubang ledak baris ke-2 diperoleh $B_t = 2,7$ m dan $\theta = 20^\circ$ pada lubang ledak baris ke-3 diperoleh $B_t = 2,8$ m (Tabel 2).

Menurut ketentuan empiris dari (Dyno Nobel, 2016 dan Orica, 2017), spasi (S) yang dapat menghasilkan distribusi energi terbaik pada pola *staggered* adalah $1,15B_a$ (Tabel 1). Dengan demikian, pada awal rancangan peledakan ini seluruh lubang ledak berukuran $S = 3,5$ m. Panjang kolom *stemming* (T) pada lubang ledak vertikal diambil $T_v = B_a$, tetapi karena lubang ledaknya miring maka $T_i = B_a / \cos(\theta)$, kecuali untuk T_i pada nomor lubang ledak C01, C02, C03, C04, A01, A06, dan A07 yang langsung diukur dari peta sampai kedalaman tertentu agar $B_a = 3$ m (Gambar 2). Panjang kolom *subdrill* (J) vertikal ditetapkan $J_v = 8d$, dan J pada lubang ledak miring (J_i) dihitung sebesar $8d / \cos(\theta)$.

Kedalaman lubang ledak vertikal (L_v) diukur sampai level 841,9 mdpl (≈ 842 mdpl) dengan harapan setelah hasil peledakan diangkut terbentuk lantai jenjang (*floor bench*) yang rata. Level 842 mdpl berperan sebagai lantai jenjang maka L_v dapat dianalogikan sebagai tinggi jenjang (H). Kedalaman L_v berbeda-beda mengikuti profil permukaan topografi. Keadaan tersebut membuat kedalaman kolom lubang ledak miring (L_i) pun berbeda-beda, namun tetap ujung lubangnya berada pada level 842 mdpl (Gambar 2). Kedalaman L_i dihitung sesuai dengan sudut kemiringannya (θ) yang besarnya adalah $L_v / \cos(\theta)$. Berdasarkan pada ujung L_i tersebut maka panjang kolom miring muatan bahan peledak (PC_i) = $L_i + J_i - T_i$.



Gambar 2. Peta topografi area peledakan dan potongan melintang lubang ledak pada deret paling depan

Tujuan peledakan di samping memperoleh distribusi fragmentasi yang memuaskan juga dibatasi oleh nilai *Powder Factor* (PF), yaitu perbandingan antara bahan peledak ANFO(W_p) dan produksi peledakan (P_p). Berat ANFO per lubang adalah ($PC_i \times L_D$) dan produksi peledakan ($B_t \times S \times L_v$) yang merupakan volume *bank* karena belum diledakkan (Tabel 1). Selanjutnya, PF setiap lubang ledak dihitung dengan $\left(\frac{PC_i \times L_D}{B_t \times S \times L_v} \right)$ dalam satuan kg/m^3 (*bank*) atau kg/bcm . Untuk mengubah PF dalam satuan kg/t dihitung dengan $\left(\frac{PC_i \times L_D}{B_t \times S \times H \times \rho_r} \right)$, ρ adalah densitas batuan (t/m^3). Rekayasa

geometri peledakan yang diuraikan di atas diarahkan untuk memperoleh nilai PF maksimum 0,30 kg/m³ (*bank*) sesuai dengan kaidah empiris pada peledakan di tambang terbuka yang secara ekonomi masih menguntungkan.

Tabel 2. Rancangan geometri peledakan pada baris ke-1, ke-2, dan ke-3

Diameter lubang ledak (d) = 76 mm																			
Densitas ANFO (ρ_{ANFO}) = 0,8 g/cc																			
No.	No. Lub.	Koordinat		Level		L _v	Lubang Ledak		Burden				S	T _i	J _i	PC _i	W _e	P _B	PF
		Selatan	Utara	Atas	Bawah		θ	L _i	B _a	B _{ta}	B _{tb}	B _t							
1	C01	769.961	9.243.745	850,0	841,9	8,1	30	9,4	1,2	1,0	3,5	2,3	3,5	5,0	0,7	5,1	18,3	63,4	0,29
2	C02	769.958	9.243.743	850,1	841,9	8,2	30	9,5	1,6	1,4	3,5	2,4	3,5	5,0	0,7	5,2	18,9	69,3	0,27
3	C03	769.955	9.243.741	850,2	841,9	8,3	30	9,6	1,7	1,5	3,5	2,5	3,5	5,0	0,7	5,3	19,3	71,5	0,27
4	C04	769.953	9.243.739	850,0	841,9	8,1	25	9,0	0,8	0,7	3,5	2,1	3,5	6,2	0,7	3,4	12,5	59,2	0,21
Rata-rata Baris (1)						8,2		9,4	1,3	1,2	3,5	2,3	3,5	5,3	0,7	4,8	17,2	65,8	0,26
5	A01	769.967	9.243.745	851,0	841,9	9,1	30	10,5	1,5	1,3	3,5	2,4	3,5	3,5	0,7	7,7	28,1	75,3	0,37
6	A02	769.964	9.243.743	850,6	841,9	8,7	25	9,6	3,0	-	-	2,7	3,5	3,3	0,7	7,0	25,3	81,6	0,31
7	A03	769.961	9.243.741	850,0	841,9	8,1	25	9,0	3,0	-	-	2,7	3,5	3,3	0,7	6,3	23,0	76,4	0,30
8	A04	769.958	9.243.740	850,0	841,9	8,1	25	8,9	3,0	-	-	2,7	3,5	3,3	0,7	6,3	22,9	76,0	0,30
9	A05	769.955	9.243.738	850,5	841,9	8,6	25	9,5	3,0	-	-	2,7	3,5	3,3	0,7	6,8	24,8	80,4	0,31
10	A06	769.952	9.243.736	850,9	841,9	9,0	30	10,4	1,5	1,3	4,5	2,9	3,5	6,0	0,7	5,1	18,5	89,9	0,21
11	A07	769.949	9.243.734	851,0	841,9	9,1	30	10,5	1,4	1,2	4,5	2,9	3,5	6,0	0,7	5,2	18,9	89,7	0,21
Rata-rata Baris (2)						8,7		9,8	2,3	1,3	4,2	2,7	3,5	4,1	0,7	6,4	23,1	81,3	0,29
12	B01	769.970	9.243.744	850,8	841,9	8,9	20	9,5	3,0	-	-	2,8	3,5	3,2	0,6	6,9	25,2	86,6	0,29
13	B02	769.967	9.243.742	850,0	841,9	8,1	20	8,6	3,0	-	-	2,8	3,5	3,2	0,6	6,1	22,0	78,8	0,28
14	B03	769.964	9.243.740	850,1	841,9	8,2	20	8,7	3,0	-	-	2,8	3,5	3,2	0,6	6,2	22,5	80,0	0,28
15	B04	769.961	9.243.738	850,2	841,9	8,3	20	8,9	3,0	-	-	2,8	3,5	3,2	0,6	6,3	22,9	81,0	0,28
16	B05	769.958	9.243.736	850,0	841,9	8,1	20	8,6	3,0	-	-	2,8	3,5	3,2	0,6	6,1	22,1	79,0	0,28
17	B06	769.955	9.243.734	851,0	841,9	9,1	20	9,7	3,0	-	-	2,8	3,5	3,2	0,6	7,1	25,9	88,5	0,29
18	B07	769.952	9.243.733	850,8	841,9	8,9	20	9,5	3,0	-	-	2,8	3,5	3,2	0,6	6,9	25,2	86,6	0,29
Rata-rata Baris (3)						8,5	-	9,1	3,0	-	-	2,8	3,5	3,2	0,6	6,5	23,7	82,9	0,29
Parameter rata-rata dari seluruh lubang						8,5	-	9,4	2,4	-	-	2,7	3,5	4,0	0,7	6,1	-	-	-
PF dari seluruh lubang																	396,3	1413,2	0,28
KETERANGAN:																			
L _v = Tinggi jenjang vertikal		(m)				B _a = Burden semu = 40d. Utk no.lub. C01-C04,				J _i = 8d/Cos θ		(m)							
θ = Kemiringan lub. dari vertikal		(°)				A01, A06, A07 diukur dari peta		(m)		PC _i = L _i + J _i - T _i		(m)							
L _i = Lubang miring = L _v /Cos θ		(m)				B _{ta} = Burden sebenarnya atas = B _a x Cos θ		(m)		L _D = (d ² x ρ_{ANFO})/1273		(kg/m)							
T _i = B _a /Cos θ . Utk no.lub. C01-C04,						B _{tb} = Burden sebenarnya bawah dari peta		(m)		W _e = PC _i x L _D		(kg/lub.)							
A01, A06, A07 diukur dr. peta		(m)				B _t = (B _{ta} + B _{tb})/2		(m)		P _B = B _t x S x H		(m ³)							
Level = Tinggi dari permukaan laut (mdpl)						S = 1,15B _a		(m)		PF = W _e /P _B		(kg/m ³)							

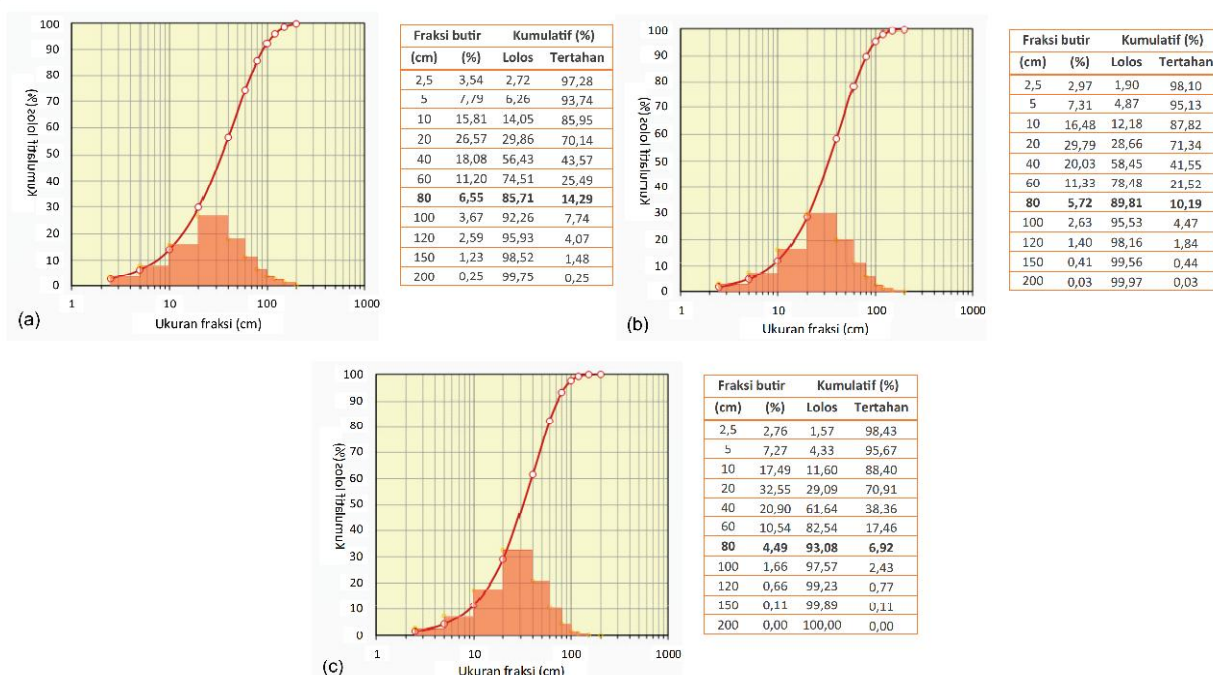
Estimasi Hasil Peledakan

Peledakan dirancang menjadi tiga baris, yaitu baris ke-1 ada 4 lubang ledak dari C01 s.d. C04, baris ke-2 ada 7 lubang ledak dari A01 s.d. A07, dan baris ke-3 ada 7 lubang ledak dari B01 s.d. B07 (Gambar 2). Berdasarkan level lantai jenjang pada 842 mdpl merata bagi seluruh lubang diperoleh L_v rata-rata 8,2 m pada baris ke-1, 8,7 m pada baris ke-2, dan 8,5 m pada baris ke-3. Kemiringan lubang ledak (θ) paling depan meliputi A01, C01, C02, C03, A06, dan A07 dibuat 30°, kecuali lubang ledak C04 dibuat 25° karena relatif sejajar terhadap kemiringan lerengnya. Berdasarkan data L_v dan θ , dihitung L_i = L_v/Cos(θ) yang rincian hasil setiap lubangnya tertera Tabel 2 dengan L_i rata-rata setiap baris adalah 9,4 m untuk baris ke-1, 9,8 m untuk baris ke-2, dan 9,1 m pada baris ke-3.

Rangkuman hasil perhitungan parameter geometri rencana peledakan tertera pada Tabel 2 yang memperlihatkan PF pada baris ke-1 0,26 kg/m³, pada baris ke-2 0,29 kg/m³, dan pada baris ke-3 adalah 0,29 kg/m³. Apabila dihitung dari keseluruhan lubang ledak, diperoleh jumlah ANFO total 396,3 kg dan produksi peledakan 1413,2 m³. Dengan demikian, PF dari total 18 lubang ledak adalah 396,3 kg/1413,2 m³ = 0,28 kg/m³.

Analisis distribusi fragmentasi hasil peledakan menggunakan Persamaan (2), (4), dan (5) yang dapat menghasilkan dua jenis kurva. (1) kurva distribusi kumulatif lolos ukuran fragmentasi yang umumnya disebut "distribusi fragmentasi" dan (2) frekuensi jumlah fraksi butir ukuran tertentu atau "jumlah fraksi butir" (Gambar 3). Distribusi fragmentasi hasil peledakan baris ke-1, ke-2, dan ke-3 berbeda-beda karena θ dan B_i setiap baris juga berbeda. Hal tersebut terjadi karena pengaruh penyesuaian dengan profil topografi pada baris ke-1.

Estimasi hasil peledakan ditinjau dari kurva distribusi fragmentasi adalah adanya perubahan bentuk kurva yang landai pada baris ke-1 menjadi relatif tegak pada baris ke-2 dan ke-3. Keadaan tersebut menandakan adanya peningkatan persentase yang lolos ukuran lubang saringan (ukuran butir) tertentu, misalnya pada ukuran 100 cm ada peningkatan persentase lolos dari 92,26% pada baris ke-1 menjadi 95,53% pada baris ke-2 dan 97,57% pada baris ke-3. Ditinjau dari kurva jumlah fraksi butir terbentuk distribusi normal pada semua baris peledakan dengan frekuensi terbanyak ada pada ukuran 20 – 30 cm.



Gambar 3. Taksiran distribusi fragmentasi dan jumlah fraksi butir: (a) baris ke-1, (b) baris ke-2, dan (c) baris ke-3

PEMBAHASAN

Analisis Fragmentasi Tiap Baris

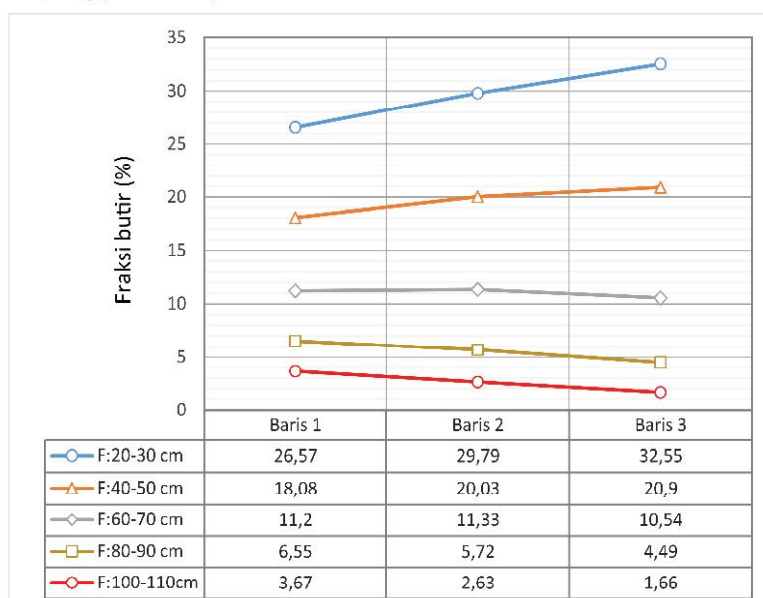
Berdasarkan kurva prediksi fragmentasi pada Gambar 3 dan tabel-tabel di sampingnya terlihat bahwa persentase kumulatif lolos (*undersize*) pada setiap baris berbeda-beda. Untuk menilai derajat distribusi fragmentasi terbaik di antara baris ke-1, ke-2, dan ke-3 diambil fraksi berukuran 80 cm (0,8 m). Fraksi tersebut sebagai batas ukuran fraksi terbesar yang dapat masuk ke dalam ruang penggerusan (*crushing chamber*) dan tergerus oleh *crusher* karena dimensi mulut *crusher* 1 m². Persentase kumulatif lolos dan yang tertahan untuk fraksi ukuran 80 cm pada tiap baris adalah sebagai berikut:

1. Pada baris ke-1 kumulatif lolos 85,71%, tertahan (*oversize* 80 cm) 14,29%
2. Pada baris ke-2 kumulatif lolos 89,81%, tertahan (*oversize* 80 cm) 10,19%
3. Pada baris ke-3 kumulatif lolos 93,08%, tertahan (*oversize* 80 cm) 6,92%

Kondisi di atas menggambarkan bahwa peledakan pada baris ke-1 diprediksi menghasilkan distribusi fragmentasi yang relatif lebih kasar (*coarse*) dibandingkan dengan hasil peledakan pada baris ke-2 dan ke-3. Sementara distribusi fragmentasi pada baris ke-3 merupakan hasil peledakan yang paling kecil karena hanya menyisakan *oversize* 80 cm (*boulder*) 6,92% atau turun sekitar 52% dari hasil peledakan baris ke-1. Fraksi *oversize* 80 cm pada baris ke-2 relatif berada di antara baris ke-1 dan ke-3.

Apabila ditinjau dari perkembangan persentase fraksi butir setiap baris dapat dilihat pada Gambar 4 yang merupakan cuplikan dari Gambar 3, yang hasilnya sebagai berikut:

1. Kurva persentase fraksi berukuran 20 – 30 cm dan 40 – 50 cm meningkat dari baris ke-1 s.d. baris ke-3 dengan besar persentase peningkatan masing-masing 26,57% – 32,50% dan 18,00% – 20,90%. Manfaat yang dapat diambil dari kurva tersebut adalah informasi bahwa baris ke-3 menghasilkan persentase ukuran butir 20 – 50 cm paling banyak dibandingkan dengan baris ke-2 dan ke-1.
2. Kurva persentase fraksi berukuran 60 – 70 cm relatif mendatar pada angka sekitar 11% yang menunjukkan konsistensi banyaknya fraksi pada ukuran tersebut, baik pada baris ke-1, ke-2, maupun ke-3.
3. Kurva persentase fraksi berukuran 80 – 90 cm dan 100 – 110 cm menurun dari baris ke-1 s.d. baris ke-3 dengan besar persentase penurunan masing-masing 6,55% – 4,49% dan 3,67% – 1,66%. Keadaan tersebut menunjukkan dua informasi, yaitu:
 1. jumlah fraksi berukuran 80 – 110 cm paling sedikit dalam tumpukan fragmentasi hasil peledakan karena kurang dari 6,55% dan
 2. fraksi ukuran tersebut paling sedikit berada di baris ke-3 dibandingkan dengan baris ke-2 dan ke-1 yang jumlahnya dalam kisaran 1,66% – 4,49%.



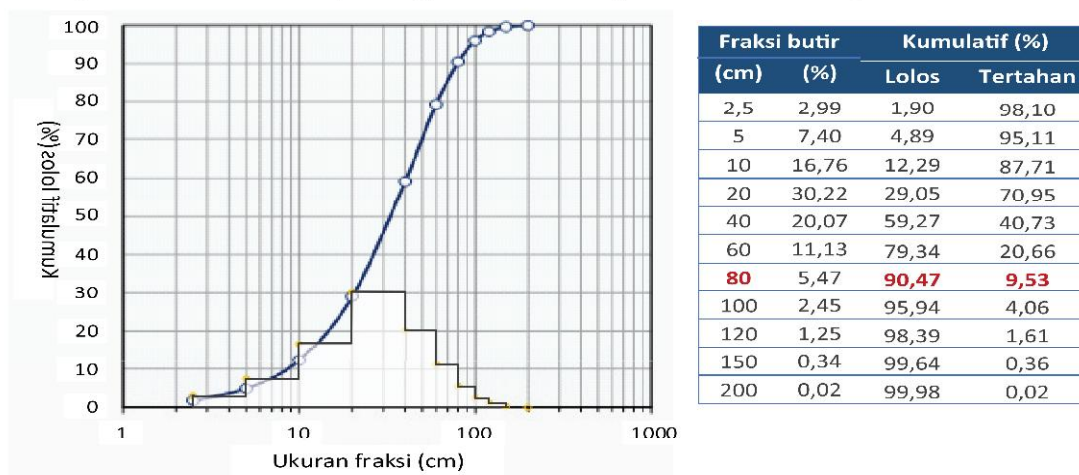
Gambar 4. Perubahan presentase fraksi butir pada baris ke-1, ke-2, dan ke-3

Dua pembahasan mengenai fragmentasi hasil peledakan tiap baris di atas menunjukkan bahwa distribusi fragmentasi pada baris ke-1 diprediksi berukuran lebih kasar dibandingkan dengan dua baris di belakangnya (Gambar 4). Keadaan ini dapat dipahami karena deretan lubang ledak pada baris ke-1 memiliki burden yang tidak merata dari bagian atas sampai dengan dasar lubang.

Burden di bagian atas lubang ledak (B_{ta}) sekitar 1,3 m. Sementara burden di bagian dasar lubang (B_{db}) mencapai rata-rata 4,0 m. Burden yang tidak rata pada baris ke-1 karena pengaruh kemiringan profil topografi lebih besar sekitar 35° , sedangkan kemiringan lubang ledak dirancang 30° . Perbedaan B_{ta} dan B_{db} yang begitu ekstrem berpotensi terbentuk *boulder* pada bagian *toe* dari jenjang (Gambar 2) yang secara akumulatif menghasilkan fragmen yang cenderung berukuran besar.

ANALISIS FRAGMENTASI KESELURUHAN

Distribusi ukuran fragmentasi hasil peledakan pada Gambar 3 merupakan taksiran dari tiap baris rancangan peledakan (Gambar 2). Penaksiran distribusi ukuran fragmentasi secara menyeluruh dilakukan dengan merata-ratakan parameter geometri yang menjadi masukan (*input*) pada analisis fragmentasi dengan model *Kuz-Ram*, yaitu B_i , S , T_i , J_i , L_i dan PC_i , (Gambar 5). Apabila dicermati distribusi fragmentasi menyeluruh pada Gambar 5, serupa dengan distribusi fragmentasi baris ke-2 pada Gambar 3.



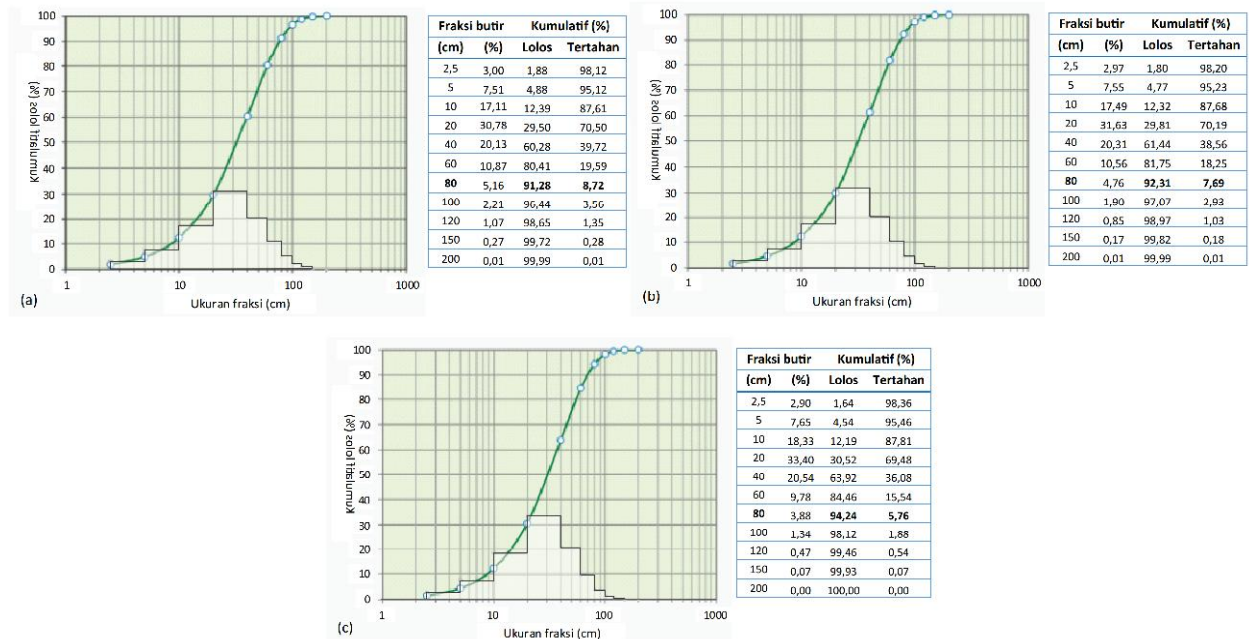
Gambar 5. Distribusi fragmentasi dan jumlah fraksi butir menyeluruh

Rancangan peledakan pada Gambar 2 dinilai belum memadai karena persyaratan bahwa persentase fragmentasi berukuran lebih besar 80 cm (*boulder*) maksimum sekitar 5% tidak terpenuhi. Distribusi fragmentasi secara menyeluruh diprediksi masih menyisakan *boulder* sebanyak 9,53% (Gambar 5). Modifikasi rancangan peledakan pada Gambar 2 dapat dilakukan dengan mengubah parameter geometri, terutama ukuran burden sebenarnya (B_i), kecuali B_i pada lubang ledak paling depan, yaitu A01, C01, C02, C03, C04, A06, dan A07, tetap sama dengan rancangan awal. Ukuran B_i rata-rata pada rancangan awal 2,7 m, kemudian dilakukan simulasi dengan mengubahnya menjadi 2,6 m, 2,5 m, dan 2,4 m. Ukuran T_i seluruh lubang disamakan 3,5 m, kecuali lubang ledak paling depan dan T_i rata-rata seluruh lubang ledak adalah 4,2 m. Simulasi dilakukan tiga kali dan hasilnya terlihat pada Gambar 6.

Rangkuman menyeluruh hasil rancangan awal dan modifikasi geometri peledakan terdapat pada Tabel 3. Perubahan *boulder* atau fraksi lebih besar 80 cm daripada rancangan awal sebesar 9,53% menjadi 5,76% pada modifikasi ke-3 terjadi karena pengaruh pengurangan B_i secara bertahap dari 2,7 m pada rancangan peledakan awal sampai 2,4 m pada rancangan hasil modifikasi ke-3 (Tabel 3). Pada saat yang sama terjadi peningkatan PF dari $0,28 \text{ kg/m}^3$ pada rancangan awal menjadi $0,31 \text{ kg/m}^3$ pada modifikasi ke-3. Hasil peledakan yang mensyaratkan *boulder* maksimum seharusnya sekitar 5% masih sedikit lebih besar, yaitu 5,76%. PF maksimum yang mensyaratkan $0,30 \text{ kg/m}^3$ sudah sedikit terlampaui, yaitu $0,31 \text{ kg/m}^3$. Berdasarkan hasil tersebut, modifikasi ke-3 rancangan peledakan merupakan modifikasi yang paling bisa diterima sebagai rancangan peledakan awal.

Tabel 3. Modifikasi rancangan geometri peledakan

Rancangan	Ukuran parameter rata-rata (m)							W_e (kg)	P_B (m ³)	PF (kg/m ³)	F: >80 cm (%)	n
	L_v	L_i	B_t	S	T_i	J_i	PC_i					
Awal	8,5	9,4	2,7	3,5	4,0	0,7	6,1	396,3	1413,2	0,28	9,53	1,39
Modifikasi-1	8,5	9,4	2,6	3,5	4,2	0,7	5,9	385,7	1353,6	0,28	8,72	1,40
Modifikasi-2	8,5	9,4	2,5	3,5	4,2	0,7	5,9	385,7	1323,7	0,29	7,69	1,44
Modifikasi-3	8,5	9,4	2,4	3,5	4,2	0,7	5,9	385,7	1264,1	0,31	5,76	1,50



Gambar 6. Distribusi fragmentasi dan fraksi butir hasil modifikasi: (a) modifikasi-1, (b) modifikasi-2, dan (c) modifikasi-3

Tinjauan terhadap keseragaman butir hasil peledakan dapat mendukung adanya perbaikan distribusi fragmentasi rancangan peledakan awal dan hasil modifikasi. Indeks keseragaman butir (n) dihitung dengan algoritma Cunningham yang ada pada Persamaan (5):

$$n = \left(2,2 - \frac{14B}{d} \right) \left(1 - \frac{W}{B} \right) \left(1 + \frac{A-1}{2} \right) \left(\frac{L}{H} \right)$$

Sebagai contoh, persamaan di atas digunakan untuk menghitung n rancangan awal peledakan berdasarkan data parameter geometri peledakan pada Tabel 3 dan hasilnya sebagai berikut:

$$n_{awal} = \left(2,2 - \frac{14(2,7)}{76} \right) \left(1 - \frac{0}{2,3} \right) \left(1 + \frac{3,5 / 2,7 - 7}{2} \right) \left(\frac{6,1}{9,4} \right) = 1,26$$

Hasil n tersebut dikalikan dengan 1,1, yaitu konstanta pola pengeboran *staggered* sehingga indeks n menjadi 1,39. Cara yang sama dengan perhitungan di atas diperoleh n_{mod-1} , n_{mod-2} , dan n_{mod-3} masing-masing adalah 1,40, 1,44, dan 1,50. Indeks n rancangan awal dengan modifikasi-1 tidak terpaut jauh, yaitu antara 1,39 – 1,40. Modifikasi-3 rancangan peledakan menghasilkan n = 1,50 yang merupakan n paling tinggi dari seluruh rancangan yang dibuat. Keadaan ini menandakan bahwa keseragaman butir fragmentasi hasil modifikasi-3 lebih seragam dibandingkan dengan rancangan lainnya.

Perbaikan indeks n pada modifikasi-3 disebabkan oleh B_t rata-rata lebih tipis dibandingkan dengan modifikasi lainnya. Sementara jumlah bahan peledak (W_e) yang digunakan sama dan akan menghasilkan

energi yang sama pula. Risiko dari penipisan B_t terletak pada produksi fragmentasi yang dihasilkan menurun sehingga PF meningkat. Dari hasil analisis di atas, rancangan modifikasi-3 memberikan keseimbangan antara PF, *boulder* maksimum 5% dan keseragaman butirnya lebih baik sehingga rancangan modifikasi-3 layak untuk diterapkan pada awal peledakan yang dapat menjadi salah satu pertimbangan dalam membuat prosedur pengoperasian standar untuk peledakan di kampus lapangan.

KESIMPULAN

Rencana awal peledakan di Kampus Lapangan PPSDM-Geominerba dirancang tiga baris dengan kemiringan lubang yang berbeda disesuaikan dengan profil topografi. Berdasarkan pendekatan model *Kuz-Ram*, distribusi fragmentasi baris ke-1 diprediksi menghasilkan *boulder*, yaitu fraksi berukuran di atas 80 cm, lebih besar dari 14%, baris ke-2 di atas 10,19% dan baris ke-3 di atas 6,92%. Persentase *boulder* secara keseluruhan sebesar 9,53% dengan $PF = 0,28 \text{ kg/m}^3$. Dibandingkan dengan persyaratan peledakan di kampus lapangan bahwa *boulder* maksimum 5% dan $PF \leq 0,30 \text{ kg/m}^3$ maka rancangan peledakan tersebut diprediksi menghasilkan distribusi fragmentasi yang kasar, tetapi PF memenuhi persyaratan. Setelah rancangan dimodifikasi sebanyak tiga kali simulasi dengan mengubah B_t rata-rata dari 2,7 m menjadi 2,4 m dan ukuran S , T , serta J_i tetap, persentase *boulder* berkurang menjadi 5,76%, namun PF meningkat menjadi $0,31 \text{ kg/m}^3$. Ditinjau dari indeks keseragaman butir (n) terjadi perbaikan indeks n dari rancangan awal 1,39 menjadi 1,50 setelah dimodifikasi. Dengan demikian, rancangan peledakan dengan $B_t = 2,4 \text{ m}$, yaitu hasil modifikasi ke-3 merupakan rancangan yang optimum untuk peledakan batugamping di kampus lapangan walaupun masih terdapat sedikit deviasi dari persyaratan persentase *boulder* maksimum dan PF.

UCAPAN TERIMA KASIH

Disampaikan ucapan terima kasih kepada Kepala Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Geologi, Mineral dan Batubara, Bandung atas izin yang diberikan kepada penulis untuk memublikasikan sebagian hasil Pengkajian Desain dan Dampak Peledakan di Kampus Lapangan Cipatat, Kabupaten Bandung Barat.

DAFTAR PUSTAKA

- Cunningham, C.V.B., (2005). The Kuz–Ram fragmentation model - 20 years on. *Proceedings of 3rd world conference on explosives and blasting*. Brighton, UK. pp. 201-210.
- Cho, S.H., and Kaneko, K. (2004). Rock Fragmentation Control in Blasting. *Materials Transactions, Vol. 45, No. 5. The Mining and Materials Processing Institute of Japan*. pp. 1722-1730.
- Dyno Nobel. (2016). *Explosives engineers' guide*. Dyno NobelAsia Pacific Pty Limited.
- Kabwe, E. (2018). Velocity of detonation measurement and fragmentation analysis to evaluate blasting efficacy. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 10. pp. 523-533.
- Konya, C.J, Walter, E.J. (1990). *Surface blast design*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. USA. pp. 114-141.
- Orica. (2017). *Pocket blast Guide*. Orica Australia Pacific Indonesia.
- Pusdiklat Minerba (2015). *Pengkajian desain peledakan di kampus lapangan pusdiklat mineral dan batubara*. Pusat Pendidikan dan Pelatihan Mineral dan Batubara. (Tidak dipublikasikan).
- Singh, P.K., Roy, M.P., Paswan, R.K., Sarim, Md., Kumar, S., Jha, R.R. (2016). Rock fragmentation control in opencast blasting. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8. pp. 225-237.
- Suwandhi, A., & Tambunan, C. (2017). Rekayasa Peledakan Untuk menentukan Zona Aman Getaran dan Kebisingan di Kampus Lapangan PPSDM-Geominerba Dengan Pendekatan Simulasi Komputer. *Geominerba Jurnal Ilmiah PPSDM Geominerba*. Bandung. pp. 67-84.