

Kajian Teknis Penerapan *Bottom Air Deck* Terhadap Penurunan Tingkat Getaran Tanah Akibat Peledakan

Andy Yanottama¹, Yulian Assadat¹, Muhammad Faisal Seprizal¹, Dimas Agung Permadi¹,
Zella Navtalia¹, Leta Lestari², Andromeda Nabella³

¹Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Jambi

²Program Studi Teknik Pertambangan, Institut Teknologi Sumatera

³Program Studi Teknik Pertambangan, Universitas Jenderal Soedirman

*Koresponden email: andy.yanottama@unja.ac.id

Diterima: 11 Juli 2026

Disetujui: 20 Juli 2026

Abstract

Explosive energy generated from mining blasting operations is not fully utilized in the rock fragmentation process, a portion of this energy is dissipated as ground vibration. Ground vibration resulting from blasting can adversely impact buildings or residential areas surrounding the mine. Indonesia has implemented regulations outlined in the Indonesian National Standard (SNI) 7571:2010 regarding the quality standards of blasting-induced ground vibration levels on the environment around mining sites. In this regard, this study aims to examine and analyze the application of a bottom air deck in an effort to reduce blasting-induced ground vibration levels. The results of this study indicate that conventional (normal) blasting geometry and blasting geometry incorporating a 1 meter bottom air deck at the base of the blasthole yield different ground vibration values (peak particle velocity/PPV). Blasting operations using a bottom air deck were proven successful in significantly reducing longitudinal PPV values by over 22% across three trials. This also demonstrates that the presence of an empty air gap at the base of the blasthole functions effectively as a dynamic damper capable of mitigating the propagation of horizontal seismic waves toward residential areas.

Keywords: *ground vibration, peak particle velocity/ PPV, bottom air deck*

Abstrak

Energi bahan peledak dari hasil operasi peledakan tambang tidak sepenuhnya terpakai dalam proses pemberaian batuan, sebagian energi tersebut akan terbuang dalam bentuk berupa getaran tanah (*ground vibration*). Getaran tanah hasil peledakan akan berdampak buruk terhadap bangunan atau area pemukiman warga yang berada disekitar tambang. Indonesia telah menerapkan regulasi yang tertuang dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) 7571:2010 terkait acuan baku tingkat getaran tanah akibat peledakan terhadap lingkungan sekitar tambang. Dalam hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan kajian dan analisis terkait penerapan *bottom air deck* dalam upaya menurunkan tingkat getaran tanah akibat peledakan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dengan geometri peledakan konvensional (normal) dan juga geometri peledakan yang menerapkan *bottom air deck* sepanjang 1 meter pada dasar lubang ledak, memberikan hasil nilai getaran tanah (*peak particle velocity/ PPV*) yang berbeda. Operasi peledakan menggunakan *bottom air deck* terbukti berhasil dalam mereduksi nilai PPV longitudinal secara signifikan di atas 22% pada tiga kali uji coba. Hal ini juga membuktikan bahwa keberadaan ruang udara kosong di dasar lubang ledak berfungsi efektif sebagai peredam dinamis yang mampu mengurangi rambatan gelombang seismik horizontal menuju area pemukiman warga.

Kata Kunci: *getaran tanah, peak particle velocity, bottom air deck*

1. Pendahuluan

Operasi peledakan (*blasting*) merupakan salah satu metode yang paling efektif dan ekonomis dalam industri pertambangan untuk memberai batuan keras (*overburden* maupun bijih) guna mendukung kelancaran proses pemuatan (*loading*) dan pengangkutan (*hauling*) [3]. Meskipun memberikan produktivitas yang tinggi, energi yang dihasilkan dari proses peledakan tidak sepenuhnya terpakai untuk menghancurkan batuan. Sebagian energi tersebut terbuang ke lingkungan sekitar dalam bentuk energi sisa, salah satunya berupa getaran tanah (*ground vibration*) [2]. Tingkat getaran tanah akibat peledakan bervariasi tergantung pada rancangan peledakan dan kondisi geologi dari batuan. Untuk itu penerapan metode peledakan harus benar dan sesuai dengan kondisi batuan yang akan diledakkan. Getaran peledakan yang dihasilkan harus berada pada kondisi aman bagi keadaan sekelilingnya [16]. Getaran tanah yang

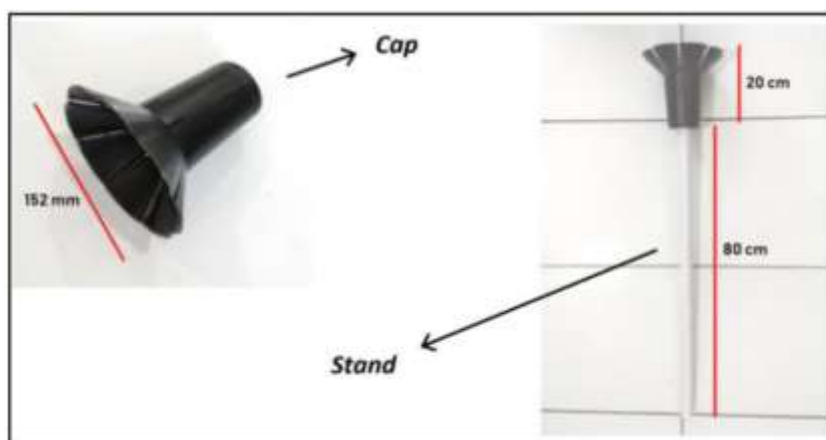
berlebihan tidak hanya berpotensi menimbulkan kerusakan pada struktur bangunan di sekitar area tambang dan mengganggu stabilitas lereng, tetapi juga memicu konflik sosial dengan masyarakat di sekitar wilayah operasional [11]. Oleh karena itu, pengendalian tingkat getaran tanah menjadi salah satu aspek kritical dalam manajemen keselamatan dan lingkungan penambangan.

Teknik peledakan menggunakan rongga udara didalam lubang ledak (*air deck charge*) telah lama diterapkan dalam peledakan tambang terbuka. Namun, pengaruh rongga udara aksial (*axial air deck*) di dalam lubang ledak terhadap getaran tanah akibat peledakan belum banyak diteliti dengan baik. Penempatan rongga udara bagian atas (*top air deck*) memiliki nilai PPV lebih tinggi dari pada penempatan rongga udara bagian bawah (*bottom air deck*) dan tengah (*middle air deck*) ketika rasio rongga udaranya sama [4]. Ruang udara ini berfungsi untuk mereduksi tekanan kejut awal (*shock pressure*) yang ekstrem dan memperpanjang durasi tekanan gas (*gas pressure*), sehingga distribusi energi peledakan menjadi lebih merata ke seluruh dinding lubang ledak [7].

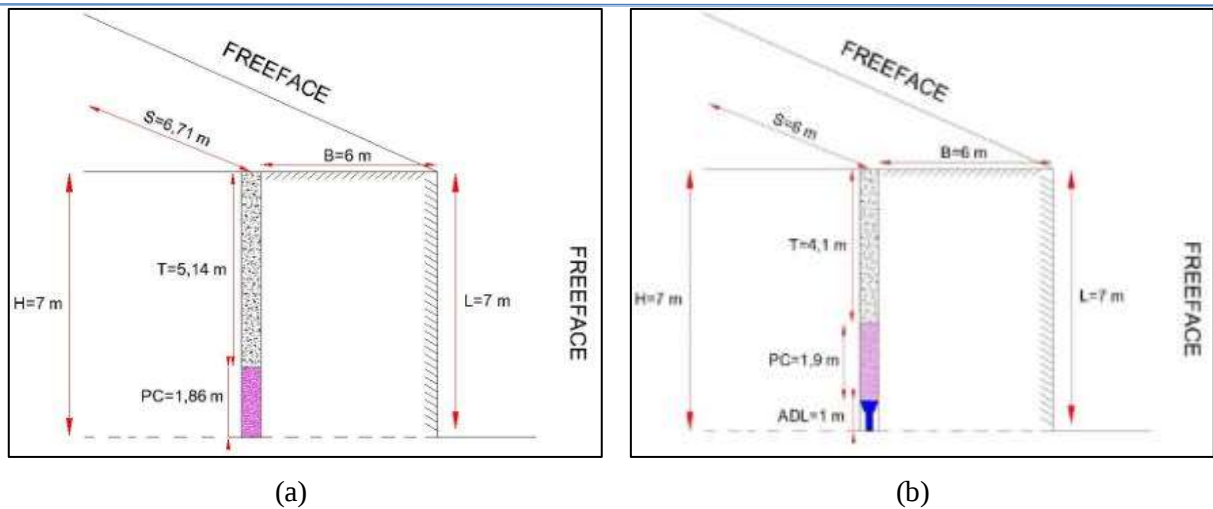
Penggunaan *bottom air deck* di mana ruang udara diletakkan di bagian dasar lubang ledak menawarkan keunggulan spesifik dalam menahan rambatan gelombang kejut ke arah lantai jenjang (*bench floor*). Posisi ruang udara di bagian bawah ini mampu menyerap sebagian energi kejut vertikal yang biasanya menjadi pemicu utama getaran tanah frekuensi rendah yang merambat jauh [9]. Meskipun secara konseptual menjanjikan, efektivitas *bottom air deck* sangat bergantung pada variasi dimensi ruang udara dan karakteristik massa batuan setempat [10]. Dalam rancangan geometri peledakan yang menggunakan penerapan *bottom air deck* harus disesuaikan pada kondisi di lapangan, sehingga dalam penerapannya, *bottom air deck* dapat optimal dalam mengurangi tingkat getaran tanah akibat peledakan [13]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk melakukan kajian teknis mengenai penggunaan *bottom air deck* terhadap tingkat getaran tanah akibat peledakan yang dinilai dari nilai Kecepatan Partikel Puncak (*Peak Particle Velocity/ PPV*) sebagai parameter utama getaran tanah.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan kuantitatif komparatif untuk mengevaluasi efektivitas penerapan *bottom air deck* dalam mereduksi getaran tanah akibat peledakan. Prosedur penelitian dibagi menjadi tiga tahapan analisis utama. Pertama, dilakukan pengukuran tingkat getaran tanah secara aktual di lapangan menggunakan instrumen *Instantel Blastmate III* untuk mendapatkan nilai *Peak Particle Velocity* (PPV) aktual dari geometri peledakan konvensional (normal) [6]. Kedua, dilakukan perhitungan prediksi empiris tingkat getaran menggunakan persamaan skala jarak (*scaled distance*) yang umum berlaku, seperti teori *USBM*, *Langefors-Kihlstrom*, dan *Ambraseys-Hendron*, sebagai kontrol teoritis. Ketiga, pengujian lapangan dilakukan dengan menerapkan variasi geometri peledakan baru yang mengintegrasikan ruang udara di bagian dasar lubang ledak (*bottom air deck*). Data getaran tanah yang diperoleh dari ketiga kondisi tersebut kemudian dikompilasi dan dianalisis secara statistik guna membandingkan signifikansi penurunan tingkat getaran. Adapun bentuk dan dimensi dari *bottom air deck* yang digunakan dapat dilihat pada **Gambar 1** serta perbedaan geometri peledakan konvensional (normal) dan geometri peledakan menggunakan *bottom air deck* dapat dilihat pada **Gambar 2** dibawah ini.



Gambar 1: Bentuk dan Dimensi Air Deck
Sumber: Yanottama, 2025



(a) (b)
Gambar 2: (a) Geometri Peledakan Konvensional (Normal)
(b) Geometri Peledakan *Bottom Air Deck*
Sumber: Yanottama, 2025

Sebagai pembandingan pada penelitian ini juga dilakukan prediksi nilai getaran PPV empiris dengan menggunakan persamaan dari *USBM*, *Langefors-Kihlstrom*, dan *Ambraseys-Hendron* seperti dibawah ini:

- Prediksi nilai PPV dapat dilakukan secara empiris dari *USBM*, *Duval & Fogelson*, (1962) berdasarkan persamaan berikut [14]:

$$PPV = k \left(\frac{R}{Q^{1/2}} \right)^{-b}$$

- Prediksi nilai PPV dapat dilakukan secara empiris dari *Langefors & Kihlstrom*, (1963) berdasarkan persamaan diberikan [12]:

$$PPV = k \left(\sqrt{\frac{Q}{R^{2/3}}} \right)^b$$

- Prediksi nilai PPV dapat dilakukan secara empiris dari *Ambraseys & Hendron*, (1968) berdasarkan persamaan berikut [8]:

$$PPV = k \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-b}$$

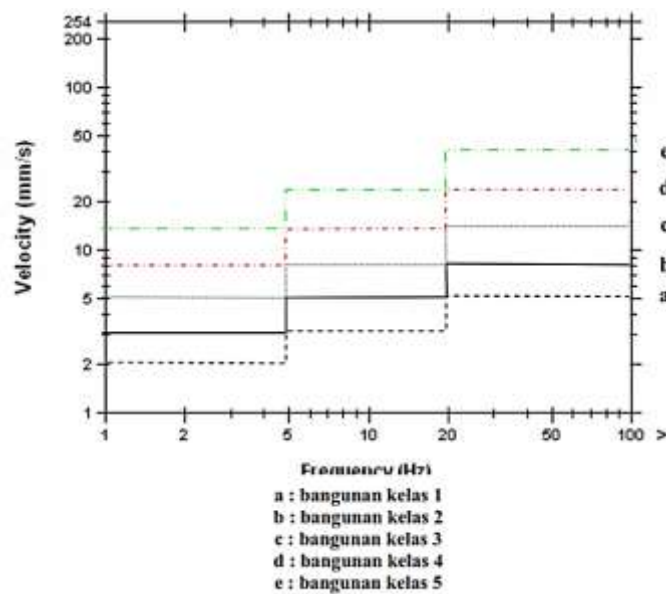
dimana PPV adalah kecepatan partikel puncak (*peak particle velocity*) dengan satuan mm/s, R adalah jarak dari titik area peledakan ke titik area pengukuran getaran (m), Q adalah muatan maksimum bahan peledak per waktu tunda (kg), k dan b adalah nilai konstanta yang bergantung pada lokasi dan kondisi area peledakan.

Getaran tanah didefinisikan sebagai perambatan gelombang di dalam lapisan tanah yang dipicu oleh sumber energi tertentu, baik yang bersumber dari alam berupa gempa bumi maupun dari aktivitas seperti peledakan. Getaran tanah dari aktivitas peledakan terjadi pada daerah elastis (*elastic zone*), dimana tegangan yang di terima material lebih kecil dari kekuatan material sehingga hanya menyebabkan perubahan bentuk dan volume [5]. Baku mutu tingkat getaran adalah parameter kekuatan getaran yang diperbolehkan agar operasional peledakan tetap berada dalam batas aman dan tidak menimbulkan kerusakan. Terkait hal tersebut, Indonesia telah menerapkan regulasi nasional yang tertuang dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) 7571:2010 sebagai acuan baku tingkat getaran tanah yang aman bagi lingkungan sekitar [1].

Tabel 1. Baku Mutu Tingkat Getaran Peledakan pada Tambang Terbuka Terhadap Bangunan

Kelas	Jenis Bangunan	Peak Vector Sum (mm/detik)
1	Bangunan kuno yang dilindungi undang-undang benda cagar budaya (Undang-undang No. 6 tahun 1992).	2
2	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan adukan semen saja, termasuk bangunan dengan pondasi dari kayu dan lantainya diberi adukan semen.	3
3	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan adukan semen diikat dengan slope beton.	5
4	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan adukan semen slope beton, kolom dan rangka diikat dengan ring balk.	7 – 20
5	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan adukan semen, slope beton, kolom dan diikat dengan rangka baja.	12 – 40

Sumber: Standar Nasional Indonesia (SNI) 7571:2010



Gambar 3: Grafik Baku Tingkat Getaran Peledakan pada Tambang Terbuka terhadap Bangunan

Sumber: Standar Nasional Indonesia (SNI) 7571:2010

Tabel 2. Standar Nilai Frekuensi dan PPV

Kelas	Frekuensi (Hz)	PPV (mm/s)
1	0 – 5	2
	5 – 20	3
	20 – 100	5
2	0 – 5	3
	5 – 20	5
	20 – 100	7
3	0 – 5	5
	5 – 20	7
	20 – 100	12
4	0 – 5	7
	5 – 20	12
	20 – 100	20
5	0 – 5	12
	5 – 20	24
	20 – 100	40

Sumber: Standar Nasional Indonesia (SNI) 7571:2010

Penelitian ini dilakukan pada salah satu tambang terbuka batubara di daerah Sumatera Selatan, dimana pengukuran getaran tanah akibat peledakan diambil pada area pemukiman warga yang berdekatan dengan area tambang dengan jarak 1.400 – 1.500 meter dari lokasi peledakan.

3. Hasil dan Pembahasan

Kajian teknis pada penelitian ini dalam penerapan *bottom air deck* tersebut secara spesifik bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana efektivitas dan tingkat keberhasilannya dalam mereduksi nilai getaran tanah (*ground vibration*) yang dihasilkan oleh aktivitas peledakan. Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian ini mengintegrasikan pendekatan komparatif yang membandingkan secara komprehensif hasil pengukuran aktual getaran tanah di lapangan dengan hasil perhitungan prediksi menggunakan beberapa persamaan empiris standar. Melalui korelasi dan analisis perbandingan antara data aktual di lapangan, prediksi teoritis empiris, serta performa hasil modifikasi geometri peledakan berbasis *bottom air deck* ini, diharapkan dapat diperoleh formulasi prediktif yang akurat sekaligus rekomendasi teknis yang optimal dalam meminimalkan dampak getaran bagi lingkungan sekitar tambang.

Hasil Pengukuran Aktual Getaran Peledakan pada Geometri Peledakan Konvensional (Normal)

Pengukuran getaran peledakan dilakukan pada 10 Event Peledakan pada geometri konvensional (normal) yang mana titik pengukuran diambil pada lokasi area pemukiman warga tepatnya di RT 05 yang berdekatan dengan area penambangan dengan jarak yang bervariasi antara rentang 1.400 m – 1.500 meter. Pengukuran getaran peledakan dilakukan dengan menggunakan alat *InstanTel Blastmate III* yang nantinya akan membaca tiga jenis gelombang getaran yaitu, gelombang transversal, vertikal dan longitudinal. Penjumlahan vektor dari ketiga gelombang tersebut merupakan atau disebut dengan *peak vector sum* (PVS). Hasil pengukuran getaran peledakan aktual pada geometri konvensional (normal) dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 3. Hasil Pengukuran Getaran pada Geometri Peledakan Konvensional (Normal)

Even Peledakan	Lokasi Pengukuran Getaran	Muatan Maks/ Waktu Tunda Q (kg)	Jarak Pengukuran R (m)	PPV Aktual (mm/s)			PVS (mm/s)
				Trans	Vert	Long	
Event ke-1	Pemukiman Warga (RT 05)	53,1	1.465	0,89	0,64	0,64	0,92
Event ke-2		53,1	1.454	0,76	0,51	0,89	0,93
Event ke-3		53,1	1.454	0,51	0,38	1,02	1,05
Event ke-4		53,1	1.473	0,51	0,38	0,76	0,86
Event ke-5		53,1	1.486	0,51	0,25	0,76	0,81
Event ke-6		53,1	1.445	1,02	0,51	0,76	1,05
Event ke-7		53,1	1.420	0,89	0,51	1,14	1,20
Event ke-8		53,1	1.430	0,76	0,51	1,14	1,16
Event ke-9		47,7	1.491	0,38	0,25	0,76	0,78
Event ke-10		47,7	1.502	0,38	0,25	0,64	0,66
Nilai Min				0,38	0,25	0,64	0,66
Nilai Max				1,02	0,64	1,14	1,20

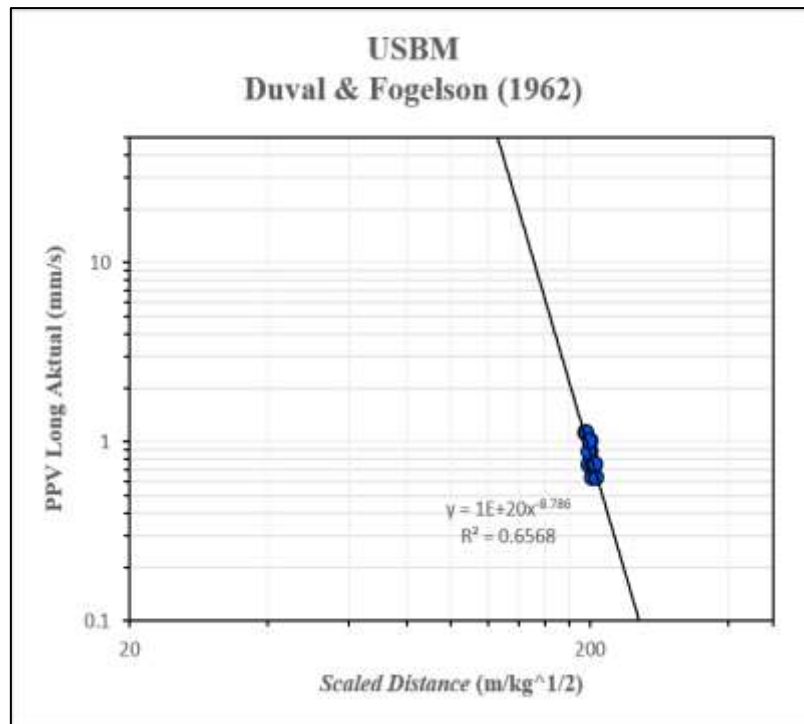
Prediksi Empiris Nilai Getaran PPV pada Arah Longitudinal

Berdasarkan hasil pengukuran getaran peledakan secara aktual, kemudian dilakukan perhitungan secara empiris menggunakan persamaan dari *USBM*, *Langefors-Kihlstrom*, dan *Ambraseys-Hendron*, sehingga kemudian dari data pengukuran tersebut akan dilakukan analisis secara statistik untuk mendapatkan nilai pada parameter k dan b dari masing-masing persamaan empiris tersebut. Nilai getaran peledakan yang akan digunakan pada analisis penelitian ini adalah nilai PPV pada arah longitudinal, hal yang mendasarinya adalah pada kondisi aktual, arah rambat gelombang dari area peledakan mengarah langsung secara horizontal pada arah longitudinal menuju lokasi titik pemantau di area pemukiman warga di RT 05. Gelombang longitudinal bergerak dengan cara mendorong dan menarik partikel tanah (*compression & dilation*) searah dengan arah rambat gelombang dari titik peledakan lurus menuju pemukiman warga. Sehingga gelombang pada arah longitudinal merupakan gelombang pertama yang tiba di struktur bangunan dengan kecepatan rambat tertinggi, gelombang ini membawa energi kejut awal yang sangat kuat menghantam fondasi bangunan.

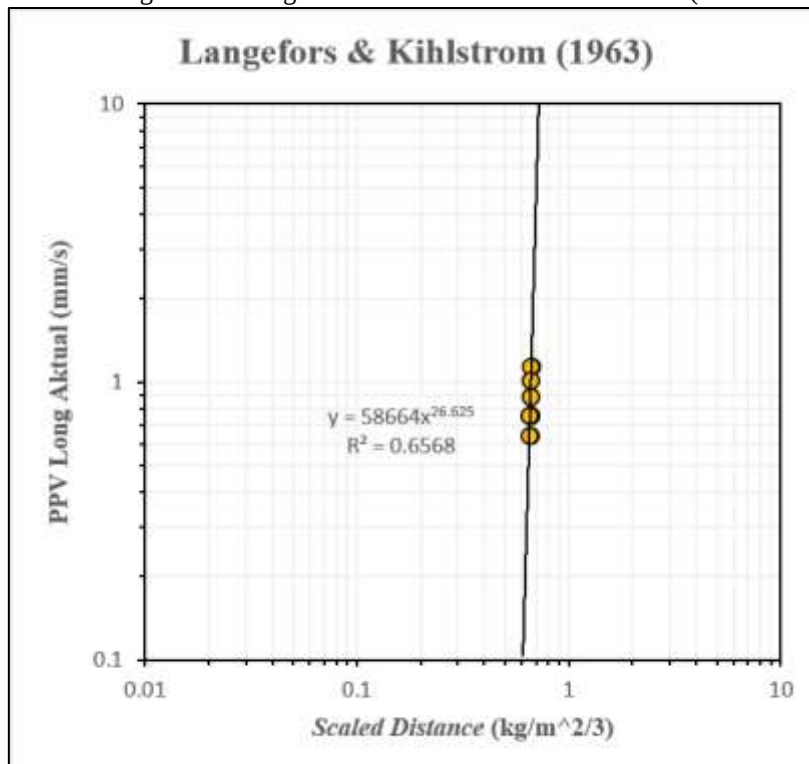
Dalam analisis getaran peledakan (*ground vibration*), prediksi empiris merupakan tahapan krusial untuk mengontrol agar dampak vibrasi tidak merusak pemukiman warga. Metode standar yang paling universal digunakan adalah pendekatan *Scaled Distance* (SD). Metode ini digunakan untuk mencari nilai konstanta site spesifik (k dan b) yang menggambarkan karakteristik batuan di lokasi penelitian. Metode *Scaled Distance* dilakukan untuk tiga prediksi empiris sesuai dengan rumus persamaan diatas. Adapun nilai konstanta (k dan b) yang didapatkan dari grafik hubungan antara PPV Longitudinal Aktual terhadap *Scaled*

Distance berdasarkan masing-masing prediksi empiri yaitu dapat di lihat pada **Gambar 4**, **Gambar 5**, dan **Gambar 6**.

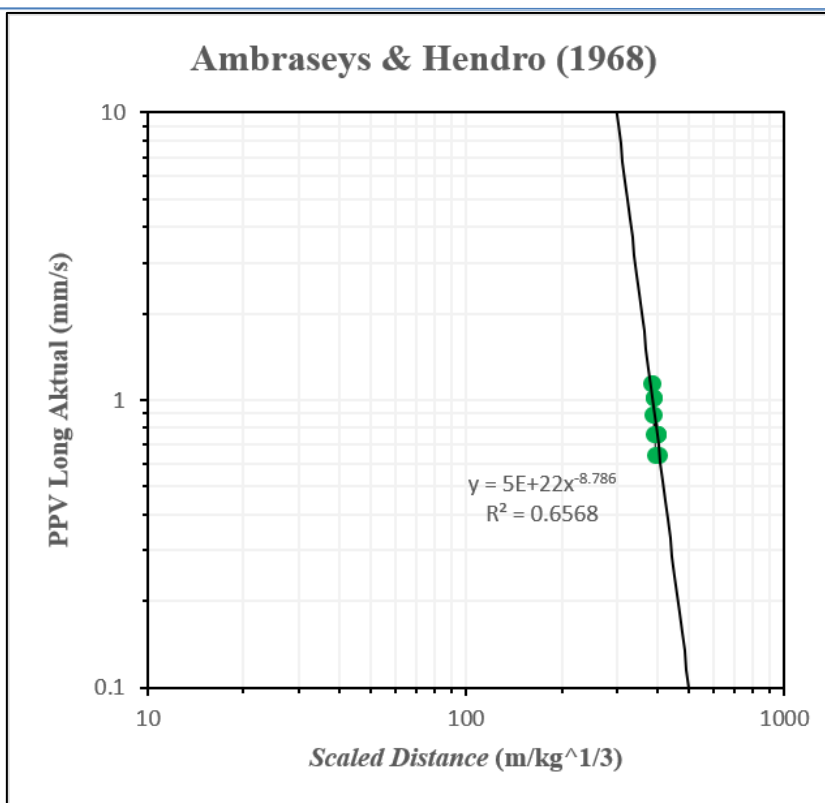
- USBM, Duval & Fogelson, (1962)
 $PPV = (1 \times 10^{20}) \cdot (SD)^{-8,786}$
- Langefors & Kihlstrom, (1963)
 $PPV = (58,664) \cdot (SD)^{-26,625}$
- Ambraseys & Hendron, (1968)
 $PPV = (5 \times 10^{22}) \cdot (SD)^{-8,786}$



Gambar 4: Grafik Hubungan PPV Long Aktual dan Scaled Distance USBM (Duval & Fogelson, 1962)



Gambar 5: Grafik Hubungan PPV Long Aktual dan Scaled Distance (Langefors & Kihlstrom, 1963)



Gambar 6: Grafik Hubungan PPV Long Aktual dan *Scaled Distance* (Ambraseys & Hendron, 1968)

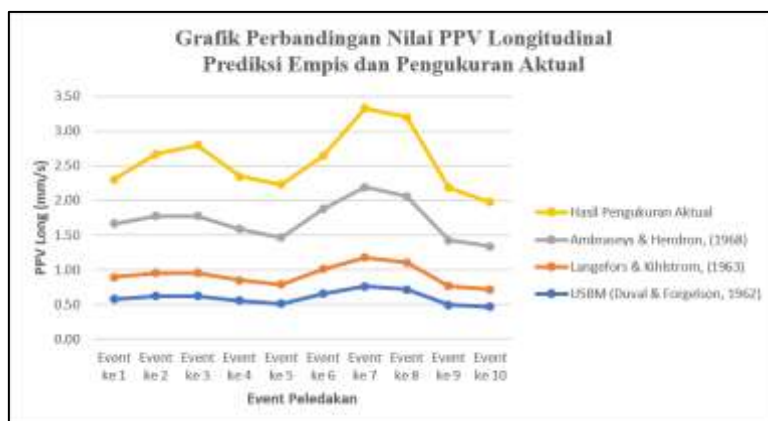
Berdasarkan ketiga persamaan empiris yang didapat diatas dari hasil plot hubungan nilai PPV terhadap *scaled distance*, maka kemudian didapatkan hasil prediksi nilai getaran peledakan PPV pada arah longitudinal berdasarkan tiga persamaan empiris diatas dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 4. Hasil Prediksi Getaran Peledakan Berdasarkan Nilai PPV Longitudinal

Even Peledakan	Lokasi Pengukuran Getaran	PPV Longitudinal Prediksi Empiris (mm/s)			PPV Longitudinal Pengukuran Aktual (mm/s)
		USBM (Duval & Forgelson, 1962)	Langefors & Kihlstrom (1963)	Ambraseys & Hendron (1968)	
Event ke-1	Pemukiman Warga (RT 05)	0,58	0,31	0,77	0,64
Event ke-2		0,62	0,34	0,82	0,89
Event ke-3		0,62	0,34	0,82	1,02
Event ke-4		0,55	0,30	0,73	0,76
Event ke-5		0,51	0,28	0,68	0,76
Event ke-6		0,65	0,35	0,87	0,76
Event ke-7		0,76	0,41	1,01	1,14
Event ke-8		0,72	0,39	0,95	1,14
Event ke-9		0,50	0,27	0,66	0,76
Event ke-10		0,47	0,25	0,62	0,64
Nilai Min		0,47	0,25	0,62	0,64
Nilai Max		0,76	0,41	1,01	1,14

Secara keseluruhan, data menunjukkan adanya variasi nilai getaran tanah yang bervariasi pada setiap *event* peledakan. Nilai PPV Longitudinal aktual hasil pengukuran berkisar antara 0,64 mm/s hingga 1,14 mm/s, dengan nilai rata-rata yang cenderung berada di atas prediksi teoretis sebagian besar metode empiris. Metode USBM menghasilkan prediksi nilai PPV Longitudinal dengan rentang 0,47 mm/s hingga 0,76 mm/s. Jika dikomparasikan dengan data aktual, sebagian besar nilai riil di lapangan berada di atas estimasi prediksi USBM. Hal ini mengindikasikan bahwa konstanta standar USBM memiliki kecenderungan *under-estimate* (memprediksi lebih rendah) jika langsung diterapkan pada karakteristik massa batuan di lokasi penelitian ini tanpa penyesuaian (*site-specific constants*). Metode Langefors & Kihlstrom menunjukkan deviasi atau selisih yang paling besar dibandingkan dengan data aktual lapangan. Nilai prediksi yang dihasilkan sangat rendah, yakni berada pada rentang 0,25 mm/s hingga 0,41 mm/s. Rendahnya nilai prediksi

ini disebabkan oleh asumsi konstanta pelemahan batuan pada rumus Langefors & Kihlstrom yang kemungkinan berbasis pada karakteristik batuan yang sangat masif atau memiliki tingkat peredaman yang tinggi, sehingga kurang representatif untuk menggambarkan kondisi aktual.



Gambar 7: Grafik Perbandingan Nilai PPV Longitudinal Prediksi Empiris dan Pengukuran Aktual

Di antara ketiga metode empiris yang diuji, metode Ambraseys & Hendron memberikan pendekatan nilai yang paling mendekati nilai aktual lapangan, dengan rentang prediksi sebesar 0,62 mm/s hingga 1,01 mm/s. Pada beberapa *event* (seperti *Event* ke-1 dan *Event* ke-6), nilai prediksi Ambraseys & Hendron (0,77 mm/s dan 0,87 mm/s) sangat mendekati atau bahkan sedikit berada di atas nilai aktualnya (0,64 mm/s dan 0,76 mm/s). Hal ini menunjukkan bahwa rumusan Ambraseys & Hendron yang menggunakan pembagi akar pangkat tiga dari muatan bahan peledak memberikan akurasi estimasi yang lebih baik untuk kondisi geometri peledakan dan karakteristik batuan di site ini dibandingkan metode berbasis akar pangkat dua.

Berdasarkan klasifikasi bangunan yang tertuang dalam SNI 7571:2010, struktur pemukiman warga yang ada di RT 05 umumnya dikategorikan ke dalam Kelas 2 (Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan adukan semen saja, termasuk bangunan dengan pondasi dari kayu dan lantainya diberi adukan semen). Untuk bangunan Kelas 2 pada rentang frekuensi getaran rendah hingga sedang, batasan nilai PPV maksimum yang diizinkan agar dikategorikan aman adalah sebesar 2,0 mm/s hingga 3,0 mm/s. Berdasarkan data pengukuran dari 10 *event* peledakan, nilai PPV Longitudinal terendah tercatat sebesar 0,64 mm/s (*Event* ke-1 dan ke-10) dan nilai tertinggi mencapai 1,14 mm/s (*Event* ke-7 dan ke-8). Seluruh nilai riil ini berada di bawah ambang batas aman 2,0 mm/s yang disyaratkan oleh SNI 7571:2010 untuk pemukiman warga.

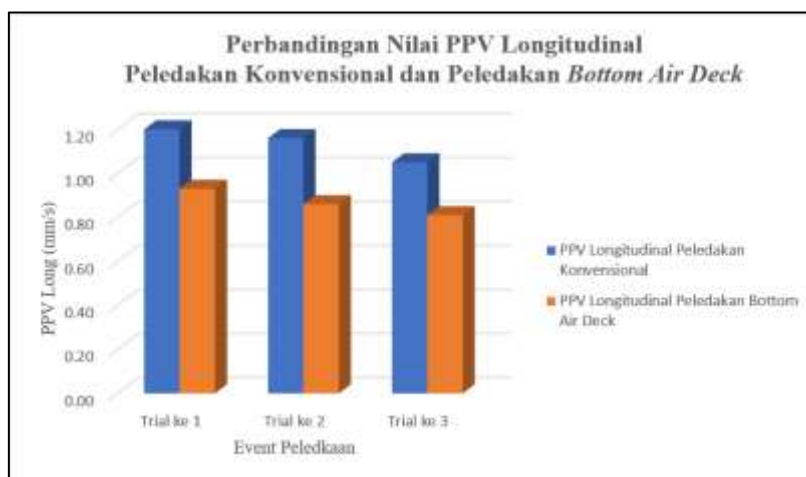
Penerapan Bottom Air Deck sebagai Upaya Penurunan Nilai Getaran Peledakan

Berdasarkan analisis pada **Tabel 3** diatas, seluruh nilai *Peak Particle Velocity* (PPV) Longitudinal aktual maupun prediksi dari geometri peledakan konvensional masih dapat dinyatakan aman. Nilai-nilai tersebut masih berada dibawah baku mutu nilai 2,0 mm/s yang ditetapkan oleh SNI 7571:2010 untuk bangunan Kelas 2. Walaupun operasional peledakan konvensional saat ini berada dalam koridor aman, upaya mereduksi getaran tanah menggunakan metode *bottom air deck* tetap krusial untuk diaplikasikan karena didasari oleh pertimbangan teknis dan manajerial jangka panjang seperti mitigasi risiko akibat fluktuasi dan ketidakpastian prediksi empiris, antisipasi penyusutan jarak aman (*kemajuan penambangan*) di kemudian hari, dan pencegahan efek akumulasi getaran pada bangunan di pemukiman warga. Ketiga hal ini yang mendasari perlunya dilakukan trial penerapan atau penggunaan *bottom air deck* pada operasional peledakan untuk mengurangi atau menurunkan nilai getaran peledakan.

Berdasarkan data pada **Tabel 4** dan grafik pada **Gambar 4**, dapat dilihat bahwa implementasi metode *bottom air deck* secara konsisten berhasil mereduksi nilai getaran tanah (*Peak Particle Velocity* / PPV) arah longitudinal pada ketiga *event* uji coba (*trial*) yang dilakukan. Pada parameter muatan maksimum per *delay* yang konstan sebesar 53,1 kg dan rentang jarak pengukuran yang relatif sama antara 1.434 hingga 1.460 meter, penurunan vibrasi terlihat sangat signifikan. Secara rinci, pada Trial ke-1, nilai PPV longitudinal berkurang dari 1,20 mm/s menjadi 0,93 mm/s (turun 22,5%), pada Trial ke-2 dari 1,16 mm/s menjadi 0,86 mm/s (turun 25,8%), dan pada Trial ke-3 dari 1,05 mm/s hingga menyentuh angka terendah 0,81 mm/s (turun 22,8%).

Tabel 5. Hasil Pengukuran Getaran pada Geometri Peledakan menggunakan *Bottom Air Deck*

Even Peledakan	Lokasi Pengukuran Getaran	Muatan Maks/ Waktu Tunda Q (kg)	Jarak Pengukuran R (m)	PPV Longitudinal Peledakan Konvensional (mm/s)	PPV Longitudinal Peledakan <i>Bottom Air Deck</i> (mm/s)
Trial ke-1	Pemukiman	53,1	1.434	1,20	0,93
Trial ke-2	Warga	53,1	1.460	1,16	0,86
Trial ke-3	(RT 05)	53,1	1.452	1,05	0,81



Gambar 8: Perbandingan PPV Longitudinal Peledakan Konvensional dan Peledakan *Bottom Air Deck*

Konsistensi penurunan nilai getaran yang berada di atas angka 22% pada seluruh *trial* ini menjadi bukti empiris yang kuat atas keberhasilan uji coba dalam penerapan *bottom air deck* di lapangan. Keberhasilan rekayasa ini secara teknis berkaitan langsung dengan eksistensi ruang udara kosong di dasar lubang ledak yang berfungsi sebagai peredam dinamis. Energi dari bahan peledak sebagian besar terpakai sebagai energi untuk proses pembongkaran/ pemberaian batuan, serta hanya sedikit energi yang terbuang sebagai getaran tanah yang merambat melalui media batuan dalam bentuk gelombang seismik horizontal (PPV longitudinal) menuju area pemukiman warga di RT 05.

4. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan meskipun tingkat getaran tanah (*Peak Particle Velocity/ PPV*) aktual dari peledakan konvensional terhadap area pemukiman warga (RT 05) dikategorikan aman karena berada di bawah ambang batas SNI 7571:2010 (2,0 mm/s), penerapan teknologi *bottom air deck* terbukti sangat efektif sebagai langkah mitigasi dan penurunan tingkat getaran pada operasional peledakan jangka panjang. Implementasi uji coba (*trial*) metode *bottom air deck* dengan muatan bahan peledak maksimum per *delay* konstan sebesar 53.1 kg pada jarak 1.434 meter hingga 1.460 meter secara konsisten berhasil mereduksi nilai PPV longitudinal getaran tanah secara signifikan di atas 22% pada seluruh titik uji coba. Keberhasilan teknis ini membuktikan bahwa keberadaan ruang udara kosong di dasar lubang ledak berfungsi efektif sebagai peredam dinamis yang mampu mengurangi rambatan gelombang seismik horizontal menuju area pemukiman warga, sekaligus menjadi solusi manajerial untuk mengantisipasi risiko penyusutan jarak aman akibat kemajuan penambangan di kemudian hari.

5. Saran

Penerapan metode *bottom air deck* pada operasi peledakan tersebut sebaiknya diterapkan secara berkala dan permanen, terutama pada blok peledakan yang memiliki arah kemajuan tambang yang semakin mendekati area pemukiman warga RT 05. Selain itu perlu melakukan standarisasi terhadap dimensi ruang udara (*air deck*) dan geometri peledakan berbasis peredam untuk menjaga konsistensi penurunan getaran. Selain itu, disarankan pula untuk melakukan penelitian lanjutan dengan memvariasikan panjang *air deck*, posisi penempatan *air deck* pada lubang ledak, serta menguji dampaknya terhadap fragmentasi batuan hasil peledakan, guna memastikan bahwa penurunan getaran tanah tidak mengurangi produktivitas alat muat dan alat angkut di lapangan.

6. Referensi

- [1] Badan Standarisasi Nasional, *Baku Tingkat Getaran Tanah Akibat Kegiatan Peledakan pada Tambang Terbuka terhadap Bangunan*. SNI 7571, 2010.
- [2] C. H. Dowding, *Construction Vibrations*. Prentice Hall, 2000.
- [3] C. L. Jimeno, E. L. Jimeno, & F. J. A. Carcedo, *Drilling and Blasting of Rocks*. New York: Routledge dan CRC Press, 1995.
- [4] C. Ruishan, Z. Zhou, C. Wensu, & h. Hong, "Effect of Axial Air Deck on Blast-Induced Ground Vibration". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 55, pp. 1037-1053, 2022. doi: 10.1007/s00603-021-02676-9.
- [5] H. D. H. Indra, Irvani, & O. Haslen, "Analisis Pengaruh Pola Peledakan Terhadap Tingkat Getaran Tanah dan Bangunan Disekitar Tambang Pada Peledakan Di Pit 2 Bangko Barat PT Bukit Asam Tbk Tanjung Enim Provinsi Sumatera Selatan". *Jurnal Mineral*, vol. 5, no. 1, pp. 23-30, 2020. doi: 10.33019/mineral.v5i1.3055.
- [6] Instantel, *Blastmate III*. Ogdensburg, New York: USA, 2009.
- [7] J. C. Jhanwar, "Theory and Practice of Air-Deck Blasting in Surface Mines". A review. *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 651–663, 2011. doi: 10.1007/s10706-011-9425-x.
- [8] N. N. Ambraseys, & A. J. Hendron, A. J. *Dynamic Behavior of Rock Masses*. In K. G. Stagg & O. C. Zienkiewicz (Eds.), *Rock Mechanics in Engineering Practice*. London, New York: John Wiley & Sons. pp. 203–227, 1968.
- [9] Oktaviani. *Analisis Ground Vibration*. Skripsi. Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran":Yogyakarta, 2006.
- [10] Sastry, V. R., & K. R. Chandar, "Ground Vibration and Air Overpressure Due to Blasting in Open Pit Mines". *Journal of Mines, Metals and Fuels*, vol. 62, no. 3, pp. 67–75, 2014.
- [11] Siregar, & S. Saptono, "Analisis Pengaruh Geometri Peledakan terhadap Peak Particle Velocity (PPV) pada Tambang Terbuka". *Jurnal Teknologi Pertambangan*, vol. 9, no. 1, pp. 12–19. 2023.
- [12] U. Langefors, & B. Kihlström, *The Modern Technique of Rock Blasting*. John Wiley & Sons. New York: A Halsted Press Book, 1963.
- [13] W. A. Hustrulid, *Blasting Principles for Open Pit Mining*. Corolado School of Mines, USA: A. A. Balkema, 1999.
- [14] W. L. Duvall, & D. E. Fogelson, *Review of Criteria for Estimating Damage to Residences from Blasting Vibrations*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines (Report of Investigations 5968), pp. 19, 1962.
- [15] Yanottama, A., dkk. "Kajian Teknis Geometri Peledakan dan Fragmentasi Batuan Menggunakan Bottom Air Deck pada Peledakan Interburden terhadap Isian Bucket PC 3000 di Pit 2 PT XYZ". *Jurnal Teknik Kebumian*, vol. 13, no. 2, pp. 22–35, 2025. *Jurnal Teknik Kebumian*, doi: 10.22437/jtk.v13i02.41172.
- [16] Zuhri, M. A., & dkk. "Pengaruh Tingkat Getaran Tanah (*Ground Vibration*) Akibat Peledakan Area PT. Rinjani Kartanegara, Kabupaten Kartanegara, Kalimantan Selatan". *Jurnal Teknologi Mineral FT UNMUL*, vol. 6, no. 1, pp. 11–16, 2018. doi: 10.30872/jtm.v6i1.1385.