

## Komparasi *blasting single rod* dengan *double rod* terhadap keberhasilan peledakan di Pit *South Tutupan* PT Adaro Indonesia

### *Analyzed the comparison blasting single rod with double rod in direction of successful blasting process in South Tutupan Pit PT Adaro Indonesia*

Erika Saskia<sup>1\*</sup>, Irvani<sup>2</sup>, Guskarnali<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup> Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Bangka Belitung  
Jl. Merdeka No.4 Balunijuk, Merawang, Kep. Bangka Belitung 33126, Telp. 0717-422145, Indonesia  
e-mail: \*<sup>1</sup>[erikasaskia01@gmail.com](mailto:erikasaskia01@gmail.com), <sup>2</sup>[irvanibabel@gmail.com](mailto:irvanibabel@gmail.com), <sup>3</sup>[guskar.ubb@gmail.com](mailto:guskar.ubb@gmail.com)

#### ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis perbandingan *blasting single rod* 8m dengan *double rod* 12m terhadap volume, *powder factor*, fragmentasi dan *digging time* di pit *South Tutupan* (BUMA) PT Adaro Indonesia. Permasalahan pada penelitian adalah ketercapaian material *blasting* aktual yang rendah sebesar 43% pada September 2021 – Maret 2022 sehingga diperlukan eskalasi berupa *improvement blasting double rod*. Dilaksanakan pada 7 *front single rod* (263 lubang) dan 7 *front double rod* (174 lubang) dengan pengambilan data berupa data pemboran peledakan, foto fragmentasi dan parameter BI. Hasil penelitian menunjukkan deviasi geometri peledakan didominasi nilai *underplan* dengan 4 deviasi tertinggi pada *double rod* yaitu deviasi spasi, *depth*, *stemming* dan PC serta 1 deviasi tertinggi pada *single rod* yaitu deviasi *burden*. Hasil peledakan metode *double rod* lebih efektif dibandingkan *single rod* diantaranya persentase volume lebih tinggi 19,98%, ukuran fragmentasi aktual lebih kecil 8,19 cm, indeks keseragaman lebih besar 0,15, potensi fragmentasi *boulder* lebih kecil sebesar 5% serta perolehan *layer digging* lebih optimal. Namun, *double rod* menghasilkan nilai PF lebih tinggi 0,01 kg/BCM dan *digging time* lebih tinggi 0,1 detik. Rekomendasi formula bahan peledak efektif untuk *single rod*:  $Q_{eff} = [(-0,0159 (DB) + 0,1874) (49382(DS) + 48934)]$  dan untuk *double rod*:  $Q_{eff} = [(-0,071(DD) + 0,1815) (-17751(DB) + 65269)]$ .

**Kata-kata kunci:** *blasting, deviasi, digging time, fragmentasi, PF, volume*

#### ABSTRACT

This study analyzed the comparison blasting single rod 8m with double rod 12m in direction of volume, powder factor, fragmentation, and digging time in the South Tutupan (BUMA) pit of PT Adaro Indonesia. The problem behind this research is the achievement of low actual blasting material of 43% in September 2021 - March 2022 in order that an escalation was required in the form of blasting double rod improvement. The research was conducted on 7 single rod fronts (263 holes) and 7 double rod fronts (174 holes) with data collection in the form of drilling and blasting data, photo fragmentation and parameter BI. The results showed that the deviation of the blasting geometry was dominated by the under plan value with the 4 highest deviations on the double rod namely spacing, depth, stemming, and PC deviations and there was 1 highest deviation on the single rod namely the burden deviation. Blasting double rod method is more effective than the single rod including the percentage of blasting volume is 19.98% higher, the actual fragmentation size is 8.19 cm smaller, the uniformity index is greater than 0.15, the potential for boulder fragmentation is smaller by 5% and the acquisition of layers optimum digging. However, blasting double rod resulted in a higher PF value of 0.01 kg/BCM and a higher digging time of 0.1 seconds. The recommended formula of effective explosives for blasting single rod:  $Q_{eff} = [(-0,0159 (DB) + 0,1874) (49382(DS) + 48934)]$  and for blasting double rod:  $Q_{eff} = [(-0,071(DD) + 0,1815) (-17751(DB) + 65269)]$ .

**Keywords:** *blasting, deviation, digging time, fragmentation, PF, volume*

#### PENDAHULUAN

PT Adaro Indonesia merupakan salah satu perusahaan tambang batubara terbesar di Indonesia dengan wilayah penambangan berada di antara Kabupaten Tabalong dan Kabupaten Balangan, Provinsi Kalimantan Selatan, Indonesia. Dalam upaya membongkar material yang relatif keras, PT Adaro Indonesia menggunakan metode pemboran dan peledakan yang dikerjakan oleh kontraktor PT BUMA [1]. Pada saat penelitian, terdapat ketercapaian *blasting* material aktual yang rendah sebesar 43% pada periode September 2021 – Maret 2022. Menindaklanjuti dari permasalahan tersebut maka diperlukan suatu eskalasi guna peningkatan capaian material *blasting* aktual yang lebih optimal melalui suatu *improvement* berupa *blasting double rod*. *Improvement blasting double rod* merupakan metode peledakan yang menggunakan dua batang bor (*double rod*) dalam proses pembuatan lubang ledaknya. Peledakan *double rod* ditargetkan menghasilkan lubang ledak dalam dengan

kedalaman maksimum sebesar 12m [2]. Untuk itu, diperlukan suatu analisis lanjutan dan komprehensif terkait keberhasilan dari *improvement blasting double rod*.

Deviasi geometri peledakan merupakan suatu penyimpangan yang terjadi antara geometri peledakan aktual dengan geometri peledakan rencana (*plan*) [3]. Volume peledakan merupakan parameter yang menggambarkan jumlah material yang terbongkar dalam satu kali proses peledakan [4]. *Powder Factor* (PF) didefinisikan sebagai perbandingan jumlah bahan peledak yang dipakai terhadap volume peledakan [5].

Fragmentasi batuan hasil peledakan merupakan parameter untuk mengetahui ukuran rata-rata, keseragaman batuan hingga distribusi *boulder* yang diperoleh pasca peledakan [6]. Salah satu metode perkiraan fragmentasi adalah Model Kuz-Ram yang merupakan gabungan dari 2 (dua) persamaan, yaitu Persamaan Kuznetsov untuk menentukan ukuran fragmen rata-rata, dan Persamaan Rossin-Rammler untuk menentukan presentase material yang tertahan di ayakan dengan ukuran tertentu [7].

Model perhitungan fragmentasi Kuz-Ram membutuhkan nilai faktor batuan (A) yang diperoleh dari nilai *blastability index* (BI). *Blastability index* atau indeks kemampuledakan merupakan nilai ketahanan ledak suatu batuan yang sangat dipengaruhi oleh kondisi massa batuan [8]. Nilai BI terdiri atas pembobotan *rock mass description*, *joint plane spacing*, *joint plane orientation*, *specific gravity influence* dan *hardness* [9]. Perhitungan fragmentasi aktual biasa menggunakan metode *image analysis* menggunakan software *WipFrag* ataupun *Split Desktop*.

*Digging time* merupakan parameter untuk memberikan penilaian pada ukuran fragmentasi hasil peledakan terhadap produktivitas *loader* [10].

Maka dari itu, penelitian ini akan menganalisis perbandingan *blasting single rod* 8m dengan *blasting double rod* 12m terhadap volume, PF, fragmentasi hingga *digging time*. Serta menganalisis secara komprehensif terkait faktor ketidaktercapaian tersebut melalui perhitungan deviasi geometri peledakan

## METODOLOGI

### 1. Studi Literatur

Tahapan mencari bahan-bahan pustaka yang menunjang penelitian.

### 2. Observasi

Tahapan ini dilakukan dengan peninjauan langsung *front* peledakan di PT Adaro Indonesia bersama dengan pembimbing lapangan.

### 3. Pengambilan Data

Data Primer:

- Pola pemboran aktual
- Geometri peledakan aktual
- Jumlah lubang ledak
- Jumlah bahan peledak
- Desain *Tie Up*
- Fragmentasi batuan aktual
- Data RMD, JPS dan JPO

Data Sekunder:

- Hasil peledakan sebelumnya
- Pola pemboran dan peledakan rencana
- Spesifikasi bahan peledak
- Karakteristik batuan dan deskripsi massa batuan (SGI dan *hardness*)
- Spesifikasi alat
- Peta *layout* tambang
- Data curah hujan

### 4. Pengolahan Data

Pengolahan data terdiri atas beberapa tahapan sebagai berikut:

- Menghitung deviasi geometri peledakan aktual dengan *sampling* geometri peledakan tiap *front* minimal sebanyak 1/3 dari total lubang keseluruhan,
- Menghitung volume, *powder factor* hingga *digging time*,
- Menghitung faktor batuan melalui pembobotan *blastability index*,
- Menganalisis fragmentasi prediksi Kuz-Ram berupa perhitungan ukuran rata-rata, indeks keseragaman, ukuran karakteristik, distribusi *boulder* dan analisis fragmentasi aktual menggunakan metode *image analysis software WipFrag*,
- Menganalisis korelasi antara deviasi geometri peledakan terhadap hasil peledakan untuk

memperoleh rekomendasi berupa formula bahan peledak efektif.

### 5. Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk menemukan jawaban terhadap rumusan masalah penelitian. Dalam penyusunan laporan, penelitian ini dibantu dengan peta, gambar, grafik dan tabel untuk memudahkan penyampaian informasi hasil penelitian.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di *pit South* Tutupan PT Adaro Indonesia pada 7 *front blasting single rod* dan 7 *front blasting double rod* sejak tanggal 6 Desember 2022 – 1 Februari 2023. *Pit South* Tutupan terdiri atas karakteristik *interburden coal* serta dominasi material *sandstone* dan *claystone*.



Gambar-1. Salah Satu *Front Blasting* di *Pit South* Tutupan

Saat penelitian berlangsung, *improvement blasting double rod* difokuskan pada *middle area* yaitu *boundary S3* dan *D2* yang terletak pada zona aman dengan radius >2000m dari *critical area* seperti *office 73* dan area *WTP* (*water treatment plant*). Adapun manfaat dari *improvement blasting double rod* adalah sebagai berikut:

- Eskalasi jumlah material *blasting* melalui peningkatan volume dengan penambahan kedalaman lubang ledak sebesar 4m.
- Menurunkan frekuensi siklus preparasi *drill pad* oleh unit mekanis Dozer Komatsu D375A yang akan berdampak pada menurunnya *blasting cost* dan waktu akibat unit Dozer yang cukup terbatas.
- Meningkatkan capaian *layer digging* oleh alat gali muat Excavator Caterpillar 6020B dan Excavator Hitachi PC-2500 sehingga berdampak pada preposisi *loader* yang akan berpengaruh pada menurunnya penggunaan *fuel* (*undercarriage cost*).

### Deviasi Geometri Peledakan

Jumlah sampel geometri aktual yang diambil sebanyak minimal 1/3 dari jumlah total lubang di setiap *front* peledakan. Kemudian nilai geometri tersebut dihitung rata-ratanya (*average*) untuk selanjutnya dihitung nilai deviasi. Deviasi geometri terbagi atas 2 jenis yaitu deviasi *under plan* (kurang dari rencana) dan deviasi *over plan* (lebih dari rencana). Adapun jumlah lubang yang diamati pada *blasting single rod* sebanyak 263 lubang dan pada *blasting double rod* sebanyak 174 lubang.

### Deviasi *Pattern Blasting*

Deviasi *pattern* meliputi deviasi *burden* dan deviasi spasi. *Pattern* yang terdapat di *front* peledakan PT Adaro Indonesia terdiri atas dua jenis yaitu *pattern 8 x 9*

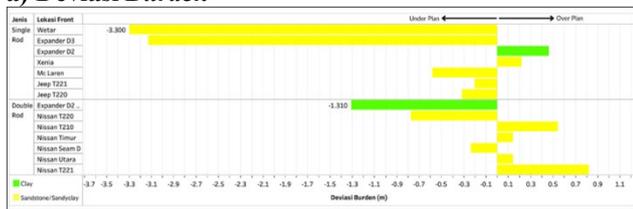
dan *pattern* 9 x 10 untuk *blasting single rod* serta *pattern* 9 x 10 untuk *blasting double rod*.

Tabel-1. Deviasi Pattern

No	Lokasi SR	Deviasi Pattern	Lokasi DR	Deviasi Pattern
1	HW Wetar	-35,46%	HW Expander D2	-13,69%
2	HW Expander D3	-32,65%	HW Nissan T220	-7,96%
3	HW Expander D2	4,19%	HW Nissan T210	1,01%
4	HW Xenia	5,46%	HW Nissan Timur	0,85%
5	HW Mc Laren	-7,25%	HW Nissan Seam D	-5,81%
6	HW Jeep T221	1,85%	HW Nissan Utara	1,4%
7	HW Jeep T220	2,28%	HW Nissan T221	-6,23%

Deviasi *pattern* terbesar terdapat pada *front blasting single rod* sebesar -35,46% pada HW Wetar. Sedangkan *front blasting double rod* menunjukkan deviasi *pattern* yang lebih kecil dengan nilai terbesar adalah -13,69% pada lokasi HW Expander D2.

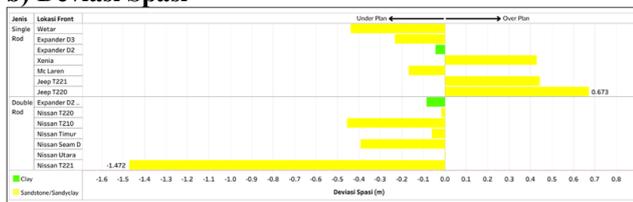
a) Deviasi Burden



Gambar-2. Deviasi Burden

Deviasi *burden* pada *blasting single rod* didominasi deviasi *under plan* sedangkan pada *blasting double rod* didominasi oleh deviasi *over plan*. Deviasi *burden* terbesar pada *blasting single rod* terdapat di HW Wetar dengan besaran deviasi -3,3 m dengan nilai *burden plan* adalah 9 m dan *burden* aktual adalah 5,7 m (*under plan*) disebabkan oleh lubang terluar yang bersinggungan langsung dengan batubara *seam* T220 atau biasa disebut kondisi *touch of coal* (TOC). Sedangkan deviasi *burden* terbesar pada *blasting double rod* terdapat di HW Expander D2 dengan besaran deviasi -1,31 m dengan nilai *burden plan* adalah 9 m sedangkan *burden* aktual adalah 7,7 m (*under plan*) yang terjadi akibat *free face* berupa *final slope*.

b) Deviasi Spasi

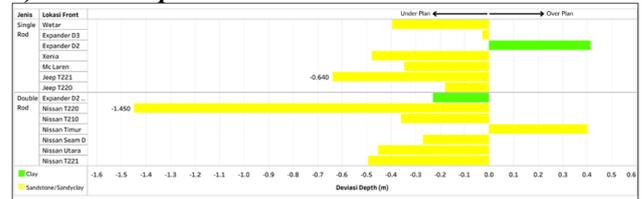


Gambar-3. Deviasi Spasi

Deviasi *spasi* pada *blasting single rod* didominasi nilai *under plan* (dibawah rencana) sedangkan *blasting double rod* didominasi deviasi *under plan*. Deviasi *spasi* terbesar pada *blasting single rod* terdapat di HW Jeep T220

sebesar deviasi +0,67 m. Disebabkan adanya nilai *over plan* dari *plan* 9 m dan aktual 9,67 m akibat *human error* oleh operator *drilling*. Sedangkan deviasi *spasi* terbesar pada *blasting double rod* terdapat di lokasi HW Nissan T221 sebesar -1,47 m yang disebabkan oleh penyusutan nilai *spasi* (dibawah rencana) dari *plan* 10 m menjadi aktual 8,53 m akibat adanya keterdapatn perbedaan tinggi antar jenjang pada *front* peledakan.

c) Deviasi Depth



Gambar-4. Deviasi Depth

Deviasi *depth* pada kedua jenis *front blasting* didominasi oleh deviasi *under plan*. Deviasi *depth* terbesar pada *blasting single rod* terdapat di HW Jeep T221 sebesar -0,64 m yang disebabkan oleh *depth under plan* dari 7,65 m menjadi aktual 7,01 m. Sedangkan deviasi *depth* terbesar pada *blasting double rod* terdapat di HW Nissan T220 sebesar -1,45 m. Hal ini dikarenakan nilai aktual mengalami *under plan* dari 11,93 m menjadi 10,48 m. Selain itu, distribusi deviasi *depth* juga dianalisis secara statistika pada Tabel-2 berikut.

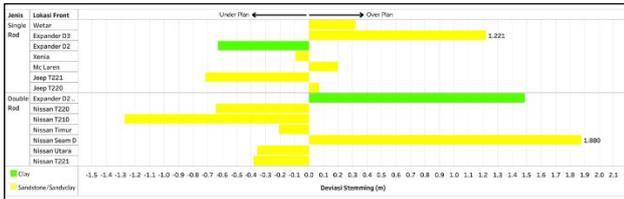
Tabel-2. Analisis Statistika Deviasi Depth

Deviasi Depth pada Blasting Single Rod					
N	263	Interval (m)	Frekuensi	Persen	Total
Max	5	< -0,5	82	31%	63%
Min	-4	≥ -0,5 - 0	84	32%	
Range	9	≥ 0 - 0,5	74	28%	37%
K	9,039	> 0,5	23	9%	
P	0,996				
Deviasi Depth pada Blasting Double Rod					
N	174	Interval (m)	Frekuensi	Persen	Total
Max	0,5	< -0,5	57	33%	53%
Min	-5,3	≥ -0,5 - 0	35	20%	
Range	5,8	≥ 0 - 0,5	82	47%	47%
K	8,443	> 0,5	0	0%	
P	0,687				

Dari sebanyak 263 *blast hole* pada *blasting single rod* terdapat 63% (166 *holes*) mengalami *under plan* serta 37% (97 *holes*) mengalami *over plan*. Sedangkan pada *blasting double rod* dari 174 lubang ledak terdapat 53% (92 *holes*) mengalami *under plan* dan 47% (82 *holes*) mengalami *depth over plan*. Deviasi *under plan* pada geometri *depth* disebabkan oleh keterdapatn material *collapse* atau runtuh. Hal ini dikarenakan kondisi massa batuan didominasi oleh material pasiran (*sandstone*) dengan nilai *specific gravity* berada dalam kisaran nilai 2,27 – 2,49 gr/cc. Material *sandstone* memiliki porositas yang tinggi sekitar 5 – 30% serta permeabilitas yang rendah sehingga rentan mengalami pergeseran (*collapse*).

**d) Deviasi Stemming**

Proses pengukuran tinggi *stemming* dilakukan sebanyak 2 kali pengambilan data yaitu sebelum dan sesudah proses *gassing* dari bahan peledak. Nilai *gassing* yang terdapat pada *front blasting single rod* dan *blasting double rod* memiliki kenaikan *gassing* dengan nilai berdekatan yaitu 0,21 m dan 0,18 m dalam kurun waktu 30 menit yang dilakukan oleh tim (QC) *quality control blasting service* yaitu PT Dahana dan PT MNK.

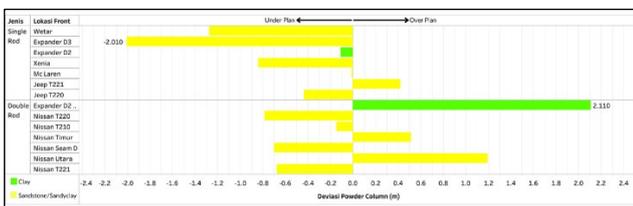


**Gambar-5.** Deviasi Stemming

Deviasi *stemming* pada *blasting single rod* didominasi nilai *over plan* sedangkan pada *blasting double rod* didominasi oleh nilai *under plan*. Deviasi *stemming* terbesar pada *blasting single rod* terdapat di HW Expander D3 dengan besaran nilai +1,22 m disebabkan oleh *stemming over plan* dari 4,5 m menjadi aktual 5,72 m. Sedangkan deviasi *stemming* terbesar pada *blasting double rod* terdapat di HW Nissan Seam D sebesar +1,88 m dari *plan* 4,8 m menjadi 6,68 m. Keterdapatannya deviasi *stemming* pada *front peledakan* disebabkan oleh adanya deviasi yang terjadi pada saat proses *charging* berupa pengurangan jumlah kolom isian sehingga berdampak pada bertambahnya panjang kolom *stemming*.

**e) Deviasi Powder Column (PC)**

Deviasi PC pada *kedua front blasting* didominasi deviasi *under plan* (dibawah rencana). Deviasi PC terbesar pada *blasting single rod* terdapat di HW Expander D3 dengan besaran nilai -2,01 m dari *plan* 4 m menjadi aktual 1,99 m. Sedangkan deviasi PC terbesar pada *blasting double rod* terdapat di HW Expander D2 sebesar +2,11 m dari *plan* 3,6 m menjadi aktual 5,71 m. Penyebab terjadinya deviasi pada geometri PC dipengaruhi oleh mekanisme proses *charging* oleh tim *blasting service* yang tidak sesuai dengan matriks rekomendasi isian.



**Gambar-6.** Deviasi Powder Column

**Komparasi Hasil Peledakan**

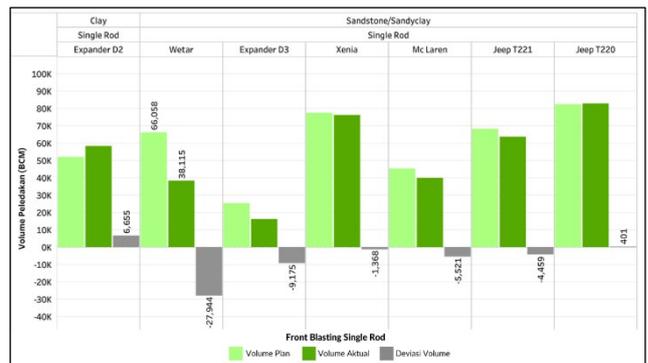
**a) Volume Peledakan**

Deviasi volume peledakan pada *blasting single rod* terbesar terdapat di lokasi HW Wetar sebesar -27.943,64 BCM yang dipengaruhi oleh keterdapatannya deviasi geometri peledakan yaitu deviasi *burden* sebesar -3,3 m dan deviasi *depth* -0,4 m sehingga mengakibatkan penyusutan volume (Gambar-7). Adapun jika dikomparasikan dengan volume peledakan pada *front blasting double rod*, deviasi volume peledakan terbesar terdapat di lokasi HW Nissan T220 sebesar -27.496,62

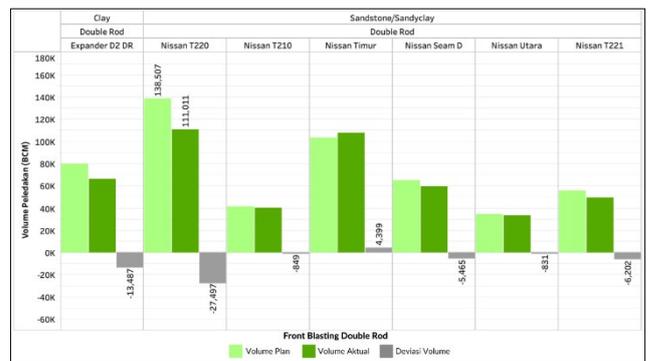
BCM. Hal ini disebabkan oleh adanya deviasi *burden* sebesar -0,78 m dan deviasi *depth* -1,45 m (Gambar-8).

**Tabel-3** Komparasi Volume Peledakan

No	Volume Blasting Single Rod (BCM)			Volume Blasting Double Rod (BCM)		
	Plan	Aktual	Deviasi	Plan	Aktual	Deviasi
1	66.058,47	38.114,83	27.943,64	79.695,00	66.208,04	13.486,96
2	25.156,80	15.981,78	-9.175,02	138.507,30	111.010,68	27.496,62
3	51.856,20	58.511,61	6.655,41	41.475,60	40.626,55	-849,05
4	77.556,96	76.188,55	-1.368,41	103.262,76	107.661,60	4.398,84
5	45.349,20	39.828,45	-5.520,75	65.107,35	59.642,37	-5.464,98
6	68.188,23	63.729,27	-4.458,96	34.630,20	33.799,54	-830,66
7	82.419,84	82.821,00	401,16	56.110,32	49.908,76	-6.201,56
AVG	59.512,24	53.596,50	-5.915,74	74.112,65	66.979,65	-7.133,00



**Gambar-7.** Komparasi Volume pada Blasting Single Rod



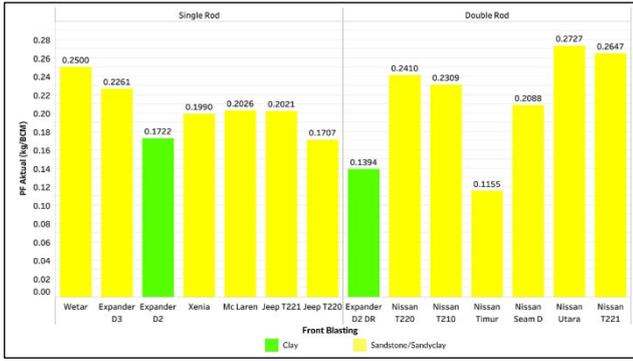
**Gambar-8.** Komparasi Volume pada Blasting Double Rod

Hasil komparasi menunjukkan volume rata-rata aktual *blasting double rod* sebesar 66.979,65 BCM bertambah sebesar 13.383,15 BCM dari *blasting single rod* 53.596,50 BCM. Hal ini menunjukkan bahwa *blasting double rod* menghasilkan kenaikan volume material *blasting* sebesar 19,98%.

**b) Powder Factor**

*Powder factor* terbesar pada *blasting single rod* terdapat di HW Wetar sebesar 0,25 kg/BCM sedangkan PF terbesar pada *blasting double rod* terdapat di HW Nissan Utara dengan besaran nilai 0,27 kg/BCM. PF pada HW Wetar melebihi target (*over plan*) dikarenakan adanya deviasi pada volume peledakan yang menyusut. Penyusutan volume disebabkan oleh adanya deviasi *burden* sebesar -3,3 m, spasi -0,44 m dan *depth* -0,4 m. Deviasi tersebut menyebabkan berkurangnya volume sebesar 27.943,64 BCM sehingga menaikkan nilai PF aktual. Hal ini

dikarenakan kedua parameter tersebut memiliki hubungan yang berbanding terbalik.



Gambar-9. Komparasi Powder Factor

Adapun PF pada HW Nissan Utara mengalami kenaikan yang disebabkan oleh deviasi *over plan* pada total *explosive* yang terekam ke dalam *front blasting* saat proses *charging* (pengisian bahan peledak) berlangsung. Terhitung aktual *explosive* yang terekam di lapangan adalah 9.218 kg sedangkan *plan explosive* adalah 6.600 kg. Jumlah *explosive* dan PF memiliki hubungan yang searah, sehingga semakin besar jumlah *explosive* yang digunakan maka nilai PF juga akan semakin bertambah.

Hasil analisis menunjukkan nilai PF rata-rata *blasting single rod* sebesar 0,20 kg/BCM dan PF rata-rata *blasting double rod* sebesar 0,21 kg/BCM. Artinya tingkat efisiensi penggunaan bahan peledak lebih maksimal terjadi pada *front blasting single rod* sebab *blasting double rod* justru menaikkan nilai PF sebesar 0,01 kg/BCM.

**c) Fragmentasi**  
**Fragmentasi Prediksi**

Analisis fragmentasi prediksi pada penelitian ini menggunakan persamaan teoritis Model Kuz-Ram. Dalam perhitungan fragmentasi prediksi diperlukan nilai faktor batuan (A) yang diperoleh dari pembobotan *blastability index* (BI).

Tabel-4 Pembobotan Blastability Index (BI)

No	Parameter	Bobot
1	RMD : <i>Powdery</i>	10
2	JPS : <i>Close</i>	10
3	JPO : <i>Dip out of face</i>	20
4	SGI : 23,30 kN/m <sup>3</sup> atau 2,37 gr/cc	9,39
5	H : 1.440 kPa atau 1,44 MPa	0,07
<b>Total</b>		<b>49,47</b>
<b>BI</b>		<b>24,73</b>
<b>A (Faktor Batuan)</b>		<b>2,96</b>

Pembobotan *blastability index* menunjukkan deskripsi massa batuan di wilayah penelitian didominasi material lepas (*loose*) dengan ciri struktur massa batuan yang tidak mengunci satu sama lain (*powdery*). Selain itu, spasi kekar atau bidang lemah yang terekam termasuk dalam kategori *close* (<10 cm) serta kemiringan orientasi kekar berlawanan dengan bidang bebas (*dip out of face*). Adapun data SGI dan *hardness* diperoleh dari penelitian terbaru pada tanggal 17 Desember 2022 yang dilaksanakan oleh Tim Departemen Geoteknik dan Hidrogeologi PT

Adaro Indonesia. Setelah diperoleh nilai faktor batuan, berikut ini analisis fragmentasi prediksi.

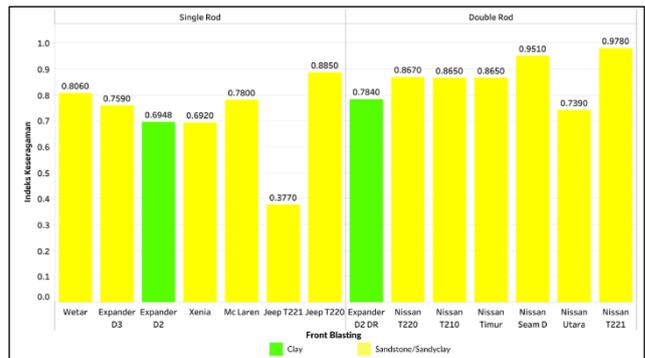
**1) Ukuran Rata-Rata**

Dari Tabel-5 rata-rata nilai BI berada dalam *range* pembobotan 24,15 – 26,31 dan faktor batuan pada *range* 2,8 – 3,16. Hasil perhitungan menunjukkan ukuran rata-rata fragmentasi prediksi pada *front blasting single rod* maupun pada *front blasting double rod* memiliki nilai yang hampir sama. Keduanya berada dalam *range* nilai 70 cm yaitu 70,41 cm untuk *single rod* dan 70,37 cm untuk *double rod*. Perhitungan ukuran rata-rata fragmentasi menggunakan Persamaan Kuz-Ram ini dipengaruhi oleh parameter seperti volume *plan*, *plan* jumlah bahan peledak, RWS dari bahan peledak dan faktor batuan dari *blastability index*.

Tabel-5 Nilai BI, Faktor Batuan dan Ukuran Rata-Rata

No	Blasting Single Rod			Blasting Double Rod		
	BI	A	$\bar{X}$ (cm)	BI	A	$\bar{X}$ (cm)
1	24,17	2,90	76,56	24,91	2,99	102,81
2	24,74	2,97	65,32	26,31	3,16	84,51
3	24,25	2,91	53,17	23,49	2,82	51,07
4	24,96	3,00	66,99	24,25	2,91	64,87
5	25,40	3,05	77,02	24,15	2,90	67,98
6	25,31	3,04	73,96	25,38	3,05	61,44
7	24,25	2,91	79,82	24,25	2,91	59,92
	<b>Average</b>		<b>70,41</b>	<b>Average</b>		<b>70,37</b>

**2) Indeks Keseragaman**



Gambar-10. Komparasi Indeks Keseragaman

Indeks keseragaman terbesar pada *blasting single rod* terdapat di HW Jeep T220 sebesar 0,89. Sedangkan indeks keseragaman terbesar pada *blasting double rod* yaitu 0,98 di lokasi HW Nissan T221. Hasil perhitungan menunjukkan indeks keseragaman rata-rata lebih baik pada *front blasting double rod* sebesar 0,86. Sedangkan *front blasting single rod* menunjukkan nilai indeks keseragaman yang lebih kecil yaitu 0,71. Dari komparasi tersebut diketahui bahwa nilai indeks keseragaman bertambah sebesar 0,15 dengan menerapkan metode *blasting double rod*. Semakin besar indeks keseragaman pada batuan menandakan bahwa *profile* fragmentasi yang dihasilkan semakin seragam.

**3) Ukuran Karakteristik**

Ukuran karakteristik rata-rata batuan paling besar terdapat pada *blasting single rod* sebesar 152,37 cm. Sedangkan *blasting double rod* menunjukkan ukuran

karakteristik rata-rata yang lebih kecil sebesar 119,18 cm. Adapun ukuran karakteristik terbesar pada *blasting single rod* terdapat di HW Jeep T221 sebesar 283,03 cm. Sedangkan ukuran karakteristik terbesar pada *blasting double rod* terdapat di HW Expander D2 sebesar 189,05 cm. Dapat disimpulkan bahwa ukuran karakteristik batuan yang terdapat pada kedua jenis *front blasting* tersebut didominasi oleh karakteristik batuan ukuran *oversize* (*boulder*).

Tabel-6 Komparasi Ukuran Karakteristik

No	Blasting Single Rod		Blasting Double Rod	
	Lokasi	UK (cm)	Lokasi	UK (cm)
1	Wetar	136,976	Expander D2	189,05
2	Expander D3	124,18	Nissan T220	140,57
3	Expander D2	110,41	Nissan T210	85,14
4	Xenia	139,533	Nissan Timur	108,15
5	Mc Laren	142,39	Nissan Seam D	103,12
6	Jeep T221	283,03	Nissan Utara	119,92
7	Jeep T220	130,08	Nissan T221	88,34
Average		152,37	Average	119,18

4) Distribusi Ukuran Batuan Tertahan di Ayakan 100 cm

Dari Tabel-7, dapat disimpulkan bahwa persentase *boulder* (batuan *oversize*) rata-rata lebih besar terdapat di *front blasting single rod* sebesar 45%. Sedangkan persentase *boulder* pada *blasting double rod* menunjukkan nilai yang signifikansi lebih kecil sebesar 40%. Hal ini menandakan bahwa *improvement blasting double rod* dapat menurunkan potensi batuan *over size* (*boulder*) sebesar 5%.

Tabel-7 Komparasi Persentase Boulder

No	Persentase Batuan Tertahan di Ayakan 100 cm			
	Blasting Single Rod		Blasting Double Rod	
	Uk ≤ 100 cm (%) <i>undersize</i>	Uk ≥ 100 cm (%) <i>oversize</i>	Uk ≤ 100 cm (%) <i>undersize</i>	Uk ≥ 100 cm (%) <i>oversize</i>
1	55	45	46	54
2	61	39	53	47
3	52	48	69	31
4	50	50	61	39
5	54	46	63	37
6	55	45	59	41
7	58	42	68	32
Avg	55	45	60	40

Fragmentasi Aktual

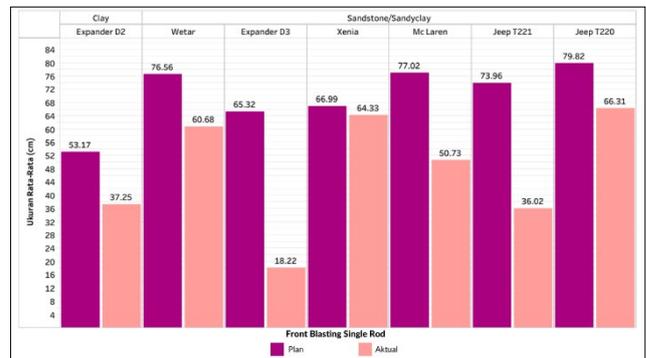
Analisis fragmentasi aktual menggunakan metode *image analysis* dengan memanfaatkan *software WipFrag*. Ukuran rata-rata fragmentasi aktual batuan pada *blasting double rod* berada dalam rentang nilai yang lebih kecil sebesar 39,46 cm dibandingkan dengan ukuran rata-rata fragmentasi aktual pada *front blasting single rod* sebesar 47,65 cm. Hal ini menunjukkan bahwa *blasting double rod* menghasilkan ukuran rata-rata fragmentasi aktual lebih kecil 8,19 cm dibandingkan *blasting single rod*. Adapun P80 terbesar pada *front blasting single rod* terdapat di lokasi ke-4 yaitu HW Xenia yang menunjukkan bahwa sebanyak

80% material lolos ayakan dengan ukuran 45,59 cm. Sedangkan pada *front blasting double rod* P80 terbesar terdapat di lokasi ke-7 yaitu HW Nissan T221 dengan ukuran batuan 35,91 cm.

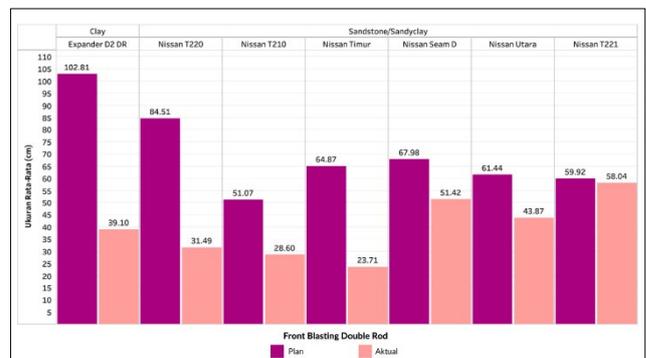
Tabel-8 Komparasi Fragmentasi oleh WipFrag

No	Fragmentasi Aktual			
	Blasting Single Rod		Blasting Double Rod	
	Ukuran rata-rata (cm)	P80 (cm)	Ukuran rata-rata (cm)	P80 (cm)
1	60,68	40,56	39,10	25,00
2	18,22	11,22	31,49	18,67
3	37,25	22,85	28,60	17,88
4	64,33	45,59	23,71	13,99
5	50,73	31,19	51,42	33,83
6	36,02	21,86	43,87	26,94
7	66,31	42,63	58,04	35,91
Avg	47,65		39,46	

Dari hasil analisis fragmentasi prediksi maupun aktual menunjukkan bahwa *blasting double rod* menghasilkan perolehan material fragmentasi yang lebih optimal dibandingkan *single rod*. Adapun keterdapatannya *gap* atau kesenjangan nilai antara prediksi dan aktual yang disebabkan oleh deviasi geometri peledakan baik *under plan* maupun *over plan* serta deviasi pada *explosive* seperti pada grafik dibawah ini.



Gambar-11. Komparasi Ukuran Rata-Rata pada Single Rod



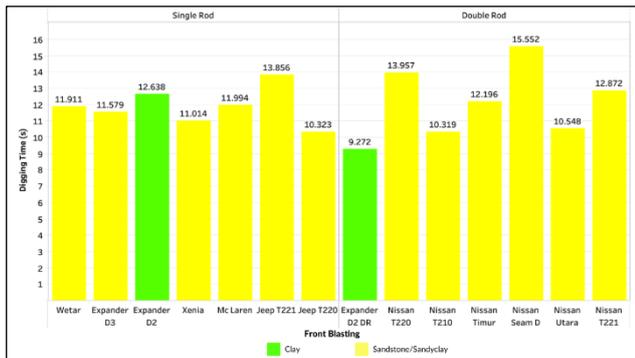
Gambar-12. Komparasi Ukuran Rata-Rata pada Double Rod

Seperti pada *front double rod* di HW Expander D2 dengan ukuran rata-rata prediksi sangat tinggi sebesar 102,81 cm dan ukuran rata-rata aktual jauh lebih rendah sebesar 39,10 cm. Hal ini disebabkan oleh terdapatnya deviasi *depth* -0,23 m, deviasi *burden* -1,31 m dan deviasi spasi -0,09 m. Hal ini mengakibatkan penyusutan ukuran *boundary* dan volume sehingga energi peledakan dari

*explosive* semakin efektif dalam memberai batuan. Meski begitu, cara efektif untuk menurunkan ukuran rata-rata bukan dengan menciptakan deviasi yang justru menyebabkan berkurangnya volume. Cara efektif adalah dengan penambahan jumlah *explosive* yang didistribusikan kedalam lubang ledak sehingga energi peledakan yang dihasilkan akan semakin efektif memberai batuan. Namun jika penambahan *explosive* membuat nilai PF bertambah besar, dapat diminimalisir dengan penerapan metode peledakan *decking* baik *single deck* maupun *double deck*.

**d) Digging Time**

Pengamatan data *digging time* dilakukan secara langsung di lokasi *front loading overburden removal* pada unit mekanis excavator Hitachi PC-2500 dan excavator Caterpillar 6020B.



Gambar-13. Komparasi Digging Time

Nilai *digging time* terbesar pada *blasting single rod* terdapat di HW Jeep T221 sebesar 13,86 detik dan *digging time* terbesar pada *blasting double rod* terdapat di HW Nissan Seam D sebesar 15,55 detik. Dari hasil analisis disimpulkan bahwa *improvement blasting double rod* menghasilkan perolehan *digging time* yang lebih besar dengan *traffic* kenaikan sebesar 0,10 detik dimana rata-rata *digging time single rod* sebesar 11,90 detik sedangkan pada rata-rata *digging time double rod* melampaui target yaitu 12,10 detik.

Meskipun begitu, *improvement blasting double rod* menghasilkan capaian *layer digging* yang lebih optimal dibandingkan dengan *blasting single rod*. Dengan kemampuan excavator Hitachi PC-2500, peledakan menggunakan metode *double rod* dapat memperoleh sebanyak 3 *layer digging* sedangkan metode *single rod* hanya menghasilkan 2 *layer*. Adapun 1 *layer digging* menyesuaikan dengan tinggi jenjang optimum bagi *loader* untuk melakukan proses *loading overburden* yaitu sebesar 4 m. Capaian *layer digging* yang lebih optimal ini memiliki banyak sekali manfaat diantaranya menurunkan frekuensi preposisi (perpindahan) unit *loader* yang akan berdampak pada menurunnya *undercarriage cost*, menambah umur ekonomis serta ketahanan dari *loader*.

**Penentuan Rekomendasi Formula Bahan Peledak Efektif**

Dari hasil analisis diketahui bahwa *blasting double rod* menghasilkan volume peledakan lebih tinggi 19,98% serta menaikkan PF sebesar 0,01 kg/BCM. Maka untuk meminimalisir kekurangan dari *blasting double rod* diperlukan perhitungan formula bahan peledak efektif yang mampu menurunkan nilai PF dengan memanfaatkan deviasi geometri peledakan yang telah diketahui. Penggunaan

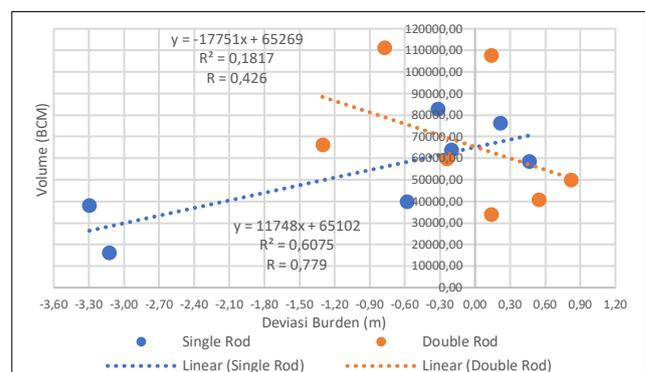
bahan peledak efektif bukan hanya mampu menurunkan nilai PF tapi juga menghasilkan fragmentasi yang optimal baik dari segi ukuran maupun keseragaman.

Untuk menentukan rekomendasi formula bahan peledak efektif, perlu mengetahui persamaan untuk menghitung PF prediksi dan volume peledakan prediksi. Penentuan formula ini dilakukan setelah mengetahui nilai deviasi geometri peledakan melalui hasil kajian analisis regresi linear dan korelasinya terhadap hasil peledakan berupa volume dan PF.

Dari hasil analisis regresi linear akan ditentukan deviasi geometri yang mempunyai korelasi paling kuat terhadap volume dan *powder factor* serta menganalisis koefisien korelasi dan koefisien determinasi yang dihasilkan. Analisis korelasi antara deviasi geometri hanya dilakukan pada geometri *burden*, *spasi* dan *depth* terhadap hasil peledakan. Adapun deviasi *stemming* dan PC tidak dilakukan analisis lanjutan sebab kedua geometri tersebut rentan sekali mengalami *error* perhitungan yang diakibatkan oleh kondisi aktual lapangan dan kesalahan *man power*.

**a) Korelasi Deviasi Burden Terhadap Volume**

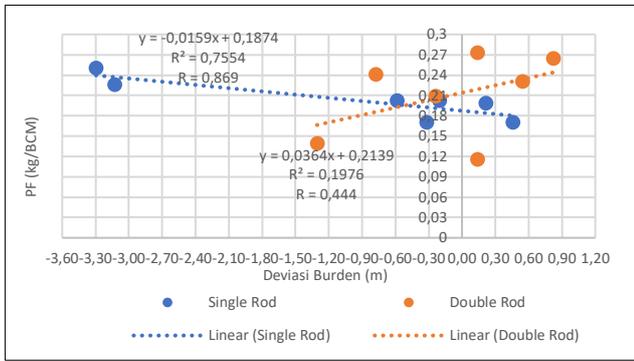
Persamaan regresi linear yang dihasilkan oleh *front blasting single rod* adalah  $y = 11748x + 65102$ , dengan  $R^2$  (koefisien determinasi) sebesar 0,6075 menunjukkan besaran pengaruh deviasi *burden* terhadap volume peledakan adalah 60,75%. Serta nilai koefisien korelasi (R) sebesar 0,779 menunjukkan berada dalam *range* sangat kuat. Sedangkan persamaan regresi pada *blasting double rod* adalah  $y = -17751x + 65269$  dengan koefisien determinasi ( $R^2$ ) = 0,1817 dan koefisien korelasi (R) = 0,426. Dapat disimpulkan bahwa deviasi *burden* memiliki pengaruh signifikansi negatif terhadap volume peledakan. Selain itu, nilai R dan R *square* menunjukkan bahwa deviasi *burden* berpengaruh cukup terhadap volume peledakan sebesar 18,17%.



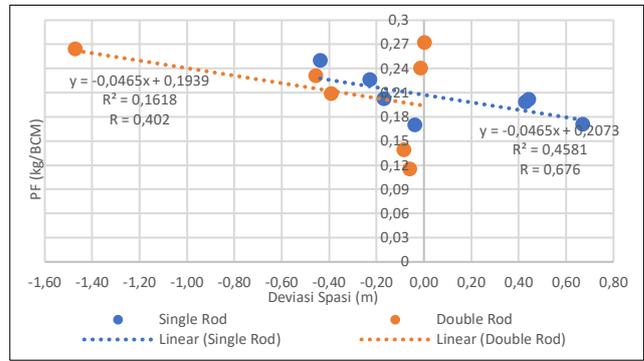
Gambar-14. Korelasi Deviasi Burden Terhadap Volume

**b) Korelasi Deviasi Burden Terhadap Powder Factor**

Pada *front blasting single rod* menghasilkan persamaan regresi linear yaitu  $y = -0,0159x + 0,1874$  dengan koefisien determinasi ( $R^2$ ) = 0,7554 dan koefisien korelasi (R) = 0,869. Artinya deviasi *burden* pada *single rod* berpengaruh sangat kuat dengan besaran pengaruh sebesar 75,54%. Sedangkan *blasting double rod* menghasilkan persamaan  $y = 0,0364x + 0,2139$  dengan  $R^2 = 0,1976$  dan R = 0,444. Hal ini menunjukkan bahwa deviasi *burden* pada *double rod* berpengaruh signifikansi positif terhadap PF dengan besaran pengaruh 19,76% dalam *range* pengaruh cukup (0,444).



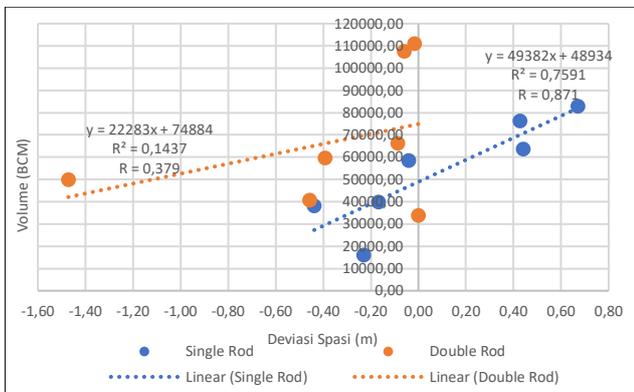
Gambar-15. Korelasi Deviasi Burden Terhadap PF



Gambar-17. Korelasi Deviasi Spasi Terhadap PF

c) Korelasi Deviasi Spasi Terhadap Volume

Pada *blasting single rod* menghasilkan persamaan regresi  $y = 49382x + 48934$  dengan koefisien determinasi ( $R^2$ ) = 0,7591 dan koefisien korelasi ( $R$ ) = 0,871. Dapat disimpulkan bahwa deviasi *spasi* berpengaruh signifikansi positif (berbanding lurus) terhadap volume sebesar 75,91% dalam kategori sangat kuat (0,871). Sedangkan *blasting double rod* menghasilkan persamaan regresi linear  $y = 22283x + 74884$  dengan koefisien determinasi ( $R^2$ ) = 0,1437 dan koefisien korelasi ( $R$ ) = 0,379. Dapat disimpulkan bahwa deviasi spasi memiliki signifikansi positif (searah) terhadap volume pada *blasting double rod* dengan besaran pengaruh sebesar 14,37% dan berada dalam *range* hubungan kategori cukup (0,379).



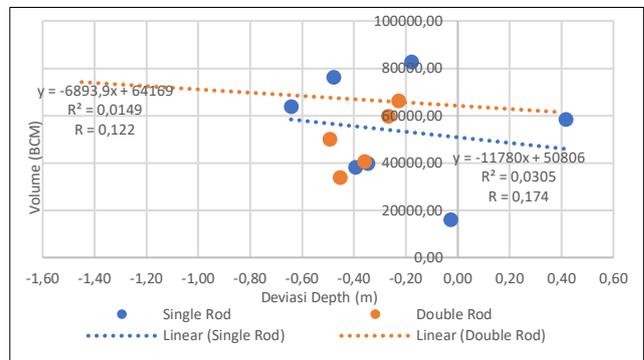
Gambar-16. Korelasi Deviasi Spasi Terhadap Volume

d) Korelasi Deviasi Spasi Terhadap Powder Factor

Pada *front blasting single rod* menghasilkan persamaan regresi linear yaitu  $y = -0,0465x + 0,2073$  dengan  $R^2 = 0,4581$  dan  $R = 0,676$ . Hal ini menunjukkan bahwa deviasi spasi memiliki *trend* signifikansi negatif terhadap PF yang mana semakin besar deviasi spasi maka akan semakin menurunkan nilai *powder factor* dan sebaliknya. Dengan pengaruh deviasi spasi sebesar 45,81% terhadap *powder factor* dan berada dalam kategori hubungan kuat (0,676). Pada *front blasting double rod*, persamaan regresi linear adalah  $y = -0,0465x + 0,1939$  dengan  $R^2 = 0,1618$  dan  $R = 0,402$ . Disimpulkan bahwa deviasi spasi memiliki korelasi negatif terhadap *powder factor* dengan besaran pengaruh 16,18% dalam kategori cukup (0,402).

e) Korelasi Deviasi Depth Terhadap Volume

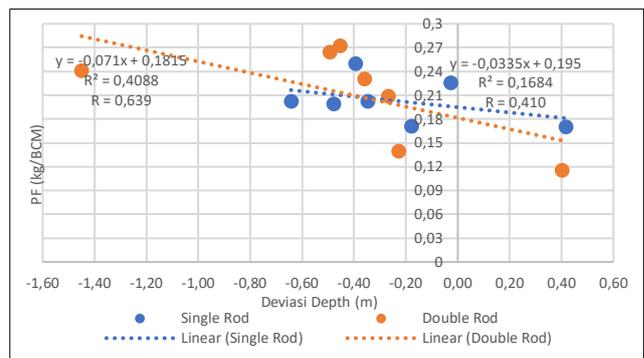
*Front blasting single rod* menghasilkan persamaan regresi linear  $y = -11780x + 50806$  dengan  $R^2 = 0,0305$  dan  $R = 0,174$ . Artinya deviasi *depth* menghasilkan signifikansi negatif (berbanding terbalik) terhadap volume peledakan. Besaran pengaruhnya sebesar 3,05% dalam kategori hubungan sangat lemah (0,174). Pada *front blasting double rod* menghasilkan persamaan regresi linear  $y = -6893,9x + 64169$  dengan  $R^2 = 0,0149$  dan  $R = 0,122$ . Menunjukkan bahwa deviasi *depth* pada *double rod* memiliki signifikansi negatif (berlawanan arah) dengan besaran pengaruh 1,49% dan berada dalam kategori hubungan sangat lemah (0,122).



Gambar-18. Korelasi Deviasi Depth Terhadap Volume

f) Korelasi Deviasi Depth Terhadap Powder Factor

Persamaan regresi linear yang dihasilkan pada *front blasting single rod* adalah  $y = -0,0335x + 0,195$  dengan  $R^2 = 0,1684$  dan  $R = 0,410$ .



Gambar-19. Korelasi Deviasi Depth Terhadap PF

Diketahui bahwa deviasi *depth* memiliki signifikansi negatif terhadap *powder factor*. Menunjukkan bahwa semakin besar deviasi *depth* yang dihasilkan maka akan menurunkan nilai *powder factor*. Dengan besaran pengaruhnya 16,84% dan berada dalam kategori hubungan cukup (0,410). Pada *front blasting double rod* menghasilkan persamaan regresi linear  $y = -0,071x + 0,1815$  dengan  $R^2 = 0,4088$  dan  $R = 0,639$ . Hasil analisis menunjukkan bahwa deviasi *depth* pada *front blasting double rod* menghasilkan korelasi signifikansi negatif terhadap PF. Dengan besaran pengaruh 40,88% dan berada dalam *range* kuat (0,639).

#### Formula $Q_{eff}$

Analisis regresi linear menunjukkan pada *blasting single rod* terdapat deviasi spasi yang memiliki korelasi sangat kuat terhadap volume peledakan sebesar 75,91% dan deviasi *burden* memiliki korelasi sangat kuat terhadap *powder factor* sebesar 75,54%. Adapun pada *front blasting double rod*, deviasi *burden* memiliki korelasi cukup berpengaruh terhadap volume peledakan sebesar 18,17% dan deviasi *depth* berpengaruh kuat terhadap *powder factor* sebesar 40,88%.

Maka dari itu penentuan rekomendasi bahan peledak efektif dilakukan dengan memanfaatkan persamaan regresi linear dari deviasi geometri peledakan yang memiliki hubungan paling berpengaruh terhadap volume dan PF.

#### Single Rod

Volume :  $y = 49382x + 48934$  ( $x =$  deviasi spasi)

PF :  $y = -0,0159x + 0,1874$  ( $x =$  deviasi *burden*)

#### Double Rod

Volume :  $y = -17751x + 65269$  ( $x =$  deviasi *burden*)

PF :  $y = -0,071x + 0,1815$  ( $x =$  deviasi *depth*)

Adapun formula bahan peledak efektif adalah sebagai berikut:

$$Q_{eff} = PF \times Volume$$

Untuk *blasting single rod*:  $Q_{eff} = [(-0,0159x + 0,1874)(49382x + 48934)]$

Untuk *blasting double rod*:  $Q_{eff} = [(-0,071x + 0,1815)(-17751x + 65269)]$ .

Dalam penerapan formula  $Q_{eff}$ , maka harus diketahui terlebih dahulu deviasi *burden*, spasi dan *depth* aktual yang terekam di lapangan melalui kegiatan *sounding* geometri peledakan. Hal ini diharapkan agar perhitungan  $Q_{eff}$  dapat segera dilakukan sebelum melakukan proses *order* bahan peledak paling efektif di Gudang Handak. Penggunaan formula ini hanya dapat diterapkan pada lokasi peledakan H-3 atau H-2 *blasting*. Hal ini dikarenakan dalam perhitungannya harus diketahui terlebih dahulu nilai deviasi geometri peledakan yang akan membutuhkan waktu tambahan.

#### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. *Blasting double rod* menghasilkan deviasi geometri peledakan tertinggi pada 4 geometri yaitu spasi, *depth*, *stemming* dan PC sedangkan *single rod* pada geometri *burden*. Deviasi geometri peledakan didominasi nilai *under plan* yang disebabkan oleh kondisi aktual lapangan (lokasi *touch of coal*, *final slope*, perbedaan

tinggi antar jenjang, lapisan akuifer dan kondisi massa batuan) serta pengaruh ketelitian *man power*.

2. Metode *blasting double rod* lebih efektif dibandingkan *single rod* yang menghasilkan kenaikan volume peledakan sebesar 19,98%, ukuran fragmentasi aktual lebih kecil 8,19 cm, indeks keseragaman lebih besar 0,15, potensi fragmentasi *boulder* lebih kecil sebesar 5% serta perolehan *layer digging* lebih optimal. Namun, *blasting double rod* menghasilkan nilai PF lebih tinggi 0,01 kg/BCM dan *digging time* lebih tinggi 0,1 detik.
3. Rekomendasi formula bahan peledak efektif pada *blasting single rod* adalah:  $Q_{eff} = [(-0,0159 (DB) + 0,1874)(49382(DS) + 48934)]$  dan *blasting double rod*:  $Q_{eff} = [(-0,071(DD) + 0,1815)(-17751(DB) + 65269)]$ . Formula tersebut diperoleh dari analisis regresi linear berkorelasi kuat.

Adapun saran yang dapat diberikan terhadap penelitian adalah sebagai berikut:

1. Pengolahan data deviasi geometri peledakan sebaiknya dilakukan minimal 30 sampel lokasi dengan *cluster* berbeda agar menaikkan tingkat akurasi data.
2. Diperlukan metode statistik analisis regresi lanjutan agar interpretasi koefisien korelasi dan determinasi yang dihasilkan lebih akurat.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada seluruh pihak terkait yang telah memberikan kesempatan dan membantu terlaksananya penelitian baik kepada pimpinan maupun mentor penulis di PT Adaro Indonesia dan PT BUMA ADT.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Rinaldo, *et al.*, "Analisis Pengaruh Parameter Geomekanika Batuan Terhadap Kegiatan Peledakan Pada Front Penambangan Blok A2 di CV. Triarga Nusatama, Kecamatan Lareh Sago Halaban, Kabupaten Lima Puluh Kota, Sumatera Barat", *J. Bina Tambang*, vol. 3, pp. 1163 – 1173, 2020.
- [2] *Metode Peledakan Double Rod*, PT BUMA site ADT (Departemen Engineering), Tanjung, Indonesia, 2023.
- [3] R. Rosalina, *et al.*, "Analisis Dampak Deviasi Depth Hole Terhadap Deviasi Explosive Serta Deviasi Cost di Elevasi 450 dan 465 PHASE 7 pada Bulan Desember 2016 – Januari 2017 di PT Amman Mineral Nusa Tenggara", *J. Pertambangan*, vol. 2, pp. 25 – 33, 2018.
- [4] S. Bhandari, *Engineering Rock Blasting Operations*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997.
- [5] Konya, C. and Edward, J, *Surface Blast Design*. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliff, 1990.
- [6] S.R. Fanny, "Kajian Teknis Biaya Pemboran dan Peledakan Batu Andesit di PT Lima Energi Utama Kecamatan Pangkalan Koto Baru Kabupaten Lima Puluh Kota Provinsi Sumatera Barat," Tesis, Jurusan Teknik Pertambangan, Sekolah Tinggi Teknologi Industri (STTIND), Padang, 2017.

- [7] L.F. Syiffa, "Evaluasi Kegiatan Peledakan Untuk Mencapai Target Fragmentasi Batuan  $\leq 50$  cm PT. Lotus SG Lestari", Tesis, Jurusan Teknik Pertambangan, UIN Syarif Hidayatullah, Jakarta, 2021.
- [8] A. Milus, *et al.*, "Kajian Pengaruh Faktor Batuan Terhadap Fragmentasi Batuan Overburden Hasil Peledakan Berdasarkan Model Kuz-Ram", *J. Himasapta*. vol. 6, pp: 79-84, 2021.
- [9] W.A. Hustrulid, *Blasting Principles for Open Pit Mining*. Rotterdam: General Design Concepts, 1999.
- [10] R. Rian, *et al.*, "Evaluasi Geometri Peledakan Overburden Terhadap Digging Time Alat Gali PT Artamulia Tatapratama Jobsite Kuansing Inti Makmur Kabupaten Bungo, Provinsi Jambi", *J. Pertambangan dan Lingkungan*, vol. 2, pp. 31-41, 2021.