Analisis peledakan batu kapur untuk memprediksi *ground vibration* dan *flying rock* di PT Semen Baturaja Tbk

Analysis of limestone blasting to predict ground vibration and flying rock at PT Semen Baturaja Tbk

Timotius Tarigan[1]*, Alio Jasipto[2], M. Akbari Danasla[3], La Ode Arham[4], Jarwinda[5]
[1-5] Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera
e-mail: *[1]**timotius.120370188@student.itera.ac.id**, [2]alio.jasipto@ta.itera.ac.id, [3]m.danasla@anasla.itera.ac.id, [4]laode.arham@ta.itera.ac.id, [5]jarwinda@ta.itera.ac.id

ABSTRAK

Dampak peledakan seperti *ground vibration* dan *flying rock* dapat menimbulkan kerugian yang besar bagi lingkungan sekitar terutama masyarakat. Memprediksi dampak peledakan terhadap lingkungan sangat penting untuk dilakukan sebagai pertimbangan dalam perencanaan peledakan. Menggunakan rumus empirik adalah salah satu cara yang akurat dalam memprediksi *ground vibration* dan *flying rock*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode terapan menggunakan rumus empirik dari *United state Bureau of Mines* (USBM) untuk *ground vibration* dan Richard *and* Moore untuk *flying rock*. Tahapan penelitian ini meliputi studi literatur, pengambilan data, pengolahan data, analisis data, dan memberikan kesimpulan, saran serta rekomendasi. Hasil analisis prediksi PPV maksimal di Pit 1 PT Semen Baturaja Tbk berada diangka 0,94 mm/s dan hasil analisis prediksi *flying rock* maksimal diradius 142 m pada kondisi *faceburst*. Kedua hasil ini dinyatakan aman karena memenuhi kualifikasi standar nasional indonesia (SNI) 7571 tahun 2010 dan keputusan mentri ESDM nomor 1827 K/30/MEM/2018.

Kata-kata kunci: *Dampak peledakan, flying rock, ground vibration, Richard and Moore, USBM.*

ABSTRACT

Blasting impacts such as ground vibration and flying rock can cause great harm to the surrounding environment, especially the society. Predicting the impact of blasting on the environment is very important to do as a consideration in blasting planning. Using empirical formula is one of the accurate ways to predict ground vibration and flying rock. The method used in this research is an applied method using empirical formulas from the United state Bureau of Mines (USBM) for ground vibration and Richard and Moore for flying rock. The stages of this research include literature study, data collection, data processing, data analysis, and providing conclusions, suggestions and recommendations. The results of the maximum PPV prediction analysis in Pit 1 PT Semen Baturaja Tbk are at 0.94 mm / s and the results of the maximum flying rock prediction analysis at a radius of 142 m in faceburst conditions. Both of these results are declared safe because they meet the qualifications of the Indonesian National Standard (SNI) 7571 of 2010 and the ESDM Ministerial Decree number 1827 K/30/MEM/2018.

Keywords: *Blasting impact, flying rock, ground vibration, Richard and Moore, USBM*

PENDAHULUAN

[1] Batu kapur adalah batuan sedimentasi yang terbentuk dari endapan kalsium karbonat yang tersusun atas mineral kalsit. [2] PT Semen Baturaja Tbk adalah perusahaan yang komoditas utama dalam kegiatan penambanganya adalah batu kapur dengan menggunakan metode tambang terbuka dengan *quarry mining methode*. Pemberaian batuan dalam memproduksi batu kapur akan dimulai dari kegiatan penggalian hingga kegiatan peledakan. Pelaksanaan kegiatan peledakan yang dimulai dari perencanaan hingga eksekusi dilapangan, haruslah memperhatikan dampak yang akan ditimbulkan.

[3] Penambangan adalah salah satu tahap dalam proses pertambangan, yang merupakan kegiatan pengambilan material berharga dari dalam bumi. [4] Pada aktivitas penambangan, metode peledakan seringkali menjadi pilihan utama dalam mengubah batuan keras menjadi fragmen yang diinginkan. Metode ini memiliki keunggulan untuk diterapkan pada berbagai kondisi geologis dan dianggap sebagai salah satu teknik yang relatif mudah dilakukan dalam industri penambangan. [5] Dalam proses peledakan batuan, langkah pertama yang umumnya diambil adalah melakukan pemboran. Tujuan dari tahapan ini adalah menciptakan lubang ledak sesuai dengan geometri dan pola pemboran yang telah direncanakan sebelumnya, yang nantinya akan diisi dengan bahan peledak dan diinisiasi untuk memicu ledakan. [6] Aktivitas peledakan menjadi alternatif yang dipilih oleh PT. Semen Baturaja (Persero) Tbk untuk memecahkan batuan karena merupakan teknis pemberaian batuan yang terbilang murah dibandingkan dengan metode surface miner. Metode ini tidak hanya efektif dalam memecahkan batuan, tetapi juga memungkinkan pengoptimalan produksi dengan efisiensi yang tinggi. Perencanaan peledakan harus disusun secara optimal untuk mencegah kebutuhan akan peledakan tambahan dan juga meningkatkan efisiensi proses pemuatan material. [7] Peledakan batu kapur kebanyakan menggunakan jenis bahan peledak ANFO yang diemulsi, dengan pola pengeboran *staggered pattern* guna memberai material batu kapur dengan maksimal.

[8] Proses peledakan seringkali menimbulkan dampak lingkungan seperti *ground vibration* (getaran tanah), *flying rock* (lontaran batuan), *air blast* (ledakan udara) dan *noise* (kebisingan) yang dapat merusak dan juga membahayakan lingkungan sekitar seperti infrastruktur, keselamatan pekerja tambang, serta masyarakat setempat.

Dampak peledakan ini dapat dirasakan oleh masyarakat yang berada di sekitar lokasi penambangan karena jarak yang tidak begitu jauh antara lokasi kegiatan penambangan dan pemukiman yang hanya berkisar 300-500 meter.

[9] *Ground vibration* yang ditimbulkan oleh kegiatan peledakan dapat mengakibatkan berbagai dampak terhadap lingkungan. Umumnya, *Peak Particle Velocity* (PPV) atau *Peak Particle Acceleration* (PPA) digunakan sebagai parameter untuk mengukur tingkat *ground vibration*. Besaran ini dipengaruhi oleh jumlah bahan peledak yang diledakkan secara bersamaan (*per delay*) serta jarak antara sumber getaran (lokasi peledakan) dengan lokasi pengukuran. Dampak getaran tanah pada bangunan dapat menyebabkan kerusakan struktural, seperti retaknya dinding atau kaca. Sementara itu, dampak pada stabilitas lereng dapat menyebabkan peningkatan gaya pendorong longsor akibat percepatan *horizontal* (koefisien seismik).

[10] Prediksi jarak lemparan *flyrock* dapat dihitung menggunakan metode *Richard and Moore*. Metode ini berfokus pada parameter-parameter peledakan yang dapat dikontrol, seperti geometri peledakan yang mencakup *burden*, spasi, tinggi *stemming*, kedalaman lubang ledak,, jumlah isian rata-rata per lubang ledak, dan jarak *burden* awal ke *freeface*.

Ground vibration dan *flying rock* yang mengganggu dan merugikan masyarakat menjadi salah satu alasan bagi masyarakat setempat dalam melakukan demo terhadap PT Semen Baturaja Tbk, sehingga perlu dilakukannya analisis apakah *ground vibration* dan *flying rock* benar melewati ambang batas aman yang dapat menimbulkan kerugian bagi masyarakat.

METODOLOGI

Metode penelitian yang digunakan adalah Penelitian terapan yaitu penelitian yang dilakukan dengan membuat pengembangan sebagai jawaban atupun solusi atas permasalahan yang ada. Penelitian ini menggunakan persamaan empirik untuk mendapatkan konstanta kondisi spesifik lokasi peledakan dan eksponen penunjuk laju penurunan kecepatan partikel pada prediksi *ground vibration*.

Ground vibration

[11] *Ground vibration* adalah getaran yang terjadi karena sumber energi atau gelombang seismik, baik yang berasal dari alam seperti gempa bumi, maupun dari aktivitas manusia seperti peledakan, yang dapat mengakibatkan pergerakan tanah. Dalam kondisi tertentu, *ground vibration* dapat menyebabkan kerusakan pada struktur bangunan dan mengganggu stabilitas lereng di sekitar area peledakan. Energi yang dihasilkan oleh getaran tanah terbagi menjadi dua jenis, yaitu gelombang tubuh (*body waves*) dan gelombang permukaan (*surface waves*). [12] Hukum skala jarak dan berat muatan dan isian bahan peledak telah digunakan selama bertahun-tahun untuk memprediksi PPV. Penerapannya bersifat spesifik untuk setiap lokasi.

Persamaan empirik yang digunakan untuk memprediksi getaran tanah dalam penelitian ini adalah persamaan *United state Bureau of Mines* (USBM).

$$PPV = K \left[\frac{D}{W^{\frac{1}{2}}}\right]^{m} \quad (1)$$

[13] Dimana *PPV* (*Peak Particle Velocity)* merupakan kecepatan puncak dari gelombang yang kemudian digunakan untuk mengukur serta memprediksi getaran dengan satuan milimeter per detik (mm/s). D merupakan Jarak pengukuran dari lokasi peledakan dengan satuan meter (m). W merupakan muatan bahan peledak yang meledak secara bersamaan dengan satuan Kilogram (Kg). K merupakan Konstanta yang mengindikasikan kondisi spesifik lokasi peledakan. m merupakan eksponen penunjuk laju penurunan kecepatan partikel.

Flying rock

[14] *Flying rock* adalah fragmen batuan yang terlempar akibat peledakan, dan jika tidak terkendali, dapat menyebabkan kerusakan pada fasilitas dan bahkan cedera pada manusia. Oleh karena itu, pengendalian *flying rock* menjadi salah satu prioritas utama dalam setiap operasi peledakan, untuk menjaga keamanan dan mencegah kerugian. Dalam upaya untuk mengelola *flying rock*, strategi mitigasi risiko yang efektif dan penggunaan perlindungan yang tepat harus diterapkan secara ketat. Salah satu metode yang dapat digunakan dalam memprediksi *flying rock* adalah menggunakan rumus Richard *and* Moore.

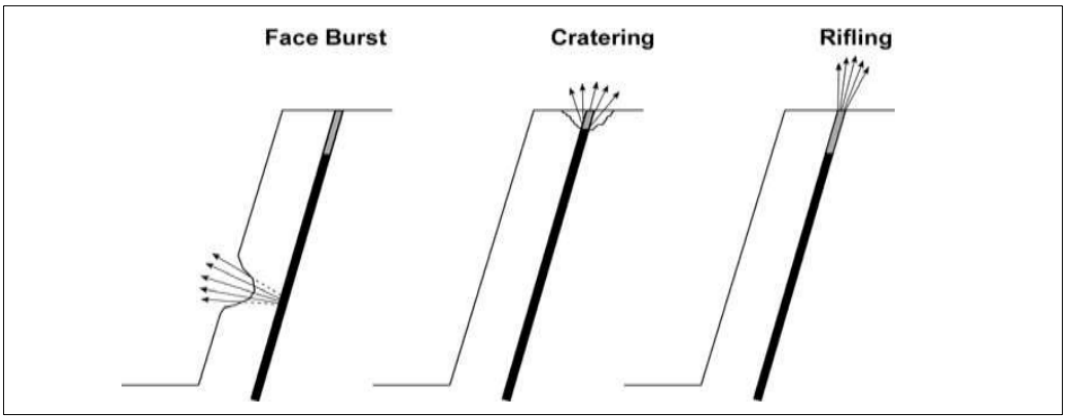
Persamaan empirik yang digunakan untuk memprediksi *flying rock* dalam penelitian ini adalah persamaan Richard *and* Moore.

$$FB = \frac{k^2}{g}\left(\frac{\sqrt{m}}{Ba}\right)^{2,6} \quad (2)$$

$$C = \frac{k^2}{g}\left(\frac{\sqrt{m}}{\mathrm{SH}}\right)^{2,6} \quad (3)$$

$$R = \frac{k^2}{g}\left(\frac{\sqrt{m}}{SH}\right)^{2,6} sin\,2\Theta \quad (4)$$

[15] *FB* (*Faceburst*) merupakan lotaran batuan maksimum ketika *burden* awal memiliki jarak yang terlalu dekat dengan *freeface*. C (*Cratering*) merupakan lontaran batuan maksimum ketika *stemming* terlalu pendek dan juga terdapat bidang lemah dilubang ledak. R (*Rifling*) ketinggian *stemming* sudah dipastikan memadai dapat mencegah terjadinya *flying rock* melalui *cratering*, namun material yang digunakan pada *stemming* tidak optimal atupun lemah. *FB*, C dan R memiliki satuan meter (m). k merupakan konstanta dengan ketentuan 13,5 untuk *soft competent rock* dan 27 untuk *hard competent rock*. g merupakan percepatan gravitasi dengan satuan meter per detik kuadrat (m/s^2). m merupakan loading density dengan satuan kilogram per meter (kg/m). Ba merupakan *burden* awal dengan satuan meter (m). SH merupakan panjang *stemming* dengan satuan meter (m). Θ merupakan derajat kemiringan lubang bor yang bernilai 75°.



Gambar-1. Mekanisme terjadinya *flying rock*

Pengolahan statistic

[16] Pengolahan statistik bersifat semi-empiris karena bergantung pada korelasi antara data yang dapat diukur dan parameter terkait. Dikarenakan model statistik dipengaruhi oleh data, pentingnya strategi pemrosesan data untuk mengevaluasi fitur yang memiliki korelasi paling tinggi menjadi krusial guna meningkatkan akurasi perhitungan.

$$Md = b + p\left(\frac{\frac{1}{2}n - F}{f}\right) \quad (5)$$

Md merupakan median. [17] Median merupakan metode untuk menggambarkan kelompok data yang bergantung pada nilai tengah dari data yang telah diurutkan dari yang terkecil ke yang terbesar, atau sebaliknya dari yang terbesar ke yang terkecil. *b* merupakan atas bawah, dimana median akan terletak. *n* merupakan banyak data. *P* merupakan panjang kelas interval. *F* merupakan jumlah semua frekuensi. *f* merupakan frekuensi kelas median.

$$Me = \frac{\Sigma xi}{n} \quad (6)$$

Me merupakan mean. [17] Mean adalah suatu metode untuk menggambarkan kelompok data dengan menggunakan nilai rata-rata dari seluruh data individu dalam kelompok tersebut. Nilai rata-rata diperoleh dengan menjumlahkan data individu dalam kelompok dan kemudian membaginya dengan jumlah individu yang ada dalam kelompok tersebut. *Σ* merupakan epsilon (jumlah). *Xi* merupakan nilai x ke i sampai ke n. *n* merupakan banyak data.

$$Qi = \frac{i(n+1)}{4} \quad (7)$$

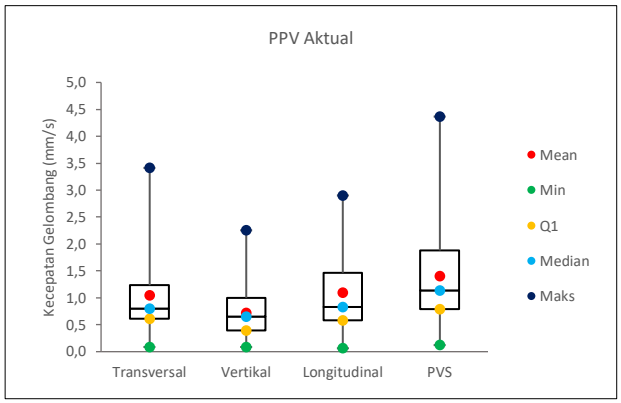
Qi merupakan kuartil ke-i. [18] Kuartil merupakan ukuran posisi yang membagi kelompok data menjadi empat bagian yang berukuran yang sama. Dalam ilmu statistika, terdapat beberapa kuartil yang sering digunakan, termasuk Q1, Q2, Q3, dan Q4. *n* merupakan banyak data.

HASIL DAN DISKUSI

Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan rumus empirik, dimana *Peak Particle Velocity* (PPV) menggunakan persamaan *United state Bureau of Mines* (USBM), dan rumus *flying rock* menggunakan persamaan Richard *and* Moore.

Gelombang PPV dan *Peak Vector Sum* (PVS)

Hasil dari pengukuran *ground vibration* menggunakan *micromate* terbagi atas PPV vertikal, PPV trasversal, PPV longitudinal dan PVS. Keempat hasil ini memiliki nilai yang berbeda sehingga perlu dilakukannya pengolahan data. Distribusi data hasil dari pengukuran 91 data disajikan pada Gambar 2.



Gambar-2. Distribusi PPV aktual

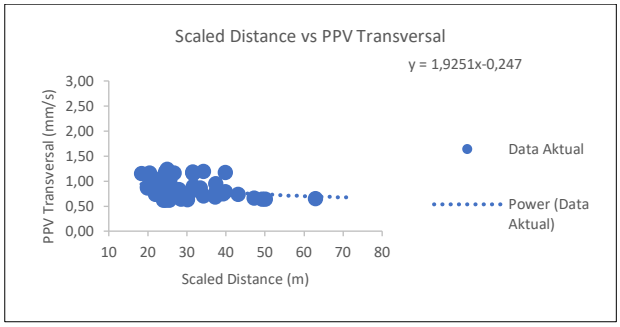
Dilakukan analisis statistik guna mendapatkan persebaran data dengan jumlah data yang sama pada *range* yang lebih sempit. Distribusi data gelombang transversal terdapat diantara Q1 dan Q3 sedangkan untuk gelombang vertikal, longitudinal dan PVS terdapat diantara nilai minimum dan median. Distribusi data pada tabel-1 akan dilanjutkan sebagai data utama dalam melakukan prediksi *ground vibration*.

Tabel-1. Distribusi data terbanyak dengan *range* paling sempit

Distribusi	*Range* (mm/s)		Banyak Data
Transversal	0,61	1,23	45
Vertikal	0,09	0,65	47
Longitudinal	0,06	0,84	46
PVS	0,12	1,14	46

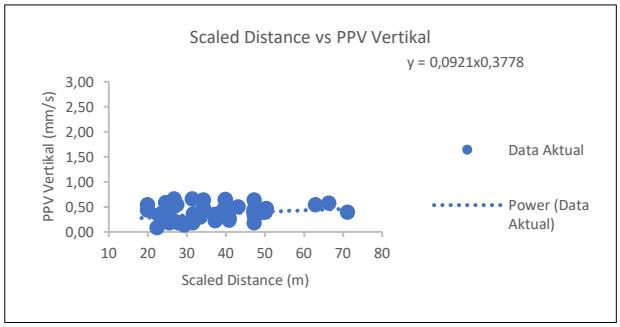
Scaled distance (SD)

Prediksi PPV membutuhkan rasio antara jumlah bahan peledak dan jarak pengukuran (*scaled distance*). *Scaled distance* ini dihitung berdasarkan distribusi data pada Tabe-1. Hasil pengolahan dalam grafik disajikan berdasarkan persamaan (1). Pengolahan grafik pertama merupakan hubungan antara *scaled distance* terhadap PPV transversal, menghasilkan persamaan y = 1,9251x-0,247, terlampir pada Gambar-3.



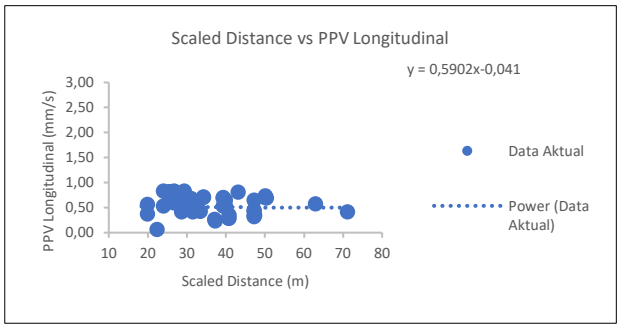
Gambar-3. Hubungan *scaled distance* dengan PPV transversal

Pengolahan grafik kedua merupakan hubungan antara *scaled distance* terhadap PPV vertikal, menghasilkan persamaan y = 0,0921x0,3778, terlampir pada Gambar-4.



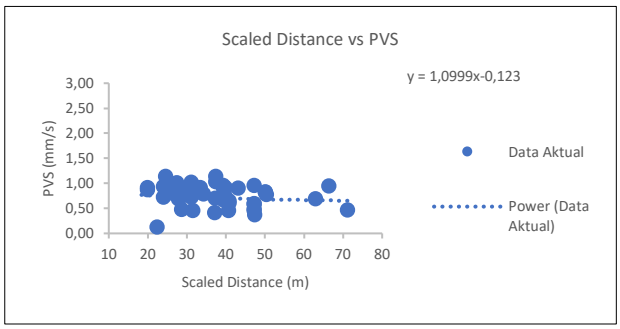
Gambar-4. Hubungan *scaled distance* dengan PPV vertikal

Pengolahan grafik ketiga merupakan hubungan *scaled distance* terhadap PPV longitudinal, menghasilkan persamaan y = 0,5902x-0,041, terlampir pada Gambar-5.



Gambar-5. Hubungan *scaled distance* dengan PPV longitudinal

Pengolahan grafik keempat merupakan hubungan *scaled distance* terhadap PVS, menghasilkan persamaan y = 1,0999x-0,123, terlampir pada Gambar-6.



Gambar-6. Hubungan *scaled distance* dengan PVS

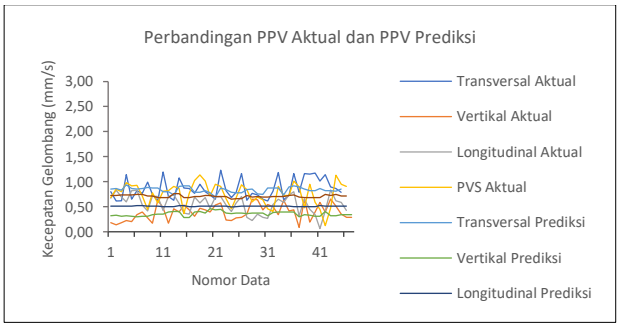
Perbandingan PPV aktual dengan PPV prediksi

Syarat membandingkan PPV aktual dan prediksi haruslah melengkapi nilai dari persamaan (1). Selanjutnya dicarilah hubungan antara PPV dengan *scaled distance* aktual yang akan memunculkan konstanta K dan m.

Tabel-2. Hasil konstanta K dan m pada data aktual

PPV Transversal		PPV Vertikal		PPV Longitudinal		PVS	
K	m	K	m	K	m	K	m
1,9251	-0,247	0,0921	0,3778	0,5902	-0,041	1,0999	-0,123

Perbandingan gelombang PPV transversal aktual yang memiliki nilai 0,62 mm/s sampai 1,23 mm/s dengan gelombang PPV transversal prediksi yang memiliki nilai 0,69 mm/s sampai 0,94 mm/s memiliki rata rata akurasi prediksi sebesar 82%. Perbandingan PPV vertikal aktual yang bernilai 0,09 mm/s sampai 0,65 mm/s dengan PPV vertikal prediksi yang bernilai 0,28 mm/s sampai 0,46 mm/s memiliki rata rata akurasi prediksi sebesar 59%. Perbandingan PPV longitudinal aktual yang bernilai 0,06 mm/s sampai 0,84 mm/s dengan prediksi yang bernilai 0,50 mm/s sampai 0,52 mm/s memiliki rata rata akurasi prediksi sebesar 54%. Perbandingan PVS aktual yang memiliki nilai 0,12 mm/s sampai 1,14 mm/s dengan PVS prediksi yang memiliki nilai 0,65 mm/s sampai 0,76 mm/s memiliki rata rata akurasi prediksi sebesar 65%. Perbandingan setiap gelombang terlampir pada Gambar-7.



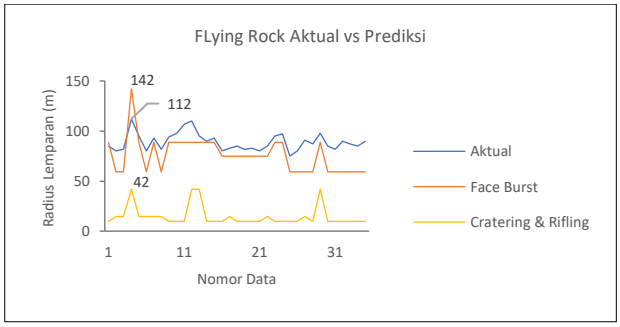
Gambar-7. Perbandingan PPV aktual dengan PPV prediksi

Setelah dilakukannya perhitungan selisih antara nilai *flying rock* aktual dan prediksi maka didapatkanlah nilai *error* rata rata untuk *faceburst* sebesar 17%, untuk *cratering* sebesar 84%, dan *rifling* sebesar 84%. Persentase yang didapatkan mengindikasikan bahwa kondisi *faceburst* memiliki akurasi tertinggi terhadap *flying rock* aktual dibanding *cratering* dan *rifling*.

Hasil pengolahan data dilanjutkan dengan analisis yang disesuaikan dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) 7571 tahun 2010 untuk *ground vibration*, dan Keputusan Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) nomor 1827 K/30/MEM/2018 untuk *flying rock*.

Perbandingan radius *flying rock* aktual dengan prediksi

Perhitungan radius *flying rock* dilakukan menggunakan persamaan (2), (3) dan (4). Grafik pembanding antara lontaran aktual dengan lontaran prediksi sebagai visualisasi terkait perbedaan dari aktual dan prediksi dapat dilihat pada gambar-8.



Gambar-8. Perbandingan radius *flying rock* aktual dengan prediksi

Setelah dilakukannya perhitungan selisih antara nilai *flying rock* aktual dan prediksi maka didapatkanlah nilai *error* rata rata untuk *faceburst* sebesar 17%, untuk *cratering* sebesar 84%, dan *rifling* sebesar 84%. Persentase yang didapatkan mengindikasikan bahwa kondisi *faceburst* memiliki akurasi tertinggi terhadap *flying rock* aktual dibanding *cratering* dan *rifling*.

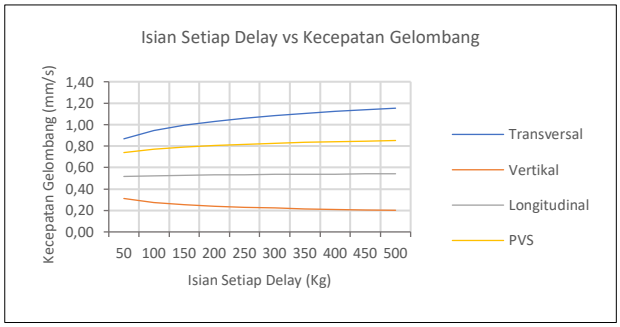
Ground vibration disesuaikan dengan SNI

Perhitungan PPV yang mempertimbangkan *scaled distance*, konstanta K dan kontanta m memunculkan hasil yang dinyatakan aman, karena nilainya berada dibawah 2 mm/s, sehingga untuk mendapatkan dan mempertahankannya maka dapat menggunakan persamaan sebagai berikut.

Tabel-3. Persamaan dari keempat data gelombang

No	Gelombang (mm/s)	Persamaan	PPV *Max* (mm/s)
1	Transversal	$y = 1{,}9251x^{-0{,}247}$	1,23
2	Vertikal	$y = 0{,}0921x^{0{,}3778}$	0,65
3	Longitudinal	$y = 0{,}5902x^{-0{,}041}$	0,84
4	PVS	$y = 1{,}0999x^{-0{,}123}$	1,14

Dari persamaan tersebut dapat dilakukan sebuah simulasi, yaitu Isian setiap *delay* terhadap nilai PPV. Pada PPV transversal, PPV longitudinal dan PVS, semakin besar isian setiap *delay* maka semakin besar kecepatan gelombang. Hasil yang berbeda terjadi pada PPV vertikal, semakin besar isian setiap *delay* maka semakin kecil kecepatan gelombang yang dihasilkan. Simulasi terlampir pada Gambar-9.

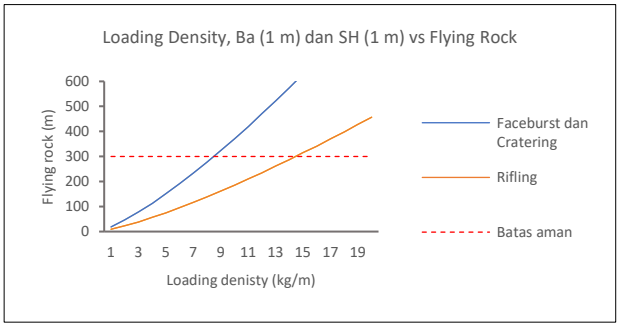


Gambar-9. Simulasi Isian setiap *delay* terhadap kecepatan gelombang

Berdasarkan hasil dari simulasi isian setiap *delay* terhadap kecepatan gelombang, maka direkomendasikan isian setiap *delay* sebanyak 93,88 Kg. Rekomendasi ini didapatkan berdasarkan PPV prediksi tertinggi yaitu PPV transversal yang bernilai 0,94 mm/s.

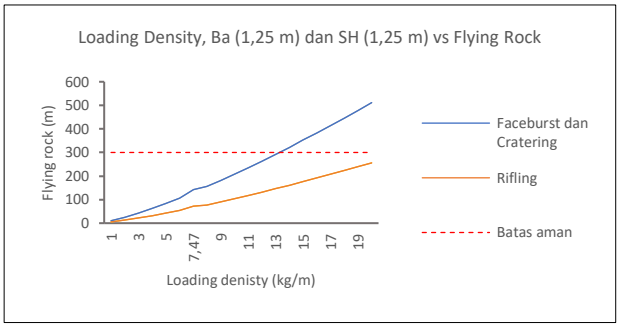
Flying rock disesuaikan dengan Kepmen ESDM

Perhitungan *flying rock* yang mempertimbangkan konstanta k, gravitasi, *loading density*, *burden* awal, *stemming* dan kemiringan lubang bor memunculkan hasil yang dinyatakan aman, karena tidak melebihi 300m. Penting melakukan simulasi *loading density* dan dimensi (*stemming* dan *burden* awal) terhadap *flying rock* guna mendapatkan prediksi yang diinginkan. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa semakin besar *loading density*, maka radius *flying rock* akan semakin besar. Simulasi pada Gambar-10 dilakukan dengan menganggap *burden* awal (Ba) dan *stemming* (SH) bernilai 1 m.



Gambar-10. Simulasi *loading density* & dimensi 1 m terhadap *flying rock*

Parameter lain yang dapat mempengaruhi *flying rock* adalah *stemming* dan *burden* awal. Pengaruh *stemming* dan *burden* awal memunculkan hasil yang berbeda dari *loading density*, yang dimana semakin besar *stemming* dan *burden* awal, maka semakin kecil radius *flying rock*. Hasil ini terlampir pada Gambar-11.



Gambar-11. Simulasi *loading density* & dimensi 1,25 m terhadap *flying rock*

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, direkomendasikan bahan peledak sebesar 8 Kg/m dengan syarat *burden* awal sebesar 1,25m dan *stemming* 1,25 m.

KESIMPULAN

Adapun kesimpulan yang bisa dikeluarkan dari penelitian ini adalah:

1. Berdasarkan hasil analisis prediksi PPV maksimal diangka 0,94 mm/s. Nilai ini masih dibawah 2 mm/s, yang merupakan standar bangunan kelas 1 yaitu bangunan kuno yang dilindungi undang – undang benda cagar budaya. Tingkat akurasi prediksi maksimum hanya 82%, sehingga penting untuk melanjutkan penelitian prediksi *ground vibration* dengan mengolah konstanta K dan m secara langsung.
2. Berdasarkan hasil analisis prediksi *flying rock* maksimal diradius 142 m pada kondisi *faceburst*. Nilai ini masih dibawah 300m yang merupakan jarak aman peledakan bagi alat dan fasilitas pertambangan. Tingkat akurasi

prediksi maksimum hanya 83%, sehingga penting untuk melanjutkan penelitian prediksi *flying rock* dengan melengkapi prediksi empirik dengan pemodelan numerik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Semen Baturaja Tbk yang telah memberi dukungan dalam bentuk fasilitas terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. A. Amir, "Analisis Kandungan Kalsium Karbonat (CaCO3) Batu Gamping Sebagai Bahan Baku Pembuatan Marmer," 2021.

[2] J. T. Lestari, A. Sair, and Supriyanto, "Peranan Pt Semen Baturaja (Persero) Tbk Pada Masyarakat Desa Pusar Kecamatan Baturaja Barat Kabupaten Ogan Komering Ulu Tahun 2013-2018," *J. Indones. Hist.*, vol. 9, no. 2, pp. 167–177, 2020.

[3] Sundek Hariyadi, "Kajian Teknis Tahapan Penambangan Batubara Pada Pt. Mega Global Energy Kabupaten Kutai Kartanegara Kalimantan Timur," *JGP (J. Geol. Pertamb.)*, vol. 1, no. 2, pp. 43–57, 2018.

[4] V. Munagala, S. Thudumu, I. Logothetis, S. Bhandari, R. Vasa, and K. Mouzakis, "Machine Learning with Applications A comprehensive survey on machine learning applications for drilling and blasting in surface mining," *Mach. Learn. with Appl.*, vol. 15, no. August 2023, p. 100517, 2024.

[5] Sujiman, "Kajian Teknis Alat Bor Dalam Pembuatan Lubang Ledak Pada Aktifitas Peledakan PT. HPU (Harmoni Panca Utama) Kabupaten Kutai Kartanegara Provinsi Kalimantan Timur," *J. Geol. Pertamb.*, vol. 1, no. 14, pp. 1–13, 2014.

[6] N. P. Nayak, A. Jain, and S. Ranjan Mahapatra, "Application of Mine Excellence software in flyrock prediction & mitigation," *Mater. Today Proc.*, vol. 48, pp. 1271–1276, Jan. 2022.

[7] A. Suganda, Safaruddin, and M. L. Franca, "Analisa Pola Peledakan Batu Kapur Pada Tambang Di PT . Semen Baturaja (Persero) Tbk . Kabupaten OKU Provinsi Sumatera Selatan," *Kotamo*, vol. 1, no. January, 2021.

[8] A. Purwaningsih, S. Tohir, S. Rahayu, and L. Purwita, "Study of Ground Vibration Measurements in Blasting Operations at PT Semen Baturaja (Persero) Tbk," *UEEJ-Unbara Environ. Eng. Journa*, vol. 3, no. 2, 2023.

[9] Bochori, A. Suherman, and D. Purbasari, "Desain Teknis Peledakan Batu Kapur Untuk Mereduksi Efek Getaran Tanah Technical Design of Limestone Blasting To Reduce the Effect of Ground Vibration," *Pertambangan*, vol. 5, no. 1, 2021.

[10] D. Al Zhahra, B. Wiyono, and A. Sudiyanto, "Prediksi Jarak Lemparan Flyrock Dengan Metode Analisis Dimensi Serta Richard Dan Moore Akibat Kegiatan Peledakan Pada Tambang Bijih Emas," *Indones. Min. Prof. J.*, vol. 4, no. 2, pp. 145–152, 2022.

[11] A. R. Permana and B. Heriyadi, "Kajian Pengurangan Getaran Tanah (Ground vibration) Pada Peledakan Overburden Tambang Batubara Di PT. Artamulia TataPratama Site Tanjung Belit Provinsi Jambi," *J. Bina Tambang*, vol. 4, no. 1, pp. 344–356, 2019.

[12] G. M. Simangunsong and S. Wahyudi, "Effect of bedding plane on prediction blast-induced ground vibration in open pit coal mines," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 79, pp. 1–8, Oct. 2015.

[13] M. R. Aulia, I. Irvani, and H. Oktarianty, "Analysis of Distance On Ground Vibration at Around Residential Areas in PT Semen Padang Indarung West Sumatera Province," *Mineral*, vol. 5, no. 1, pp. 31–36, 2020.

[14] A. Fikri, E. Moralista, and Yuliadi, "Analisis Peledakan Air Decking terhadap Jarak Lemparan Flying Rock guna Memperkecil Jarak Evakuasi Alat – Alat Mekanis di PT Multi Nitrotama Kimia (PT MNK) Jobsite PT Alamjaya Bara Pratama (Pt ABP) Pendahuluan Perhitungan Perkiraan Jarak Lemparan Flyi," vol. 5, no. 2, pp. 1–8, 2019.

[15] A. J. Moore and A. B. Richards, "GOLDEN PIKE CUT-BACK FLYROCK CONTROL AND CALIBRATION OF A PREDICTIVE MODEL," *Terrock Consult. Eng. Pty Ltd*, p. 38, 2005.

[16] L. Rapino, L. Liu, A. Dinosio, F. Ripamonti, R. Corradi, and S. Baro, "Processing of tyre data for rolling noise prediction through a statistical modelling approach," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 188, p. 110042, 2023.

[17] A. Malik, "PENGANTAR STATISTIKA PENDIDIKAN," *deepublish*, p. 167, 2018.

[18] A. S. Pratikno, A. A. Prastiwi, and S. Ramahwati, "Kuartil, Desil, dan Presentil Serta Cara Menghitungnya dalam Distribusi Frekuensi," *OSF Prepr.*, vol. 23, no. 3, pp. 1–4, 2020.