

Analisis Kestabilan Lubang Bukaak Akibat Peledakan *Deep Mill Level Zone* (Dmlz) PT Freeport Indonesia

Supardi Razak^{1*}, Ganda Marihot Simangunsong², Tri Karian²

¹Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta, Indonesia

²Institut Teknologi Bandung, Indonesia

*Email: supardi.razak@uinjkt.ac.id

SARI

PT Freeport Indonesia (PTFI) saat ini melakukan kegiatan penambangan deposit tembaga dan emas di Papua, Indonesia. Tambang bawah tanah *Deep Mill Level Zone* (DMLZ), terutama untuk aktivitas peledakan level *undercut*, adalah salah satu lokasi penambangan yang harus diperhatikan oleh perusahaan. Untuk menghitung *Peak Particle Velocity* (PPV), riset yang dilakukan menggunakan data getaran tanah dari hasil peledakan di lapangan. Pendekatan USBM (Duvall & Fogelson, 1962), Langefors dan Kihlstrom (1963), dan Ambraseys-Hendron (1968) digunakan untuk melakukan analisis data dengan menggunakan regresi linear skala jarak. Evaluasi pengaruh getaran peledakan terhadap lubang bukaak dilakukan dengan simulasi numerik menggunakan RS2 dari *Rock Science*. Pertama, hasil numerik divalidasi dengan data aktual. Hasil simulasi numerik dengan input parameter *damping ratio* 2% menunjukkan bahwa nilai PPV yang dihitung tidak berbeda jauh dengan nilai PPV aktual. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai PPV 68,15 mm/s dihasilkan oleh bahan peledak 70,0 kg. Jumlah muatan ini sama dengan beban peledakan 4,67 MPa. Hasil perhitungan juga menunjukkan bahwa kestabilan terowongan bukaak bawah dalam kondisi aman dengan faktor keamanan lebih besar dari 1,00.

Kata kunci: Dinamik load; Kestabilan lubang bukaak; Peak Particle Velocity (PPV); Scaled Distance (SD)

How to Cite: Razak, S., Simangunsong, G.M., Karian, T., Analisis Kestabilan Lubang Bukaak Akibat Peledakan *Deep Mill Level Zone* (Dmlz) PT Freeport Indonesia. Jurnal Geomine, 12 (1): 26 – 42.

Published By:

Fakultas Teknologi Industri
Universitas Muslim Indonesia

Address:

Jl. Urip Sumoharjo Km. 05
Makassar, Sulawesi Selatan

Email:

geomine@umi.ac.id

Article History:

Submit 19 December 2023

Received in from 16 Januari 2024

Accepted 29 March 2024

Available online

Licensed By:

[Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



ABSTRACT

PT Freeport Indonesia (PTFI) is currently engaged in copper and gold deposit mining activities in Papua, Indonesia. The *Deep Mill Level Zone* (DMLZ) underground mine,

especially for undercut level blasting activities, is one of the mining sites that companies must pay attention to. To calculate the Peak Particle Velocity (PPV), the research was conducted using soil vibration data from the results of blasting in the field. The USBM (Duvall & Fogelson, 1962), Langefors and Kihlstrom (1963), and Ambraseys-Hendron (1968) approaches were used to conduct data analysis using distance scale linear regression. The evaluation of the effect of blasting vibration on the opening hole was carried out by numerical simulation using RS2 from Rock Science. First, the numerical results are validated with actual data. The results of numerical simulation with the input parameter damping ratio of 2% show that the calculated PPV value is not much different from the actual PPV value. The calculation results show that the PPV value of 68.15 mm/s is produced by 70.0 kg of explosive. This amount of charge is equal to the blasting load of 4.67 MPa. The calculation results also show that the stability of the lower opening tunnel is in a safe condition with a safety factor greater than 1.00.

Keywords: *Load dynamics, Stability of opening hole, Peak Particle Velocity (PPV), Scaled Distance (SD)*

PENDAHULUAN

Energi yang ditransmisikan dalam massa batuan oleh bahan peledak selama proses peledakan menyebabkan batuan terberaikan. Semakin banyak energi yang ditransmisikan dalam massa batuan, maka ukuran fragmentasi batuan yang dihasilkan oleh peledakan semakin kecil. Sekitar 5% hingga 20% energi ledak digunakan untuk gelombang seismik, 10% hingga 20% untuk kinetik pendorong fragmentasi, 20% hingga 40% untuk memecahkan batuan, dan sisanya hanya 0,1 hingga 2 persen untuk fragmentasi batuan digunakan (Finn et al. 2004, Parida dan Mishra, 2015).

Nilai getaran tanah secara keseluruhan diwakili dalam parameter yang disebut *Peak Particle Velocity* (PPV), yang dapat diukur dengan alat *vibration monitoring*. Secara teoritis, dapat menghitung nilai getaran tanah dengan menggunakan teori *Scale Distance* (SD).

Peledakan runtuh di level *undercut* adalah salah satu operasi PT Freeport Indonesia saat ini yang menggunakan peledakan. Tidak semua energi yang dihasilkan selama proses peledakan digunakan untuk memecah batuan. Getaran tanah adalah istilah untuk gelombang seismik yang berasal dari peledakan. Sebagian energi yang dihasilkan selama proses peledakan ditransfer ke massa batuan dan tidak digunakan untuk memecah batuan. Karena getaran tanah yang dihasilkan dari kegiatan peledakan memberikan tegangan yang mendorong batuan di sekitar lubang bukaan untuk runtuh, keruntuhan batuan di sekitar lubang bukaan dapat menyebabkan kematian orang di sekitarnya dan penghentian produksi. Oleh sebab itu, analisis diperlukan untuk menentukan seberapa besar getaran tanah yang mempengaruhi kestabilan lubang bukaan.

METODE PENELITIAN

Pengamatan dan pengambilan data lapangan berarti mengamati peledakan secara langsung di lapangan dan mengumpulkan data pendukung dari dokumen perusahaan sebelumnya. Selain itu, pengukuran *ground vibration* yang disebabkan oleh peledakan dilakukan secara langsung di lapangan. Data primer dan sekunder digunakan dalam penelitian ini. Data primer meliputi jumlah isian bahan peledak per lubang, kedalaman lubang ledak, isian bahan peledak per *delay*, dan data *peak particle velocity* (PPV) aktual. Data sekunder, seperti *Rock Mass Rating* (RMR), peta geologi, geometri peledakan serta data spesifikasi bahan peledak yang digunakan diambil dari penelitian sebelumnya tanpa diolah atau diuji lebih lanjut.

Hasil uji laboratorium memberikan data tentang sifat fisik dan mekanik batuan. Salah satu dari data klasifikasi yang digunakan adalah Rock Mass Rating (RMR) yang dikembangkan oleh Bieniawski (1973), hingga akhirnya yang umum dipergunakan saat ini adalah revisi terakhir tahun 1989, yang meliputi data *Rock Strength/Uniaxial Compressive Strength* (UCS), *Rock Quality Designation* (RQD), Spasi diskontinuitas, Kondisi diskontinuitas, dan Kondisi airtanah. Sedangkan untuk data data propertis batuan yang telah didapatkan dari dari uji laboratorium dan pengamatan *Geological Strength Index* (GSI) secara langsung dihitung dengan persamaan empiris Hoek, Kaiser, dan Bawden (1995) yang ditujukan untuk memperkirakan berkurangnya kekuatan suatu massa batuan yang disebabkan oleh kondisi geologi yang berbeda, untuk menghasilkan Modulus Young massa batuan (E_m). Untuk karakteristik massa batuan kohesi (C_m) dan *friction angle* (ϕ_m) akan ditentukan secara empirik dengan hubungan grafik GSI dan parameter Mohr Coulumb yang dibuat oleh Hoek tahun 1997. Data hasil pengolahan yang telah menjadi properties massa batuandijadikan sebagai input untuk membangun model numerik dengan menggunakan kriteria keruntuhan Mohr Coulumb.

Kriteria Runtuh Mohr-Coulomb

Analisis keruntuhan suatu material merupakan suatu metode untuk menentukan keamanan yang diakibatkan oleh longsor atau lereng atau terowongan, pada umumnya dilakukan dengan cara membandingkan antara tegangan yang dialami oleh batuan dengan kekuatan yang dimiliki oleh material tersebut. Jika tegangan yang dialami oleh material tersebut melebihi kekuatannya, maka dapat dikatakan bahwa material tersebut akan mengalami keruntuhan.

$$\tau = C + \mu\sigma \quad (1)$$

Keterangan:



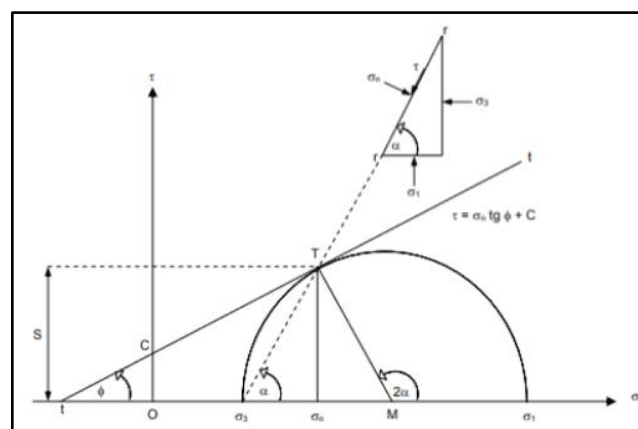
τ = tegangan geser

C = kohesi

μ = koefisien geser dalam dari batuan = $\tan \phi$

σ = tegangan normal

Faktor keamanan dihitung dengan membagi jarak dari pusat lingkaran Mohr ke kurva intrinsik, atau garis kekuatan batuan, dengan jari-jari lingkaran Mohr (Gambar 1). Faktor keamanan ini menunjukkan perbandingan kondisi kekuatan batuan terhadap tegangan yang bekerja padanya (Gambar 2).



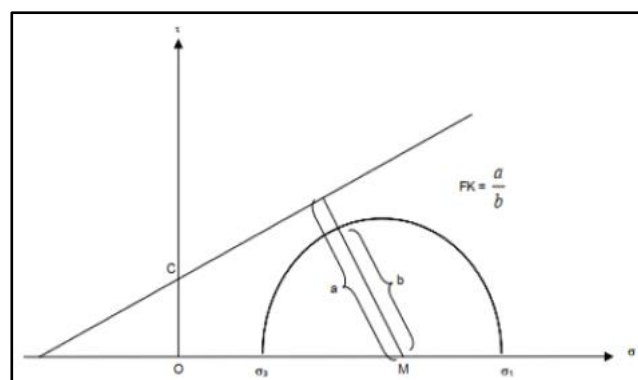
Gambar 1. Kriteria Runtuhan Mohr-Coulomb

Keterangan:

$r - r$ = bidang *rupture*

$t - t$ = Garis kuat geser Coulomb

$\sigma_1 - \sigma_3$ = diameter lingkaran Mohr



Gambar 2. Faktor Keamanan oleh Mohr Coulomb

Keterangan:

$$a = \left[\frac{c}{\tan \phi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right] \sin \phi \quad (2)$$

$$b = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (3)$$

$$FK = \frac{a}{b} = \frac{\left[\frac{c}{\tan \phi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right] \sin \phi}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}} \quad (4)$$

Faktor-faktor yang termasuk dalam data peledakan yakni *damping ratio* (ζ), frekuensi, jumlah bahan peledak yang digunakan, dan *delay* yang digunakan untuk input data peledakan *dynamic* pada model numerik. Sampai *z-velocity* mendekati PPV aktual, nilai damping dihitung dengan metode *trial and error*. Dalam program RS2 2D *Finite Element Analysis*, persamaan sistem dinamik digunakan, yang berdampak besar pada perubahan kecepatan. Ini ditunjukkan dalam persamaan berikut.

$$[M] \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) + [C] \left(\frac{dx}{dt} \right) + [K] (x(t)) = F_{stat} + F_{dyn} \quad (5)$$

Keterangan

X (t) = Perpindahan sebagai fungsi waktu

[M] = Matriks massa

[C] = Matriks damping

[K] = Matriks stiffness

Persamaan lain untuk menghitung *peak overpressure* dalam kPa diperkenalkan oleh Mills (1987) dimana W merupakan berat bahan peledak dalam Kg dari TNT.

$$P_{so} = \frac{1772}{Z^3} - \frac{144}{Z^2} + \frac{108}{Z} \quad (6)$$

Persamaan blast load yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan estimasi dengan regresi empirik oleh Low ang Hao (2001) ; Liu and Wang (2004) ; Zhao and Wang (2007).

$$P_{max} = \frac{139.97}{Z} + \frac{844.81}{Z^2} + \frac{2154}{Z^3} - 0.8034 \quad (7)$$

$$PPV = K(SD)^{-b} \text{ atau } PPV = K \left(\frac{R}{Q^{1/2}} \right)^{-b} \quad (8)$$

Persamaan (8) akan disesuaikan dengan mengubah konstantanya hingga kecepatan *x-model* mendekati *Peak particle velocity* (PPV) aktual. Evaluasi jumlah bahan peledak dan jarak yang berdampak pada sumber peledakan disebut sebagai *Scaled distance* (SD).

Selanjutnya, *triangle blastload* dibuat untuk memperoleh *increasing time* (t_R) dan *total time* (t_S) dengan menggunakan persamaan Wang (1984).

$$t_R = \frac{12\sqrt{r^{2-\mu} Q^{0,05}}}{K} \quad (9)$$

$$t_S = \frac{84\sqrt[3]{r^{2-\mu} Q^{0,02}}}{K} \quad (10)$$

$$r = \frac{\ddot{r}}{a} \quad (11)$$

Keterangan :

K = *modulus bulk* (Pa),

Q = jumlah bahan peledak/delay (kg)

μ = *poisson's ratio*,

a = *borehole radius* (m),

r = adalah *acting radius of the blasting load* (m).

Nilai *damping ratio* (%) yang mendekati kondisi lapangan diperoleh dari verifikasi kecepatan *x-velocity* model numerik terhadap PPV aktual. Nilai *damping rasio* dan *frekuensi* ini dapat digunakan untuk memodelkan peledakan pada hari berikutnya untuk mengetahui apakah kecepatan *x-velocity* terhadap PPV aktual sesuai dengan jumlah bahan peledak dan waktu *delay* yang berbeda. Selanjutnya, model numerik dengan hasil kecepatan *x-velocity* yang mendekati PPV aktual akan melihat FAKTO Keamanan (FK) dan *total strain* yang dihasilkan untuk analisis kestabilan lubang bukaan PT Freeport Indonesia.

HASIL PENELITIAN

Lubang bukaan *Deep Mill Level Zone* (DMLZ) PT Freeport Indonesia berada pada *level 2600 (undercut level)*, *level 2590 (extraction level)*, sampai dengan *level 2525 (truck haulage level)* dan mempunyai 138 *drawpoint* aktif. Rangkuman data berdasarkan pengamatan langsung di lapangan berupa pengukuran getaran peledakan yang sebagai primer. Klasifikasi massa batuan, geometri terowongan, dan perencanaan peledakan adalah data sekunder.

Data Sifat Fisik dan Mekanik Batuan.

Hasil uji laboratorium memberikan data tentang sifat fisik dan mekanik batuan. Uji *Uniaxial Compressive Strength* (UCS) untuk mendapatkan kuat tekan, dan data berat jenis diperoleh melalui sifat fisik pada batuan *Diorite*.

Uji Sifat Fisik.

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memperoleh densitas, kandungan air, dan porositas sampel batuan. Data sifat fisik dan mekanik batuan pada penelitian ini yang berupa data sekunder diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Sifat Fisik dan Mekanik Batuan

Tipe Batuan	Diorite (Fresh)
Uniaxial Compressive Strength UCS (Mpa)	156.5
Tensile Strength (Mpa)	11.5
Modulus Young (Gpa)	51.66
Poisson's Ratio	0.296
Friction Angle ($^{\circ}$)	48.0
Cohesion (Mpa)	14.1
Density (kg/m ³)	2703.5

Rock Mass Rating (RMR).

Nilai *Rock Mass Rating* (RMR) diperoleh dari perhitungan RMR yang dilakukan oleh DMLZ Geotechnical (2018), pada Tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2. Klasifikasi Massa Batuan RMR di Lokasi Penelitian

Parameter	Diorite	
	Deskripsi	Rating
<i>Uniaxial Compressive Strength</i>	100-250 Mpa	12
<i>Rock Quality Designation</i>	90-100%	20
<i>Discontinuity Spacing</i>	>2 m	20
<i>Condition of discontinuity</i>	<i>very rough surface, not continuous, not separation, unwethered wall rock</i>	30
<i>General Cond. Of Groundwater</i>	<i>Completely dry</i>	15
<i>Rating Adjustment for Discontinuity Orientation</i>	<i>Fair</i>	-5
Nilai Total		92

Dari Tabel 2, diatas didapatkan bobot klasifikasi massa batuan pada batuan *Diorite* sebesar 92. Batuan tersebut termasuk ke dalam kelas massa batuan I – *Very good rock*. Berdasarkan Tabel 3, pedoman penggalian dan penyangga terowongan berdasarkan nilai RMR disajikan pada tabel 3, yaitu secara *full face* dengan kemajuan 3 m.

Tabel 3. Pedoman untuk Penggalan dan Penyangga Terowongan Berdasarkan Nilai RMR (Sumber: Bieniawski, 1989)

ROCK MASS CLASS	EXCAVATION	SUPPORT		
		Rock bolts (20 mm diameter, fully grouted)	Shotcrete	Steel sets
I - Very good rock RMR : 81-100	Full face, 3 m advance.	Generally no support required except spot bolting		
II - Good rock RMR : 61-80	Full face , 1-1.5 m advance. Complete support 20 m from face.	Locally, bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh.	50 mm in crown where required.	None.
III - Fair rock RMR : 41-60	Top heading and bench 1.5-3 m advance in top heading. Commence support after each blast. Complete support 10 m from face.	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5 - 2 m in crown and walls with wire mesh in crown.	50-100 mm in crown and 30 mm in sides.	None.
IV - Poor rock RMR : 21-40	Top heading and bench 1.0-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation, 10 m from face.	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh.	100-150 mm in crown and 100 mm in sides.	Light to medium ribs spaced 1.5 m where required.
V - Very poor rock RMR : < 21	Multiple drifts 0.5-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting.	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert.	150-200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face.	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert.

Geological Strength Index (GSI)

Pendekatan nilai *Geological Strength Index* (GSI) menggunakan empat persamaan yaitu Hoek et al (1995), Hoek et al (2013), Sunwoo & Hwang (2001), dan Qi Zhang et al (2019). Nilai GSI masing-masing batuan disajikan pada Tabel 4, Nilai GSI dapat ditentukan dari nilai RMR. Dengan rumus pada Persamaan $GSI = RMR (1989) - 5$ (Hoek, et al, 1989) . Berikut hasil nilai GSI untuk setiap materialnya pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Nilai GSI

Parameter	Diorite (Fresh)
TOTAL RMR89	92
TOTAL GSI	87

Berdasarkan Tabel 4, diatas didapatkan nilai GSI untuk batuan Diorite, sebesar 87. Berdasarkan Tabel 4 Klasifikasi *Geological Strength Index System* (Hoek et Al, 1995), untuk batuan Diorite dengan *surface conditions Good*.

Generalized Hoek-Brown

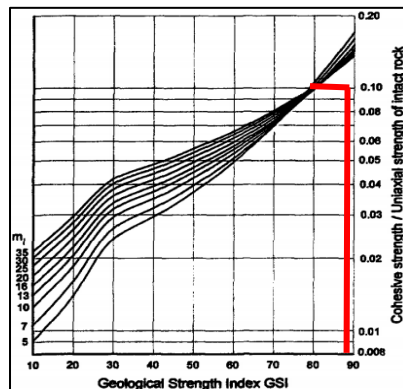
Setelah didapatkan nilai GSI, selanjutnya dilakukan perhitungan parameter Hoek-Brown untuk memperoleh nilai karakteristik kekuatan massa batuan untuk parameter input analisis balik. Parameter Hoek-Brown konstanta mb, s, dan a.

Tabel 5. Parameter Karakteristik Kekuatan Massa Batuan Menurut Hoek-Brown

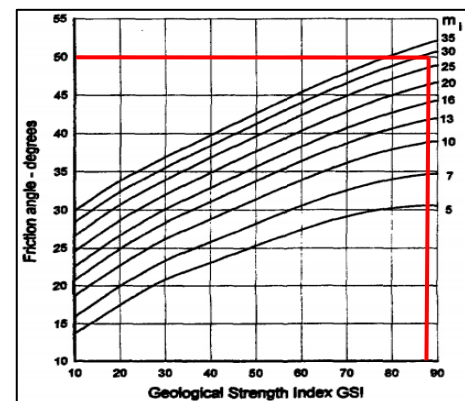
Tipe Batuan	Mi	Mb	S	a	D
Diorite	28	17.60	0.23	0.50	0

Parameter GSI-Mohr Coulomb dan Modulus Deformasi

Nilai C_m dan ϕ_m yang akan dimasukkan dalam analisis balik didapatkan dengan cara mem plot nilai m_i dan GSI melalui grafik GSI-Mohr Coulomb (Hoek 1997). Penentuan nilai C_m dan ϕ_m yang dilakukan dengan plot pada grafik GSI-Mohr Coulomb diberikan pada Gambar 3 dan 4. Dari grafik gambar 3 dan 4, didapatkan nilai C_m dan ϕ_m seperti pada Tabel 6. Dan hasil perhitungan modulus deformasi massa batuan yang ada pada Tabel 7 dibawah ini.



Gambar 3. Hasil Plot Nilai Kohesi Massa Batuan (C_m)



Gambar 4. Hasil Plot Nilai Sudut Gesek Massa Batuan (ϕ_m)

Tabel 6. Nilai C_m dan ϕ_m dari Grafik GSI-Mohr Coulomb

Tipe Batuan	GSI	Mi	Friction Angle (ϕ_m)	Cohesion, C_m	E_m	C_m/σ_{ci}	σ_{tm}	D
Diorite	87	28	50	15.65	48606.5	0.1	5.27291	0

Tabel 7. Nilai Modulus Deformasi Massa Batuan menurut Hoek & Diederichs (2006)

Tipe Batuan	Ei	GSI	D	E_m (MPa)
Diorite	52	87	0	48606.5

Scaled Distance dan Blast Load.

Scaled distance (SD) yang mengontrol getaran pada tanggal 12 April 2019 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 6, di mana penggunaan bahan peledak yang digunakan dapat pada Tabel 8.

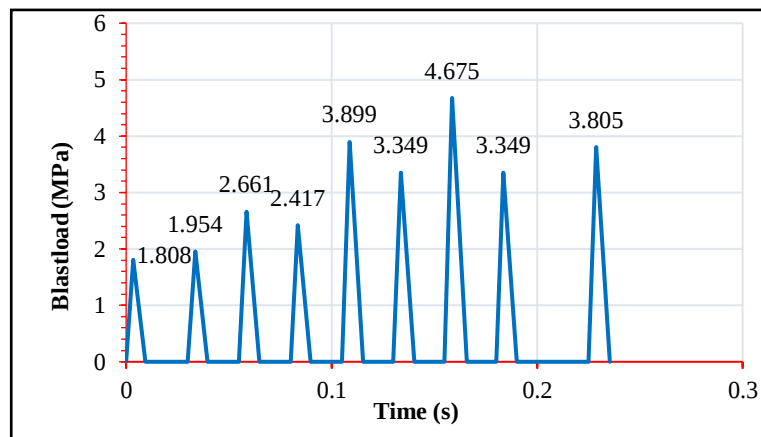
Tabel 8. Scaled Distance dan Blastload

N o	DL	WD	J L	K g	Z	P _{max}	tR	tS	start	t1	t2	Solve Time
1	0	0	1	37	0.98 6	1.80 8	0.0035 6	0.0094 0		0.003 5	0.009 4	0.030
2	30	0.03 0.05	1	39	0.96 1	1.95 4	0.0035 7	0.0095 0	0.03	0.033 5	0.039 5	30.030
3	55	5	1	48	0.86 6	2.66 1	0.0036 0	0.0099 0	0.05 5	0.058 6	0.064 9	55.055
4	80	0.08 0.10	1	45	0.89 4	2.41 7	0.0035 9	0.0097 7	0.08 0.10	0.083 0.108	0.089 0.115	80.080 105.10
5	5	5	1	62	0.80 2	3.34 9	0.0036 5	0.0102 2	5	0.133 6	0.140 4	130.13 5
6	0	0.13 0.15	1	56	0.71 2	4.67 9	0.0036 3	0.0106 1	0.13 0.15	0.158 0.158	0.165 0.165	155.15 155.15
7	5	5	1	70	0.80 7	3.34 5	0.0036 7	0.0102 7	5	0.183 6	0.190 6	180.18 5
8	0	0.18 0.22	1	56	0.76 2	3.80 9	0.0036 3	0.0103 1	0.18 0.22	0.228 0.228	0.235 0.235	225.22 225.22
9	5	5	1	61	0.98 8	1.80 5	0.0035 5	0.0094 9	5	0.003 6	0.009 3	5

Keterangan :

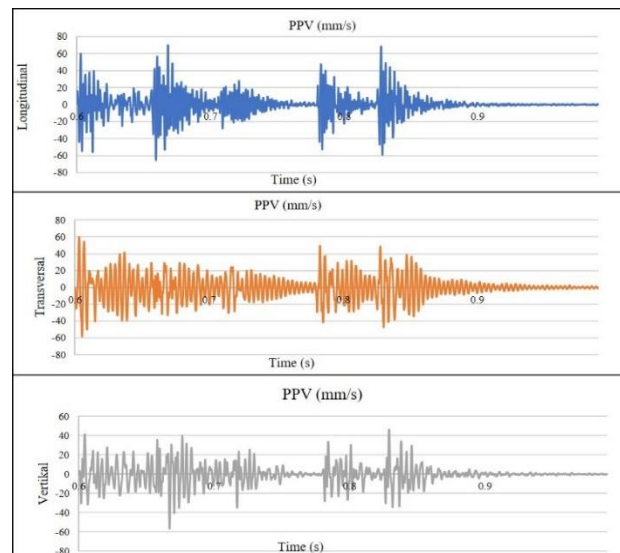
DL	=	Delay (s)	P _{max}	=	Blastload (Mpa)
WD	=	Waktu Detonasi (s)	t1	=	WD + tR
JL	=	Jumlah Lubang	t2	=	WD + tS
Z	=	<i>Scaled Distance</i>			
tS	=	Total Time of Triangele Pulse Load (s)			
tR	=	Increase Time of Triangle Pulse Load (s)			

Blast Load (Pmax) pada peledakan 12 April 2019 yang menghasilkan *peak vektor sum* (PVS) sekitar 99.45 mm/s, di mana pengukuran getaran dilakukan pada jarak ± 40 m. Summary *Scaled Distance* dan *Blastload* peledakan 12 April 2019 pada Tabel 8, dan grafik hubungan *blastload* terhadap waktu pada Gambar 5.


Gambar 5. Grafik Hubungan Blastload terhadap Waktu

Blastload Model dan PPV Aktual

Data getaran peledakan yang diukur pada tanggal 12 April 2019 menunjukkan perbedaan beberapa waktu detonasi dengan perencanaan. Skala perbandingan *blastload* model dan *Peak Particle Velocity* (PPV) aktual dibuat berdasarkan kesamaan waktu detonasi yang ada. Data hasil pengukuran getaran dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Data Hasil Pengukuran Getaran

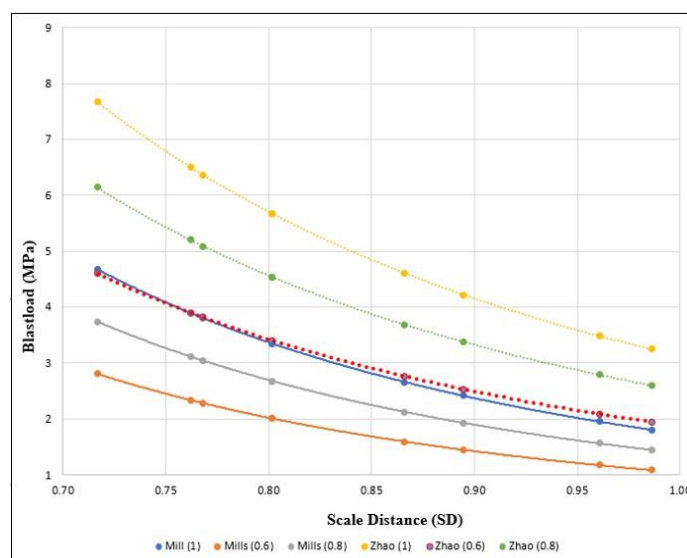
Berdasarkan data getaran peledakan diatas diketahui bahwa nomor *delay* yang digunakan berjumlah 9, di mana dilakukan digitasi ulang setiap nilai PPV tertinggi. Untuk perhitungan *blastload* menggunakan persamaan (6) Mills (1987) yang telah disesuaikan untuk memenuhi kondisi penelitian. Hasil perhitungan *blastload*, prediksi PPV disekitar terowongan dan PPV aktual yang terdapat pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil Perhitungan Blastload dan PPV Aktual

Nomor Delay	Waktu Delay (ms)	Waktu Detonasi Rencana (ms)	Blastload (MPa)	PPV Aktual (mm/s)		
				Long	Tran	Vert
1	0	0	1.81	59.79	59.56	41.42
2	30	0.03	1.95	19.26	41.30	23.49
3	55	0.055	2.66	69.9	29.17	39.67
4	80	0.08	2.42	21.78	28.06	27.27
5	105	0.105	3.90	28.01	24.15	25.51
6	130	0.13	3.35	18.01	20.42	15.12
7	155	0.155	4.68	4.94	11.16	2.27
8	180	0.18	3.35	47.56	94.47	33.4
9	225	0.225	3.81	68.42	48.36	46.17

Analisis Blastload.

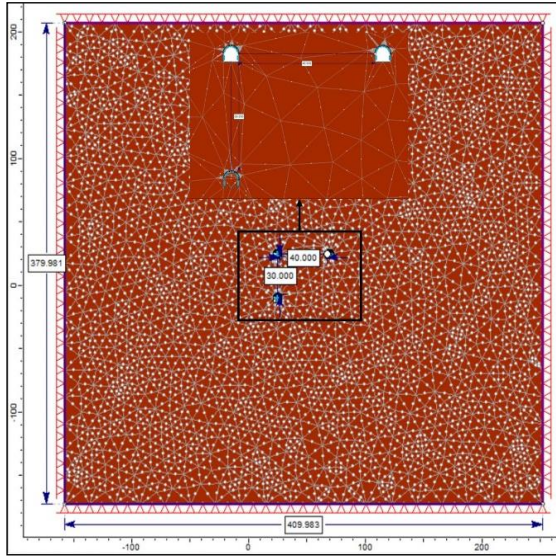
Perhitungan blastload secara empirik menggunakan dua persamaan yaitu Zhao & Wang, 2007 dan Mills, 1987. Hasil perhitungan *blastload* Zhao & Wang lebih tinggi dibandingkan Mills. Selanjutnya hasil *blastload* tersebut dijadikan input *load dynamic* dalam pemodelan untuk analisis *PPV*. Prediksi *PPV* hasil dari model *blastload* Mills lebih mendekati *PPV* aktual, sehingga juga digunakan pada pemodelan. Grafik perbedaan hasil perhitungan *blastload* terhadap *scale distance* antara persamaan Zhao & Wang dan Mills disajikan pada Gambar 7.



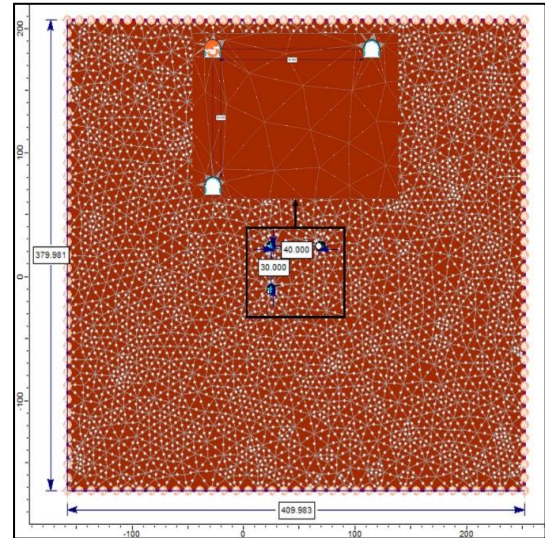
Gambar 7. Perbedaan Blastload terhadap SD antara Zhao & Wang dan Mills

Pemodelan Numerik.

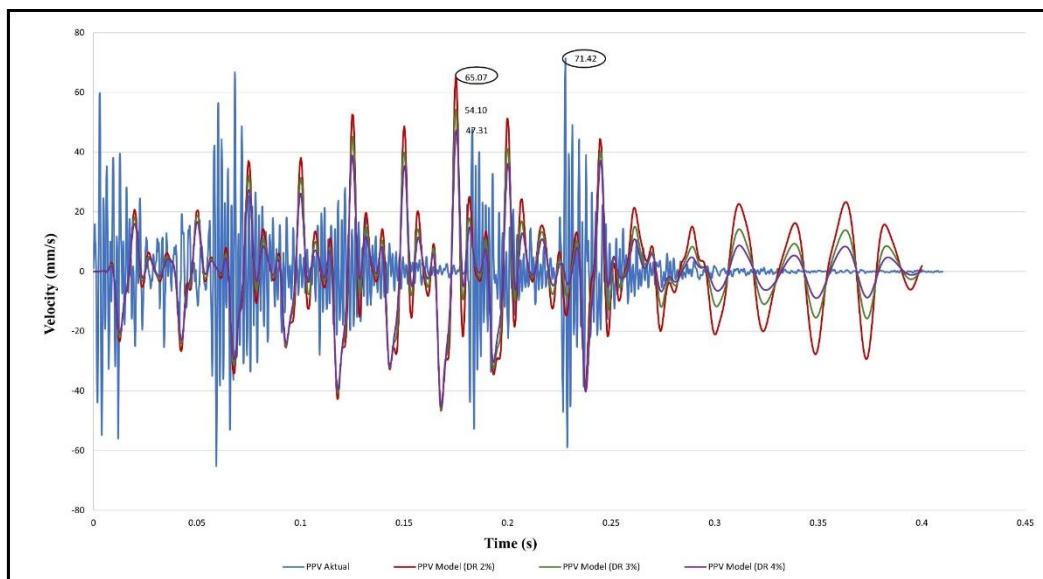
Model numerik mengikuti keseluruhan tahapan pemodelan dengan kondisi terowongan yang ada di lapangan. Variasi model juga dilakukan pada damping ratio 2%, 3%, dan 4% bertujuan untuk memperoleh kondisi model yang mendekati kondisi lapangan. Untuk input beban ledak adalah *blastload*, dengan target model adalah getaran aktual di sekitar *vibration monitoring* ± 40 meter dari titik peledakan (Gambar 8). Dan selanjutnya dilakukan analisis kestabilan pada terowongan.



Gambar 8. Kondisi Model untuk Analisa PPV

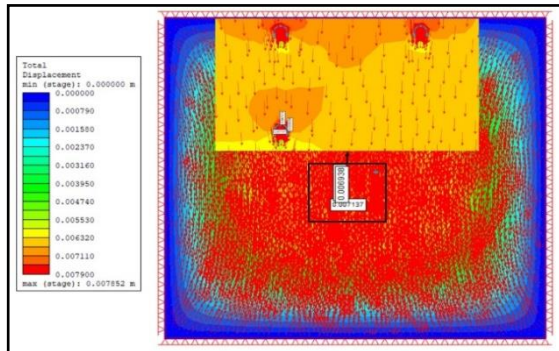


Gambar 9. Kondisi Model untuk Analisa Faktor keamanan dan Total Displacement

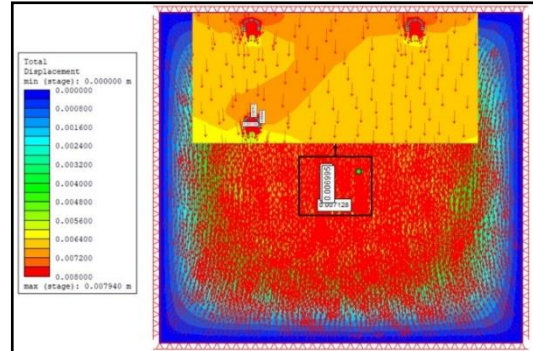


Gambar 10. Grafik PPV pada Damping Ratio 2%, 3%, 4%, dan 5% Model

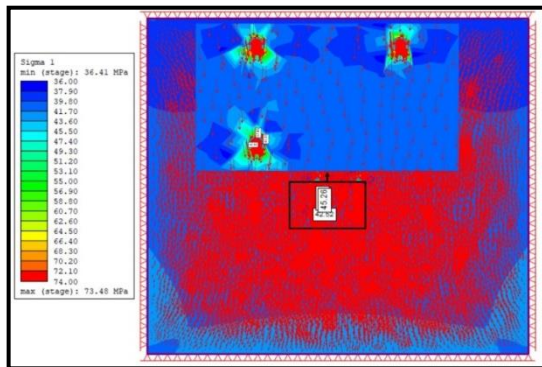
Summary Total Displacement, σ_1 , dan σ_3



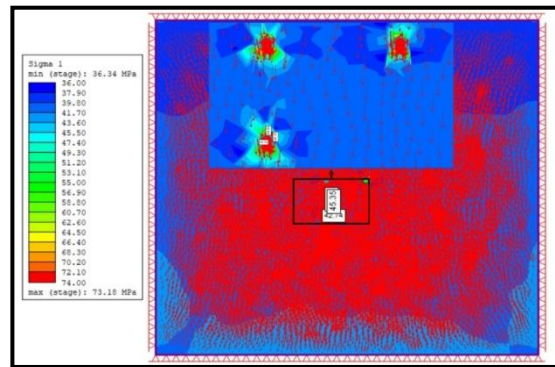
Gambar 11. Total *Displacement* sebelum peledakan



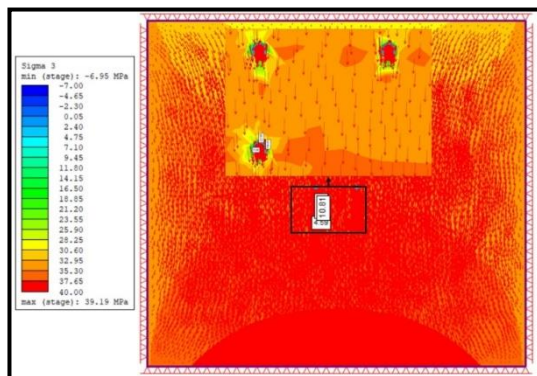
Gambar 11. Total *Displacement* setelah peledakan



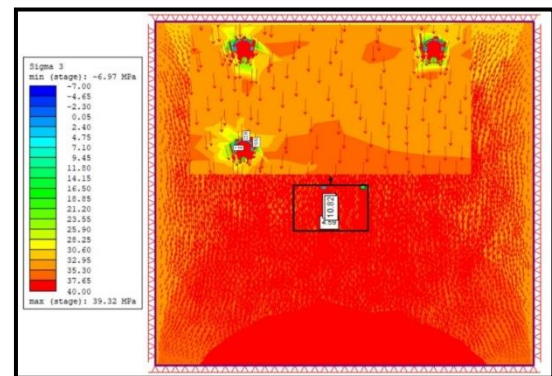
Gambar 12. σ_1 Sebelum



Gambar 13. σ_1 Setelah



Gambar 14. σ_3 Sebelum



Gambar 15. σ_3 Setelah

Summary hasil getaran, faktor keamanan, dan *total displacement* disajikan pada Tabel 10 dan 11, yang dihasilkan pada *damping ratio* 2.% pada Gambar 10.

Tabel 10. Summary Total Displacement

Total Displacement	Sebelum Peledakan (mm)	Selama Peledakan pada DR 2% (mm)	Selisih
Dinding Kiri	7.13698	7.12784	0.009
Atap	7.57211	7.61168	-0.040
Dinding Kanan	6.93800	6.99547	-0.057

Tabel 11. Summery Faktor Keamanan

FK	Sebelum Peledakan (mm)	Selama Peledakan pada DR 2.7% (mm)
Dinding Kiri	2.81	2.80
Atap	4.03	4.04

Analisis Pemodelan

Dari hasil pemodelan diperoleh *peak particle velocity (PPV)* pada masing-masing damping ratio 2%, 3%, dan 4%, adalah 65.07 mm/s, 54.10 mm/s, dan 47.31 mm/s. Berdasarkan hasil tersebut, didapatkan nilai *PPV* yang paling mendekati kondisi aktual (71.23 mm/s) adalah model *damping ratio* pada 2%. Perbedaan masing-masing *PPV* model terhadap *PPV* aktual adalah 8%, 24%, dan 33%. *PPV* tertinggi model terletak pada *delay* ke-7 di mana jumlah bahan peledak yang paling banyak digunakan sejak peledakan 12 April 2019, sedangkan *PPV* aktual berada pada *delay* ke-9.

Untuk faktor keamanan yang dihasilkan tidak ada perbedaan yang signifikan dengan kondisi sebelum peledakan. Faktor keamanan pada dinding kiri, atap, dan dinding kanan sebelum peledakan masing-masing adalah 2.81; 4.03; dan 4.45 sedangkan setelah peledakan menjadi 2.80; 4.04; dan 4.44.

Untuk total displacement sebelum peledakan masing-masing 7.136 mm; 7.572 mm; dan 6.938 mm sedangkan setelah peledakan menjadi 7.127 mm; 7.611 mm; dan 6.995 mm. Dan selisih yang diperoleh pada total displacement pada dinding kiri, atap, adalah 0,009 mm; -0,040 mm; dan -0,057 mm.

Perubahan faktor keamanan dan *total displacement* diukur pada terowongan *extraction level* (dinding kiri, atap dan dinding kanan). Untuk faktor keamanan terkecil berada pada dinding kiri terowongan 2.81 dapat dinyatakan *stable* karena secara teori umum kestabilan lebih besar dari batas kritis atau $FK > 1.5$. Untuk *total displacement* terbesar berada pada atap terowongan yaitu 7.611 mm, di mana menurut kriteria kestabilan Underground Mine Geotech PT Freeport Indonesia (2000) nilai tersebut termaksud dalam kategori *severe*.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengamatan lapangan dan hasil pengujian sifat mekanik batuan, diketahui nilai RMR di lapangan memiliki nilai sebesar 92 (*Rock Mass Class I – Very good rock*). *Peak Particle Velocity* (PPV) maksimum dari hasil pengukuran getaran peledakan adalah peledakan tanggal 29 Maret 2019 dengan jarak pengukuran 20 meter dengan nilai PPV adalah 335.02 mm/s. dan isian bahan maksimum peledak 67 kg/delay. Dari hasil pemodelan numerik ketika model diberikan *damping ratio* 2% dengan menggunakan persamaan Mills (1987) $P_{so} = \frac{1772}{z^3} - \frac{144}{z^2} + \frac{108}{z}$ maka diperoleh PPV yang paling mendekati aktual, dan untuk kestabilan terowongan *undercut* pada peledakan 12 April 2019 dalam kondisi stabil sebelum maupun setelah peledakan. Hal ini karena faktor keamanan lebih dari 1.5.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada PT Freeport Indonesia Tembagapura-Papua atas segala bantuannya baik moril maupun materil sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini.

REFERENSI

- Arora, S., and Day, K. (2010): Estimation of near-field peak particle velocity: A mathematical model. *Jurnal of geology and Mining Research* Vol. 2 (4). Pp. 68-73.
- Bieniawski, Z.T., (1989): *Engineering Rock Mass Classification, A Complete Manual for Engineers and Geologist in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. New York, Wiley-Interscience Publication.
- Call & Nicholas, Inc., (2009): *Deep Mill Level Zone (DMLZ) Geomechanical Feasibility Study*, PT. Freeport Indonesia.
- Hoek, E., Brown, E.T., (1997): *Practical Estimates of Rock Mass Strength*, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Elsevier.
- Hoek, E., Brown, E.T., (1982): *Underground Excavations in Rock*, London, UK, E&FN Spon, an imprint of Chapman & Hall.
- Hoiem, E., Nilsen, B., Olsson, R., (2019): *Main Aspect of Deformation and Rock Support in Norwegian Road Tunnels*, *Tunneling and Underground Space Technology*, Elsevier.
- PT. Freeport Indonesia. (2010): *DMLZ Mine Feasibility Study*, Arizona, PT. Freeport Indonesia.
- PT. Freeport Indonesia. (2018): *DMLZ Geotechnical, PB2 Rock Mass Classification*, PT. Freeport Indonesia.
- Grup Geologi Tambang Grasberg dan Geoteknik PTFI., (2011): *Buku Seri 1 - Geologi dan Geoteknik Tambang Terbuka Grasberg*, Divisi Tambang Terbuka Permukaan Grasberg PTFI, Jakarta,
- Kumar, R., Choudhury, D., and Bhargava, K. (2016): *Determination of Blast-induced Ground Vibration Equations for Rocks Using Mechanical and Geological Properties*. *Journal*

- of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Pp. 341-349.
- Kwang Ahn, Jae., Park, Duhee., Kwon Yoo, Jin., (2015): Estimation of damping ratio of rock mass for numerical simulation of blast induced vibration propagation, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Japan.
- Nabella, A., & Razak, S. (2023). Studi Fragmentasi Batuan Peledakan Menggunakan Metode Top Air Decking. *Jurnal Inovasi Pertambangan dan Lingkungan*, 3 (2), 54-64.
- Nicholls, H.R., Johnson, C.F., Duvall, W.I. (1971): Blasting Vibrations and Their Effects on Structures. United States Department of the Interior Bureau of Mines, Bulletin 656.
- Parida, A. and Mishra, M.K. (2015): Blast Vibration Analysis by Different Predictor Approaches – A Comparison. *Procedia Earth and Planetary Science*, Vol. 11. Published by Elsevier. Pp. 337-345.
- Persson, P.A, Holmberg, T., and Lee, J. (1992): Rock Blasting and Explosives Engineering. CRC Press. London.
- Qingguo Liang., Jie Li., Dewu Li., Erfeng Ou. (2012): Effect of Blast-Induced Vibration from New Railway Tunnel on Existing Adjacent Railway Tunnel in Xinjiang, *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, DOI 10.1007/s00603-012-0259-5.
- Qi Zhang., Xianbin Huang., Hehua Zhu., Jianchun Li. (2019): Quantitative Assessments of the Correlations between Rock Mass Rating (RMR) and Geological Strength Index (GSI), *Journal of Tunneling and Underground Space Technology*, Elsevier.
- Razak, S., Kusumaningsih, D. A., & Haryono, A. F. (2023). Studi Pemodelan Empirik Peak Particel Velocity (PPV) Tambang Bawah Tanah PT Freeport Indonesia. *Jurnal Geomine*, 11(2), 121-133.
- Rai, M.A., Wattimena, R.K., Kramadibrata, S., (2014): Mekanika Batuan. Laboratorium Geomekanika dan Peralatan Tambang. ITB. Bandung.
- Rustan, A., Naarttijarvi, T., and Ludving, B. (1985): Controlled blasting in hard interste jointed rock in tunnels. *The Canadian Institute of Mining Bulletin*. Vol.178, No.884. Pp 63-68.
- Rocscience, Inc: Quick start tutorial RS2 v.2019 Dynamic Analysis Tutorial
- Snodgrass, J.J. and Siskind, D.E. (1974): Vibration from Underground Blasting. Report of Investigation 7937, United States Department of the Interior, Bureau of Mines, USA.
- Singh, B. and Roy, P.P. (1993): Blasting in Ground Excavations and Mines. A.A. Balkema, Rotterdam. 177 p.
- Tarano, J., Rodriguez, R., Diego, I., Rivas, J.M., Casal, M.D. (2006): FEM models including randomness and its application to the blasting vibrations prediction. *Computers and Geotechnics*, Vol. 33. Pp 15-28.
- Wahyudi, S., Shimada, H., Simagunsong, G.M., Sasaoka, T., Matsui, K., Kramadibrata, S., dan Sulistianto, B. (2011): A review study of predictive model blast vibration attenuation equation by using neural network as an evaluator. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. Vol. 25. Pp. 69-85.