

Hubungan *Scaled Distance* Terhadap Getaran Tanah

Jeninu Nunu Alvares*, Tri Gamela Saldy, Dedi Yulhendra, Aulia Hidayat Burhamidar

Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

* jeninununalvares@gmail.com

Abstrak. Penentuan muatan maksimum bahan peledak per *delay* pada jarak tertentu merupakan aspek krusial dalam desain peledakan. Studi ini menganalisis hubungan antara muatan ledak dan jarak pengukuran terhadap getaran tanah, dengan tujuan menetapkan rekomendasi muatan untuk mencapai *Peak Particle Velocity (PPV)* 1 mm/s. Menggunakan pendekatan *scaled distance* (gabungan jarak dan muatan) sebagai variabel independen dan PPV sebagai variabel dependen, hasil analisis menunjukkan korelasi signifikan ($R^2=69,09\%$) dengan konstanta $k=5473,3$ dan $n=-1,641$. Berdasarkan persamaan empiris, muatan 20,007 kg pada jarak ≥ 850 m atau 46,693 kg pada 1300 m diperlukan untuk mencapai target PPV. Temuan ini menjadi dasar ilmiah untuk optimasi peledakan di area sensitif, membuktikan keakuratan prediksi PPV melalui metode *scaled distance* dan konstanta spesifik lokasi.

Kata kunci: *peak particle velocity*, isian bahan peledak, radius pengukuran, *scaled distance*, getaran tanah

Abstract. Determining the maximum explosive charge per *delay* at specific distances is a critical component of blast design. This study examines the correlation between explosive charge and measurement radius on ground vibration, while establishing charge recommendations to achieve a *Peak Particle Velocity (PPV)* of 1 mm/s. Using *scaled distance* (a combination of radius and charge) as the independent variable and PPV as the dependent variable, empirical analysis reveals a significant relationship ($R^2=69.09\%$) with constants $k=5473.3$ and $n=-1.641$. The derived equation recommends charges of 20.007 kg at ≥ 850 m or 46.693 kg at 1300 m to attain the target PPV. These findings provide a scientific basis for optimizing blasting operations in high-risk areas, demonstrating the accuracy of PPV prediction through *scaled distance* and site-specific constants.

Keywords: *peak particle velocity*, explosive charge, measurement radius, *scaled distance*, ground vibration

Tanggal Diterima: 10/06/2025; Tanggal Direvisi: 23/09/2025; Tanggal Disetujui: 01/12/2025; Tanggal Dipublikasi: 10/12/2025

1. Pendahuluan

Seiring dengan pertumbuhan populasi dan semakin padatnya kota, frekuensi getaran semacam ini telah meningkat secara bertahap. Oleh karena itu, peledakan yang aman dan terjangkau harus dapat mengatasi kedua masalah ini secara bersamaan. Menjaga keselamatan dalam hal dampak lingkungan merupakan salah satu elemen terpenting dari peledakan yang efektif. Menentukan jumlah maksimum bahan peledak per penundaan untuk jarak tertentu merupakan komponen penting dalam desain peledakan, terutama untuk peledakan skala besar, guna memungkinkan peledakan yang terkendali dan mengurangi masalah lingkungan ini^[1]. Salah satu permasalahan itu adalah getaran tanah (*ground vibration*). Perusahaan tambang PT Bukit Asam Tbk. memiliki kondisi dimana lokasi perumahan cukup dekat dengan area pertambangan, yaitu berkisar 800 m-1350 m.

Sebagai langkah antisipatif dalam melindungi infrastruktur, prediksi intensitas getaran tanah melalui simulasi perhitungan metode peledakan menjadi krusial. Tujuannya adalah memastikan proses peledakan berlangsung optimal tanpa mengorbankan aspek keselamatan. Dengan demikian, estimasi getaran akibat peledakan diperlukan sebagai strategi mitigasi untuk mengurangi potensi kerusakan^[2].

Peak Particle Velocity (PPV) dan frekuensi adalah dua indeks penting yang digunakan untuk menyatakan magnitudo getaran tanah yang

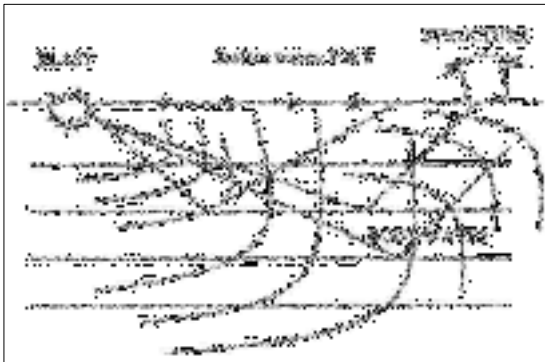
disebabkan oleh peledakan. Para peneliti lebih sering menggunakan kecepatan partikel puncak dibandingkan dengan yang lainnya. Banyak ilmuwan, termasuk Duvall dan Fogleson, Ambraseys dan Hendron, *Indian Standards Institute*, serta Langefors dan Kihlstrom, telah menciptakan berbagai rumus empirik untuk prediksi PPV. Karena PPV yang tinggi selama peledakan dapat menyebabkan kerusakan lingkungan yang segera pada struktur, prediksi PPV yang akurat sangat penting^[3].

Dalam waktu penelitian, adanya perbedaan antara prediksi getaran perusahaan dengan getaran aktual yang dihasilkan setelah kegiatan peledakan dilakukan. Perbedaannya terdapat nilai prediksi yang tinggi daripada getaran aktual di lapangan. Prediksi getaran bulan Januari berada pada rentang 0,7-0,8 mm/detik namun kenyataannya getaran aktual di lapangan berada pada rentang 0,2 hingga 0,9 mm/detik. Hal ini mengakibatkan penggunaan bahan peledak tidak optimal sehingga hasil fragmentasi dari kegiatan peledakan menjadi buruk nantinya. Selain itu, fragmentasi yang dihasilkan mengakibatkan *digging time* alat muat berada pada rentang 12-13 detik. Hal ini masih belum mencapai target dimana *digging time* alat muat berada pada rentang 10-12 detik saja.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Getaran Tanah

Getaran tanah (*ground vibration*) adalah gelombang yang bergerak di dalam tanah disebabkan oleh adanya sumber energi. Sumber energi tersebut dapat berasal dari alam, seperti gempa bumi atau adanya aktivitas manusia, salah satu diantaranya adalah kegiatan peledakan. Getaran tanah (*ground vibration*) terjadi pada daerah elastis (*elastic zone*). Di daerah ini tegangan yang diterima material lebih kecil dari kuat material sehingga hanya menyebabkan perubahan bentuk dan volume. Sesuai dengan sifat elastis material maka bentuk dan volume akan kembali ke keadaan semula setelah tak ada tegangan yang bekerja. Perambatan tegangan pada daerah elastis akan menimbulkan gelombang elastis^[4].



Gambar 1. Ilustrasi Getaran Tanah

Gelombang regangan merambat sebagai gelombang elastis ketika intensitas gelombang tegangan berkurang hingga mencapai tingkat di mana tidak ada deformasi permanen yang terjadi pada massa batuan (Gambar 1). Gelombang ini diidentifikasi sebagai getaran tanah. Getaran tanah menyebar dari lubang ledak ke segala arah^[5] dan dapat menyebabkan kerusakan pada bangunan dan struktur lainnya^[6]. Ketika intensitas getaran tanah tinggi, maka akan mengganggu manusia dan bahkan dapat merusak struktur di sekitarnya. Oleh karena itu, pengukuran dan prediksi tingkat getaran tanah diperlukan untuk menilai desain operasi peledakan^[4].

2.1.1 Faktor yang Mempengaruhi Getaran

Tingkat getaran tanah bergantung pada dua parameter, yaitu parameter yang dapat dikontrol dan parameter yang tidak dapat dikontrol. Parameter yang dapat dikontrol meliputi *burden*, *spasi*, *stemming*, *subdrilling*, diameter lubang, muatan total dan muatan maksimum per penundaan dan interval penundaan, sedangkan parameter yang tidak dapat dikontrol adalah kondisi batuan, geologi, dan sifat batuan. Jumlah muatan bahan peledak per waktu tunda^[7].

2.1.2 Alat Pengukur Getaran Tanah

Pengukuran getaran peledakan di lokasi pengukuran menggunakan instrumen micromate

instanтел yang didesain sebagai perekaman getaran (*ground vibration*), ledakan udara (*air blast*), dan kebisingan (*noise*) akibat kegiatan peledakan. Hasil rekaman umumnya dinyatakan dalam *peak vector sum (PVS)* dengan satuan mm/detik^[8].



Gambar 2. Micromate Instanтел

Mekanisme pengukuran menggunakan instrumen tersebut adalah sebagai berikut:

1. Micromate instanтел dipersiapkan untuk pengukuran seperti pemasangan *geophone* untuk perekaman getaran tanah dan *microphone* untuk perekaman *air blast*.
2. Hasil perekaman dikonversi menjadi getaran listrik dan disimpan dalam memori penyimpanan.
3. Getaran listrik akan di transfer ke komputer dan di ubah lagi melalui perangkat lunak *blastware*.
4. Hasil konversi *blastware* akan menampilkan puncak getaran dan kebisingan serta grafik.

2.1.3 Scaled Distance

Cara yang praktis dan efektif untuk mengontrol getaran adalah dengan menggunakan *Scaled Distance*. Nilai SD yang besar akan lebih aman, karena semakin jauh jaraknya akan lebih aman dibandingkan dengan jarak yang lebih dekat^[9]. Dengan menggunakan sistem metrik, *Scaled Distance* dapat dipersamakan sebagai berikut:

$$SD = \frac{D}{\sqrt{W}} \quad (1)$$

Dimana D adalah jarak dari lokasi pengukuran terhadap lokasi peledakan (m), dan W adalah total bahan peledak yang digunakan per *delay* (kg).

Scaled distance sebagai alat penggabungan dua faktor-faktor paling penting meningkatkan intensitas gerakan tanah dan getaran udara sebagai penurunan sebanding dengan jarak dan berbanding terbalik dengan berat bahan peledak dalam 1 kali tunda.

2.1.4 Peak Particle Velocity

Peak Particle Velocity (PPV) merupakan kecepatan maksimum yang digunakan untuk menghitung besarnya getaran pada suatu lokasi yang tergantung pada jarak lokasi tersebut dari pusat peledakan dan dari jumlah bahan peledak yang dipakai per periode (*delay*)^[2].

Sejumlah persamaan empiris diusulkan oleh para peneliti yang berbeda untuk memprediksi kecepatan *Peak Particle Velocity* (PPV) dan untuk meminimalkan dan mengendalikan getaran tanah^[10]. Getaran tanah didefinisikan dalam istilah *Peak Particle Velocity* (PPV). Persamaan empiris yang paling umum digunakan dalam melakukan prediksi *Peak Particle Velocity* (PPV) dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Persamaan PPV

Rumus Empiris	Persamaan
USBM ^[11]	$PPV = K \times \left[\frac{D}{\sqrt{W}} \right]^n$
Ambraseys–Hendron ^[12]	$PPV = K \times \left[\frac{D}{W^{0,33}} \right]^n$
Davies <i>et al</i> ^[13]	$PPV = K \times \frac{D^b}{W^{-a}}$
Indian Standard ^[14]	$PPV = K \times \left[\frac{D}{W^{\frac{2}{3}}} \right]^n$
Roy ^[15]	$PPV = a + K \times \left[\frac{D}{\sqrt{W}} \right]^{-n}$

Dimana PPV adalah *Peak Particle Velocity* (mm/s), D adalah jarak antara permukaan peledakan ke lokasi pengukuran (m), W adalah muatan bahan peledak maksimum per *delay* (kg), K , a , b , dan n adalah konstanta lokasi, yang dapat dihitung dengan analisis regresi. Analisis regresi ini nantinya akan memperlihatkan bagaimana hubungan *scaled distance* dengan hasil getaran tanah (PPV).

Tabel 2. Kelas dan Jenis Bangunan Serta *Peak Particle Velocity*

Kelas	Jenis bangunan	Peak Vector Sum (mm/detik)	Frekuensi	PPV
1	Bangunan kuno yang dilindungi undang-undang benda cagar budaya	2	0-5	2
			5-20	3
			20-100	5
2	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan adukan semen saja, termasuk bangunan dengan pondasi dari kayu dan lantainya diberi adukan semen	3	0-5	3
			5-20	5
			20-100	7
3	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan adukan semen diikat dengan slope beton	5	0-5	5
			5-20	7
			20-100	12
4	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan adukan semen slope beton, kolom dan rangka diikat dengan <i>ring balk</i>	7-20	0-5	7
			5-20	12
			20-100	20
5	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan adukan semen, slope beton, kolom dan diikat dengan rangka baja	12-40	0-5	12
			5-20	24
			20-100	40

Dalam Keputusan Menteri ESDM No. 1827 K 30 MEM 2018, kegiatan pemberaian batuan (*rock breakage*) diatur didalamnya. Salah satunya

adalah baku tingkat getaran. Baku tingkat getaran terhadap bangunan harus sesuai dengan ketentuan SNI 7571:2023^[16]. Ketentuan ambang batas getaraan tanah dapat dilihat pada tabel 3.

2.2 Metode Pengurangan Getaran

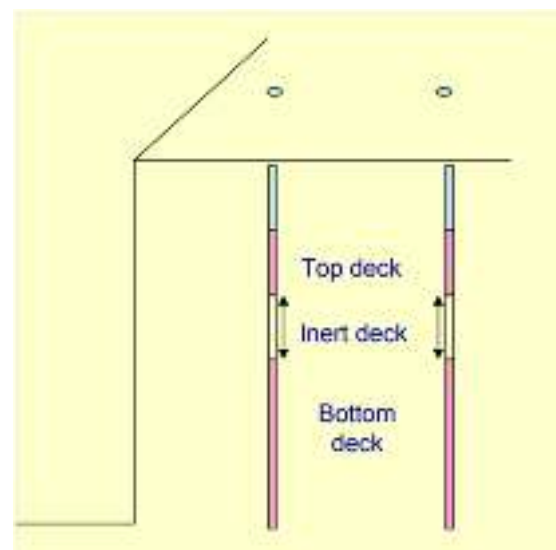
Getaran akibat peledakan tentu saja menjadi tantangan pekerja peledakan dalam melakukan kegiatan peledakan. Dalam hal ini, ada beberapa cara untuk memperkecil efek getaran dalam praktiknya yaitu:

2.2.1 Penggunaan Delay yang Tepat

Waktu tunda antar lubang ledak akan membuat bidang bebas kedua untuk lubang ledak berikutnya untuk hancur yang berfungsi untuk mengurangi nilai getaran antara lubang ledak^[17]. Penundaan milidetik memiliki pengaruh signifikan terhadap struktur (amplitudo dan frekuensi) getaran, yaitu melalui waktu penundaan antara detonasi muatan peledak yang berurutan^[18].

2.2.2 Metode Decking

Muatan bahan peledak per lubang, jumlah bahan peledak yang diledakkan per penundaan, atau keduanya dapat dikurangi dengan prosedur yang dikenal sebagai *decking*. Selain itu, *decking* menjaga bahan peledak agar tidak masuk ke area lemah seperti lapisan lumpur dan memungkinkan mereka untuk masuk ke zona batuan yang lebih kokoh^[19].



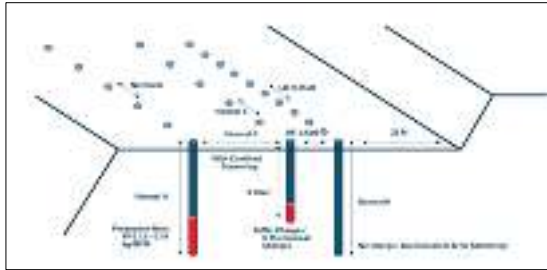
Gambar 3. Ilustrasi Metode *Decking*

Kondisi lubang bor akan mempengaruhi panjang dek inert. Untuk mengurangi kemungkinan propagasi antara dek, perpanjang panjang dek di lubang yang lembab. Enam kali diameter lubang bor harus menjadi jarak minimum antara dek bahan peledak; di lubang yang basah, jarak ini harus digandakan^[19].

2.2.3 Line Drilling

Line drilling adalah teknik peledakan yang menggunakan sejumlah lubang bor berdiameter kecil yang dipasang sangat dekat satu sama lain di

sepanjang tepi luar peledakan produksi. Bahan peledak tidak dimasukkan ke dalam lubang-lubang *line drilling* ini. Pola lubang bor berfungsi sebagai bidang lemah dan bidang bebas, memantulkan gelombang kejut dari peledakan produksi kembali sebagai gelombang tarik untuk mencegah terjadinya *backbreak* dan *stressing*.



Gambar 4. Ilustrasi *Line Drilling*

Rancangan geometris *line drilling* didasarkan pada diameter lubang bor antara 1,5 hingga 3 inci dan jarak antara 2 hingga 4 kali diameter lubang *line drilling*^[19].

2.3 Persamaan Regresi Non-Linear Geometri

Regresi Non Linear Geometri (*Power*) Didalam kajian statistik, untuk menghitung persamaan PPV maka dapat menggunakan metode regresi *power* pada program komputer. Persamaan regresi *power* didalam kajian statistik secara umum adalah^[2]:

$$Y = ax^b \quad (2)$$

dimana:

Y : variabel terikat

a : konstanta

X : variabel bebas

b : konstanta

2.4 Perhitungan Korelasi

Dua variabel dikatakan berkorelasi apabila perubahan dalam satu variabel diikuti oleh perubahan variable lain, baik yang searah maupun tidak^[20]. Hubungan antara variabel dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu korelasi positif, korelasi negatif, dan korelasi nihil.

Terjadinya korelasi positif apabila perubahan antara variabel yang satu diikuti oleh variabel lainnya dengan arah yang sama (berbanding lurus). Terjadinya korelasi negatif apabila perubahan antara variabel yang satu diikuti oleh variabel lainnya dengan arah yang berlawanan (berbanding terbalik). Terjadinya korelasi nihil apabila perubahan antara variabel yang satu diikuti oleh variabel lainnya dengan arah yang tidak teratur (acak). Artinya apabila variabel yang satu meningkat, maka akan diikuti penurunan variabel.

Koefisien korelasi yang disimbolkan dengan “R” berkisar antara $-1 \leq R \leq +1$. Apabila dua variabel berkorelasi negative sehingga nilai koefisien korelasinya akan mendekati -1, apabila dua variabel tidak berkorelasi maka nilai koefisien korelasinya akan mendekati 0, sedangkan apabila

dua variabel berkorelasi positif maka nilai koefisien korelasinya akan mendekati satu^[20].

Tabel 3. Koefisien Korelasi

Interval Koefisien	Tingkat Hubungan
0,00 – 0,199	Sangat Rendah
0,20 – 0,399	Rendah
0,40 – 0,599	Sedang
0,60 – 0,799	Kuat
0,80 – 1,00	Sangat Kuat

3. Metodologi Penelitian

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini adalah penelitian terapan yaitu penelitian yang dilakukan dengan membuat pengembangan sebagai jawaban ataupun solusi atas permasalahan yang ada. Penelitian ini menggunakan persamaan empirik dari USBM untuk mendapatkan konstanta kondisi spesifik lokasi peledakan dan eksponen penunjuk laju penurunan kecepatan partikel pada prediksi getaran tanah.

Penelitian ini akan mencakup beberapa data seperti jarak pengukuran, berat bahan peledak yang digunakan per waktu tunda serta *scaled distance* (SD) dalam memperkirakan hasil getaran tanah akibat kegiatan peledakan. Peneliti berharap dengan judul penelitian ini, akan memberi informasi yang tepat dan komprehensif terhadap hasil getaran tanah.

3.2 Tahapan Penelitian

Pengumpulan data dilakukan langsung di daerah penelitian yaitu di PT Bukit Asam, Tbk. adapun tahapan dalam kegiatan ini adalah sebagai berikut:

3.2.1 Studi literatur

Tahapan ini akan dilakukan pendalaman serta penambahan referensi mengenai topik yang akan diangkat melalui sumber-sumber pendukung seperti buku, paper ilmiah, laporan, penelitian terdahulu. Kegiatan ini bertujuan untuk menambah referensi penguatan dalam melakukan penelitian.

3.2.2 Observasi data lapangan

Mengumpulkan data primer melalui lapangan serta data sekunder berupa wawancara, searching, dan sebagainya. Data primer dilakukan dengan observasi lapangan, perhitungan jumlah penggunaan bahan peledak serta pengukuran hasil getaran yang dihasilkan akibat kegiatan peledakan.

3.2.3 Teknis analisis data

Pada tahap ini peneliti telah mendapatkan semua data dan siap untuk dianalisis. Hasil analisis akan memberikan model pola data. Peneliti menggunakan bantuan perangkat lunak Ms. Excel.

3.2.3.1 Pengujian regresi non linear

Melakukan analisis dari data terdahulu untuk mendapatkan nilai konstanta daerah penelitian

dengan grafik regresi non-linear (*power*) yang akan digunakan pada rumus empiris dalam prediksi PPV.

3.2.3.2 Melakukan prediksi

Prediksi dilakukan dengan menggunakan rumus empiris oleh *US Bureau of Mine* (USBM) dalam menentukan PPV.

3.2.3.3 Perhitungan usulan isian bahan peledak

Melakukan analisis penggunaan bahan peledak minimal untuk mendapatkan PPV yang aman.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil Penelitian

4.1.1 Peak Particle Velocity (PPV)

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data primer dan data sekunder. Data primer adalah data yang diambil secara langsung di lapangan. Data primer diambil oleh peneliti selama pelaksanaan penelitian, sedangkan data sekunder yang digunakan adalah data hasil getaran selama 3 bulan terakhir (Oktober 2024-Januari 2025) yang diambil dari data perusahaan dan penelitian sebelumnya. Tabel 3 menunjukkan hasil pengukuran pada peledakan sekunder dan tabel 4 menunjukkan pengukuran melalui data primer.

Tabel 4. Data Peledakan Sekunder

No	Tanggal	PPV (mm/det)	ANFO/delay (kg)	Radius Pengukuran (m)
1	17/10/2024	1,184	18	500
2	19/10/2025	2,835	30	500
3	21/10/2024	2,931	29	500
4	22/10/2024	1,285	25	500
5	22/10/2024	2,845	15	500
6	23/10/2024	2,855	15	500
7	24/10/2024	1,907	15	500
8	25/10/2024	1,901	18	500
9	25/10/2024	2,834	15	500
10	20/11/2024	1,821	15	498
11	20/11/2025	0,441	15	876
12	21/11/2024	0,741	15	875
13	21/11/2024	0,788	15	875
14	22/11/2024	1,22	15	487
15	22/11/2025	0,504	15	907
16	24/11/2024	0,497	15	1200
17	3/12/2024	2,854	15	500
18	3/12/2024	2,745	15	500
19	3/12/2024	0,733	15	952
20	3/12/2024	0,504	15	952
21	4/12/2024	2,674	15	500
22	4/12/2024	0,607	15	943

No	Tanggal	PPV (mm/det)	ANFO/delay (kg)	Radius Pengukuran (m)
23	5/12/2024	2,947	15	500
24	5/12/2024	2,945	15	500
25	5/12/2024	0,701	15	919
26	5/12/2024	0,552	15	919
27	6/12/2024	0,694	15	1200
28	6/12/2024	0,733	15	858
29	7/12/2024	0,883	18	1080
30	7/12/2024	0,717	15	901
31	7/12/2024	0,686	15	901
32	8/12/2024	0,434	18	1029
33	9/12/2024	0,867	17	1024
34	12/12/2024	0,52	15	949
35	13/12/2024	0,93	15	973
36	14/12/2024	0,552	11	922
37	14/12/2024	0,418	11	922
38	15/12/2024	0,954	11	827
39	18/12/2024	0,709	11	976
40	18/12/2024	0,796	11	976
41	19/12/2024	0,528	11	981
42	22/12/2024	0,331	15	1300
43	22/12/2024	0,315	15	1300
44	24/12/2024	0,457	15	900
45	24/12/2024	0,717	15	900
46	24/12/2024	0,465	15	900
47	27/01/2025	0,213	13	1038
48	27/01/2025	0,906	13	1038
49	28/01/2025	0,654	13	985
50	30/01/2025	0,378	11	1000
Min		0,213	11	487
Max		2,947	30	1300
Rata-rata		1,174	15,380	825,660
Standar Deviasi		0,918	3,719	245,753

Pada tabel 3 didapatkan beberapa variabel nilai. Variabel jarak memiliki nilai terkecil dan terbesar adalah 487 m dan 1300 m. Bahan peledak memiliki nilai terkecil dan terbesar adalah 11 kg dan 30 kg. Pengukuran getaran memiliki nilai terkecil dan terbesar adalah 0,213 mm/detik dan 2,947 mm/detik. Selain itu, adapun rata rata penggunaan bahan peledak dan jarak terhadap PPV berturut adalah 825,66 m, 15,38 kg, dan 1,174 mm/det.

Tabel 5 Data Peledakan Primer

No	Tanggal	PPV (mm/det)	ANFO/delay (kg)	Radius Pengukuran (m)
1	01/02/2025	0,394	13,8	1100
2	02/02/2025	0,575	13,9	1100

No	Tanggal	PPV (mm/det)	ANFO/delay (kg)	Radius Pengukuran (m)
3	04/02/2025	0,497	18,0	997
4	05/02/2025	0,765	22,9	1025
5	05/02/2025	0,512	14,9	1100
6	06/02/2025	0,457	19,9	1140
7	06/02/2025	0,449	16,9	1130
8	07/02/2025	0,402	16,9	1100
9	10/02/2025	0,536	19,8	1118
10	13/02/2025	0,441	22,1	1089
11	14/02/2025	0,35	23,0	1118
12	16/02/2025	0,434	23	1103
13	18/02/2025	0,473	16,7	1168
14	25/02/2025	0,434	22,4	1091
Min		0,35	13,8	997
Max		0,765	23	1168
Rata-rata		0,480	18,866	1098,500
Standar Deviasi		0,101	3,431	43,133

Pada tabel 4 didapatkan beberapa variabel nilai. Variabel jarak memiliki nilai terkecil dan terbesar adalah 997 m dan 1168 m. Bahan peledak memiliki nilai terkecil dan terbesar adalah 13,8 kg dan 23 kg. Pengukuran getaran memiliki nilai terkecil dan terbesar adalah 0,35 mm/detik dan 0,765 mm/detik. Nilai rata rata penggunaan bahan peledak dan jarak terhadap PPV berturut adalah 1098,5 m, 18,86 kg, dan 0,480 mm/detik.

4.1.2 Scaled distance (SD)

Perhitungan *scaled distance* ini perlu dilakukan untuk mencari persamaan empiris dalam melakukan prediksi PPV. persamaan *scaled distance* dapat digunakan dengan persamaan 1. Tabel 5 menunjukkan hasil perhitungan SD pada data sekunder.

Tabel 6. *Scaled Distance* Data Sekunder

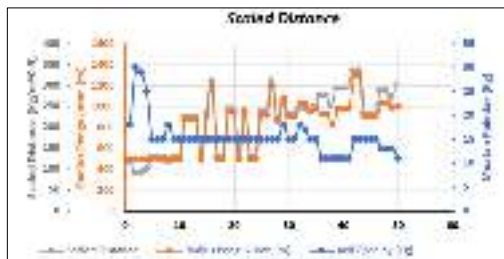
No	Tanggal	ANFO/delay (kg)	Radius Pengukuran (m)	SD
1	17/10/2024	18	500	117,851
2	19/10/2025	30	500	91,287
3	21/10/2024	29	500	92,848
4	22/10/2024	25	500	100,000
5	22/10/2024	15	500	129,099
6	23/10/2024	15	500	129,099
7	24/10/2024	15	500	129,099
8	25/10/2024	18	500	117,851
9	25/10/2024	15	500	129,099
10	20/11/2024	15	498	128,583
11	20/11/2025	15	876	226,182
12	21/11/2024	15	875	225,924

No	Tanggal	ANFO/delay (kg)	Radius Pengukuran (m)	SD
13	21/11/2024	15	875	225,924
14	22/11/2024	15	487	125,743
15	22/11/2025	15	907	234,186
16	24/11/2024	15	1200	309,839
17	3/12/2024	15	500	129,099
18	3/12/2024	15	500	129,099
19	3/12/2024	15	952	245,805
20	3/12/2024	15	952	245,805
21	4/12/2024	15	500	129,099
22	4/12/2024	15	943	243,482
23	5/12/2024	15	500	129,099
24	5/12/2024	15	500	129,099
25	5/12/2024	15	919	237,285
26	5/12/2024	15	919	237,285
27	6/12/2024	15	1200	309,839
28	6/12/2024	15	858	221,535
29	7/12/2024	18	1080	254,558
30	7/12/2024	15	901	232,637
31	7/12/2024	15	901	232,637
32	8/12/2024	18	1029	242,538
33	9/12/2024	17	1024	248,356
34	12/12/2024	15	949	245,031
35	13/12/2024	15	973	251,228
36	14/12/2024	11	922	277,993
37	14/12/2024	11	922	277,993
38	15/12/2024	11	827	249,350
39	18/12/2024	11	976	294,275
40	18/12/2024	11	976	294,275
41	19/12/2024	11	981	295,783
42	22/12/2024	15	1300	335,659
43	22/12/2024	15	1300	335,659
44	24/12/2024	15	900	232,379
45	24/12/2024	15	900	232,379
46	24/12/2024	15	900	232,379
47	27/01/2025	13	1038	287,889
48	27/01/2025	13	1038	287,889
49	28/01/2025	13	985	273,190
50	30/01/2025	11	1000	301,511

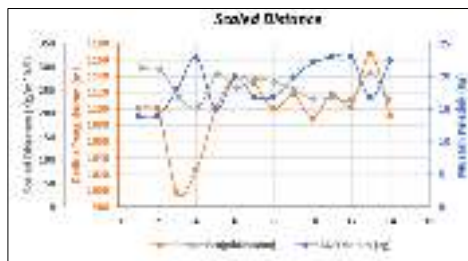
Selain data primer, akan dicari pula nilai *scaled distance* untuk data sekunder. Tabel 6 menunjukkan hasil perhitungan SD pada data primer. Jika digambarkan secara grafis, dapat dilihat melalui gambar 5. Dari gambar 5 dapat dilihat bahwa semakin besar radius pengukuran atau jarak dari area peledakan, semakin besar pula nilai *scaled distance* yang didapatkan.

Tabel 7. Perhitungan *Scaled Distance* Data Primer

No	Tanggal	ANFO/delay (kg)	Radius Pengukuran (m)	SD
1	1/2/2025	13,8	1100	296,110
2	2/2/2025	13,9	1100	294,607
3	4/2/2025	18,0	997	235,307
4	5/2/2025	22,9	1025	214,349
5	5/2/2025	14,9	1100	284,811
6	6/2/2025	19,9	1140	255,585
7	6/2/2025	16,9	1130	274,918
8	7/2/2025	16,9	1100	267,203
9	10/2/2025	19,8	1118	251,103
10	13/02/2025	22,1	1089	231,883
11	14/02/2025	23,0	1118	233,340
12	16/02/2025	23	1103	229,991
13	18/02/2025	16,7	1168	285,922
14	25/02/2025	22,4	1091	230,595



(a)



(b)

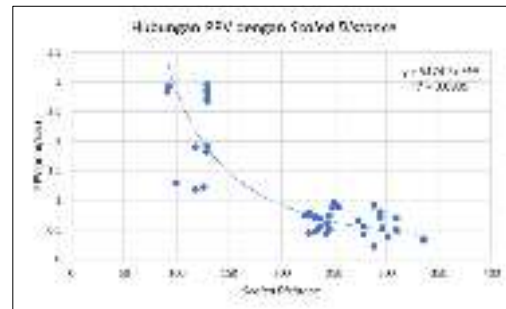
Gambar 5. Grafik *Scaled Distance*: (a) Untuk Data Sekunder dan (b) Untuk Data Primer

4.1.3 Persamaan Duvall dan Fogleson (USBM)

Setelah menentukan nilai *scaled distance* data sekunder, dapat ditentukan nilai konstanta dengan menggunakan grafik non-linear dengan *trendline power*. Gambar 6 menunjukkan grafik non linear hubungan antara PPV dengan SD.

Dari gambar 6 dapat diketahui hubungan serta konstanta persamaan empiris. Nilai korelasi dapat dilihat pada nilai R^2 yang bernilai 0,6909 atau 69,09%. Untuk nilai konstanta didapatkan nilai k sebesar 5474,3 dan nilai n sebesar -1,641. Dengan menggunakan persamaan USBM pada tabel 1, dapat ditentukan dengan rumus PPV:

$$PPV = 5474,3 \times [SD]^{-1,641} \quad (3)$$

**Gambar 6.** Hubungan PPV dengan SD

4.1.4 Usulan isian bahan peledak

Untuk menghitung rekomendasi isian bahan peledak, harus dihitung terlebih dahulu nilai *scaled distance* terlebih dahulu. Perhitungan besarnya nilai *scaled distance* menggunakan persamaan 3.

$$PPV = 5474,3 \times [SD]^{-1,641}$$

$$1 = 5474,3 \times [SD]^{-1,641}$$

$$SD = 189,699$$

Dengan menggunakan *scaled distance* sebesar 189,699, maka dapat dihitung pula jumlah isian bahan peledak yang dapat digunakan pada setiap waktu tundanya. Hasil perhitungan usulan isian bahan peledak dapat dilihat pada Tabel 7.

Untuk penggunaan maksimal bahan peledak/delay dapat digunakan seberat 6,947 kg dengan radius aman 500 m. Selain itu, untuk radius sejauh 1300 m dapat digunakan isian bahan peledak seberat 46,963 kg.

Tabel 8. Usulan Isian Bahan Peledak

Radius (m)	SD	PPV (mm/detik)	Isian Bahan Peledak (kg)
500	189,699	1	6,947
550	189,699	1	8,406
600	189,699	1	10,004
650	189,699	1	11,741
700	189,699	1	13,617
750	189,699	1	15,631
800	189,699	1	17,785
850	189,699	1	20,077
900	189,699	1	22,509
950	189,699	1	25,079
1000	189,699	1	27,789
1050	189,699	1	30,637
1100	189,699	1	33,624
1150	189,699	1	36,751
1200	189,699	1	40,016
1250	189,699	1	43,420
1300	189,699	1	46,963

4.2 Hasil Penelitian

4.2.1 Hubungan PPV dengan SD

Berdasarkan hasil penelitian dan pengolahan yang telah dilakukan peneliti, dapat diketahui hubungan PPV dengan *scaled distance* berdasarkan data peledakan mulai dari bulan Oktober 2024 hingga Januari 2025 sangat kuat dengan nilai koefisien determinansi (R^2) sebesar 0,6909 atau sebesar 69,09% (lih. Gambar 7). Nilai ini menjelaskan bahwa *scale distance* dapat menjelaskan PPV sebesar 69,09% dan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain.

4.2.2 Usulan Isian Bahan Peledak

Usulan isian bahan peledak menggunakan model persamaan empiris karena memiliki struktur stabil terhadap variansi data yang menjelaskan tren umum dengan baik walaupun memiliki kelemahan dalam menanggapi detail non-linear. Dengan menggunakan nilai konstanta "k" sebesar 5474 dan konstanta "n" sebesar -1,641 mendapatkan besar nilai *scaled distance* (SD) untuk mendapatkan PPV maksimal sebesar 1 mm/detik adalah 189,699. Dengan nilai SD tersebut, dapat dihitung penggunaan bahan peledak maksimalnya yang dapat dilihat pada tabel 7.

Melalui perhitungan, didapatkan usulan isian bahan peledak maksimal yang dapat digunakan per waktu tundanya. Isian bahan peledak maksimum yang dapat digunakan pada radius 500 m adalah 6,947 kg, pada radius 850 m dengan isian bahan peledak maksimal sebesar 20,007 kg, hingga radius 1300 m dapat digunakan isian bahan peledak maksimal sebesar 46,693 kg. Ini menunjukkan bahwa untuk radius yang lebih besar, dapat digunakan lebih banyak bahan peledak untuk mencapai efek yang diinginkan.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, peneliti dapat mengambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Hubungan *peak particle velocity* (PPV) dengan jarak serta isian bahan peledak per waktu tundanya memiliki hubungan yang kuat, seperti pada metode empiris memiliki koefisien determinansi (R^2) sebesar 69,09% yang melihat hubungan antara PPV dengan *scale distance* dengan nilai konstanta "k" sebesar 5473,3 dan konstanta "n" sebesar -1,641.
2. Dengan menggunakan persamaan empiris, dapat dilakukan penambahan peledak mencapai 20,007 kg dengan radius minimal 850 m dan bahan peledak mencapai 46,693 kg dengan radius minimal 1300 m yang diharapkan mencapai nilai PPV sama dengan 1 mm/detik.

5.2 Saran

Dari keseluruhan rangkaian penelitian yang telah dilakukan, adapun saran yang dapat diberikan kedepannya adalah:

1. Dengan nilai koefisien determinansi yang tinggi (69,09%), persamaan empiris dapat digunakan dalam menentukan jumlah bahan peledak kedepannya.
2. Gunakan data yang lebih banyak dengan kualitas bagus (baik primer ataupun sekunder) untuk mendapatkan hasil yang terbaik.
3. Untuk penelitian selanjutnya, dapat menggunakan rumus empiris lain yang ada guna perbandingan metode yang paling efektif dalam melakukan prediksi getaran tanah.

Referensi

- [1] U. Ozer, A. Karadogan, A. Kahrman, dan M. Aksoy, Geosci, *Bench blasting design based on site-specific attenuation formula in a quarry*, Arab. J., **6**, 3, **711–721**, (2013)
- [2] H. Prayogo, *Prediksi Getaran Tanah Akibat Dari Kegiatan Peledakan Pada Pertambangan PT Kaltim Jaya Bara di Kabupaten Berau, Kalimantan Timur*, (2020)
- [3] A. I. Lawal dan M. A. Idris, *An artificial neural network-based mathematical model for the prediction of blast-induced ground vibrations*, Int. J. Environ. Stud., **77**, 2, **318–334**, (2020)
- [4] M. Hajihassani, D. Jahed Armaghani, M. Monjezi, E. T. Mohamad, dan A. Marto, Earth Sci., *Blast-induced air and ground vibration prediction: a particle swarm optimization-based artificial neural network approach*, Environ., **74**, 4, **2799–2817**, (2015)
- [5] Dowding CH, *Blast Vibration Monitoring and Control*. Prentice- Hall, Englewoods Cliffs, **288–290**, (1985)
- [6] Siskind DE, Stachura VJ, Stagg MS, Koop JW, *Structure Response and Damage Produced by Airblast from Surface Mining*. Report of investigations 8485, United States Bureau of Mines, Washington, DC, (1980)
- [7] Koesnaryo, S., Teknik Pertambangan Fakultas Teknologi Mineral Universitas Pembangunan Nasional "Veteran", *Rancangan peledakan batuan (design of rock blasting)*, Yogyakarta, (2021)
- [8] Winadi, D. S., Satuan Kerja Penunjang Tambang, *Implementasi Artificial Neural Network (ANN) Untuk Memprediksi Tingkat Getaran Tanah Akibat Aktivita Peledakan di Pit 1 Banko Barat dan Pit Townsite Basecamp (TSBC) PT Bukit Asam, Tbk*, (2023)
- [9] Y. Yuliana, N. Nurhakim, R. Riswan, F. Ferdinandus, dan K. Kartini, GEOSAPTA, *Evaluasi Getaran Peledakan Overburden*

- Berdasarkan Powder Factor Pada Pt Bina Sarana Sukses*, **3**, 1, (2017)
- [10] M. Monjezi, M. Hasanipanah, dan M. Khandelwal, Appl., *Evaluation and prediction of blast-induced ground vibration at Shur River Dam, Iran, by artificial neural network*, Neural Comput, **22**, 7–8, **1637–1643**, (2013)
- [11] W. Duvall, H. Nicholls, dan C. Johnson, *Blasting vibrations and their effects on structures*, (1971)
- [12] Ambraseys NR, Hendron AJ *Dynamic Behaviour of Rock Masses Rock Mechanics in Engineering*, (1968)
- [13] Davies B, Farmer IW, Attewell PB, The Engineer, *Ground Vibrations from Shallow Sub-Surface Blasts*, **217**, **553–559**, (1964)
- [14] Indian Standards Institute, *Criteria for Safety and Design of Structures Subjected to Underground Blast*, ISI Bull, IS-6922, (1973)
- [15] Roy PP, *Prediction and Control of Ground Vibrations Due To Blasting*, Colliery Gaurdian, 239, (1991)
- [16] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 7571 2023 Baku Tingkat Getaran Pada Kegiatan Tambang Terbuka Terhadap Bangunan*, (2023)
- [17] S. Bhandari, *Engineering rock blasting operations*, Jodhpur, India: A.A. Balkema Publisher, Old Post Road, Brookfield, VT 05306, USA, (1997)
- [18] A. Soltys dan D. Chlebowski, Acta Montan, *Methodology of designing blasting works in open pit mining in terms of their impact on construction objects*, Slovaca, **28**, 2, **344–357**, (2023)
- [19] Surface Blast Design, U.S. Department of the Interior's Office of Surface Mining, (1984)
- [20] D. Syafardan, *Analisis Geometri Peledakan Terhadap Fragmentasi Hasil Material Blasting Pada PT Gunung Bumi Perkasa Di Sukabumi, Jawa Barat*, (2023)