SIMULASI DINAMIK PELEDAKAN TEROWONGAN SECARA 3 DIMENSI MENGGUNAKAN BLAST LOAD

Afdhal Muhajir[1], Ganda Marihot Simangunsong[2], Simon Heru Prassetyo[3]
[1-3] Program Studi Magister Rekayasa Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung
e-mail: *[1]afdhal.muhajir@gmail.com, [2]ganda@mining.itb.ac.id, [3]simon@mining.itb.ac.id

ABSTRAK

Metode peledakan merupakan salah satu metode yang paling sering digunakan untuk memberaikan batuan keras pada operasi penggalian, khususnya pada penggalian bawah tanah. Metode ini menghasilkan energi dari bahan peledak yang ditransmisikan kedalam masa batuan sehingga batuan tersebut terberaikan. Namun, selain memberikan efek hancuran pada batuan, energi ini juga menimbulkan efek yang kurang menguntungkan. Salah satu diantaranya adalah dihasilkannya getaran tanah. Getaran tanah merupakan salah satu efek peledakan yang harus diperhatikan yang dapat menimbulkan dampak ke masyarakat serta infrastruktur di sekitarnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui gelombang getaran yang dihasilkan dari peledakan pada jarak tertentu. Pengukuran getaran menggunakan alat ukur *Minimate Plus* yang akan diletakan di sekitar peledakan. Simulasi tiga dimensi dengan software Rocscience 3 dilakukan dengan memberikan blast load pada perimeter terowongan sesuai dengan jumlah bahan peledak yang digunakan per satuan waktu untuk mendapatkan gelombang dari segala arah.

Kata-kata kunci*:* getaran peledakan, simulasi tiga dimensi, *scaled distance*, gelombang.,

PENDAHULUAN

Proyek pembangunan Kereta Cepat Jakarta Bandung melewati 11 Gunung atau Bukit yang kemudian dilakukan penerowongan untuk mendapatkan lintasan kereta cepat tersebut, salah satunya berlokasi di area Gunung Bohong yaitu Terowongan 11. Lokasi ini berada di Kecamatan Padalarang, Kabupaten Bandung Barat, terowongan tersebut akan direncanakan memiliki panjang 1,1 km.

Penggalian Terowongan 11 menggunakan metode penggalian mekanis untuk batuan yang relatif lemah (*silty clay* dan *gravelly clay*) dan metode peledakan untuk batuan yang relatif keras (breksi dan andesit). Metode ini menghasilkan energi dari bahan peledak yang ditransmisikan kedalam masa batuan sehingga batuan tersebut terberaikan. Namun, selain memberikan efek hancuran pada batuan, energi ini juga menimbulkan efek yang kurang menguntungkan. Salah satu diantaranya adalah dihasilkannya getaran tanah.

Masalah getaran tersebut dipengaruhi oleh banyaknya bahan peledak yang meledak bersamaan (*charge per delay*) dan jarak dari lokasi peledakan. Getaran tanah yang melebihi nilai ambang batas dapat menimbulkan dampak negatif terhadap keadaan di sekitar lokasi peledakan

Penelitian ini merupakan pengembangan dari penelitian sebelumnya yaitu analisis secara 2 dimensi yang hasilnya tidak representatif dan terbatas pada dua arah gelombang , maka dilakukan pemodelan secara 3 dimensi (3D) menggunakan software RS3 lebih representatif dengan mendapatkan pengaruh PPV dari tiga gelombang agar mendekati aktual.

METODOLOGI

Lokasi Penelitian

Lokasi peledakan di Terowongan 11 Kereta Cepat Jakarta Bandung yang berada di area Gunung Bohong,. Jarak lokasi peledakan dengan pemukiman sekitar 150 meter. Terowongan didominasi batuan keras yaitu Andesit sepanjang ±750 m dan Breksi sepanjang ±90 m dan sisanya batuan lemah seperti *clay, gravelly clay* dan *tuff sandstone.* (lihat Gambar-1).

Karakterisktik Massa Batuan

Karakteristik massa batuan didapatkan melalui pemboran geoteknik, hasil dari pemboran kemudian kemudian diuji di laboratorium untuk mendapatkan parameter fisik dan mekanik seperti ditunjukan pada (Tabel-1). Parameter ini kemudian digunakan sebagai masukan untuk simulasi tiga dimensi.

Tabel-1. Parameter Massa Batuan

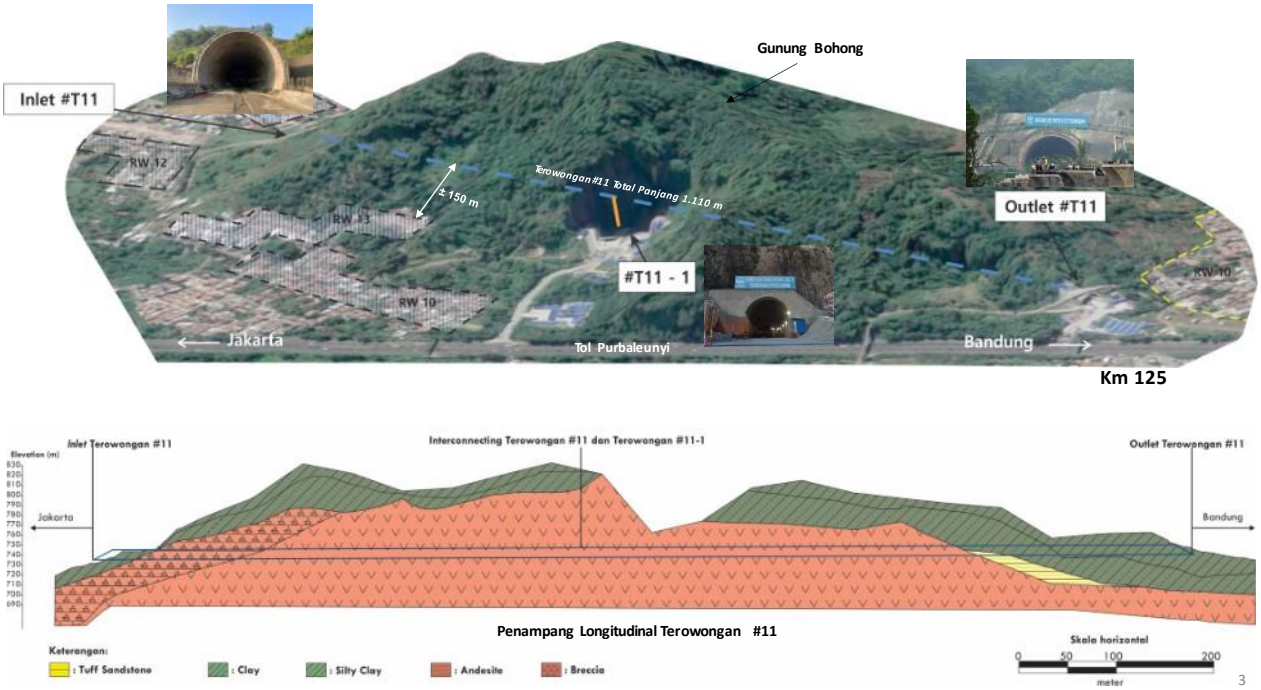
Parameter	*Silty clay*	*Gravelly clay*	*Andesit*	Satuan
RQD	-	-	70	%
ρ	1,668	1,668	1,973	kg/m^3
σ_c	0,08	0,35	37,39	MPa
E	0,09	50	4,924	MPa
v	0,30	0,30	0,21	-
c	0,05	0,1	12,74	MPa
Φ	7,9	30	32,04	...^{o}
σ_t	0	0,035	2,57	MPa
K	4	42	2.885	MPa
G	2	19	2.025	MPa

Peak Particle Velocity

Parameter getaran merupakan sifat dasar dari gerakan yang digunakan untuk menguraikan karakter dari gerakan tanah. Apabila gelombang seismik melalui batuan, maka partikel batuan bergetar atau berpindah dari posisi semula. Apabila partikel berpindah, maka partikel tersebut mempunyai kecepatan dan percepatan. Nilai puncak dari perpindahan kecepatan dan percepatan secara berurutan biasanya disebut sebagai *Peak Particle Displacement* (PPD), *Peak Particle Velocity* (PPV) dan *Peak Particle Acceleration* (PPA)

Tekanan Peledakan (*Blast load*)

Tekanan puncak ledakan yang diterima oleh perimeter terowongan biasanya disebut *blast load*. Besarnya *blast load* sangat dipengaruhi dari jumlah bahan peledak dan area peledakan (*blasting face)*, mengikuti persamaan Mills (1987) sebagai berikut:



Gambar-1. Lokasi Penelitian dan Penampang Longitudinal

$$Pmax = 5{,}8\left(\frac{1772}{Z^3} - \frac{144}{Z^2} + \frac{108}{Z}\right) \quad (1)$$

Nilai Z merupakan fungsi dari jari-jari ekivalen area peledakan (blasting face;r) dan muatan bahan peledak per delay (Q)

$$Z = \frac{Q}{\bar{r}^{1/3}} \quad (2)$$

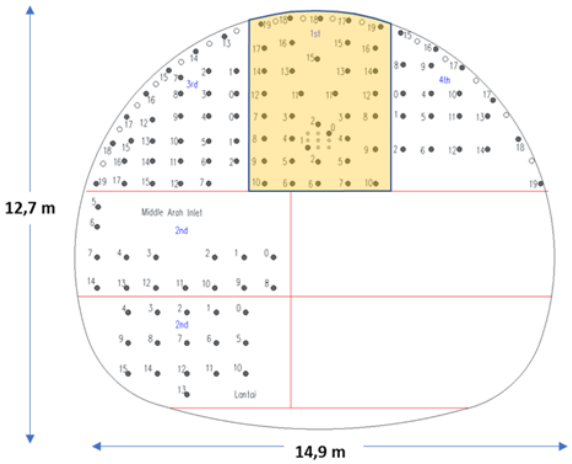
Waktu pertambahan beban peledakan (t_R) dan total waktu (t_S) dari segitiga yang bekerja dapat dihitung dengan dengan persamaan berikut Wang (1984).

$$t_R = \frac{12\sqrt{r^{2-\mu}}Q^{0,05}}{K} \quad (3)$$

$$t_S = \frac{84\sqrt[3]{r^{2-\mu}}Q^{0,2}}{K} \quad (4)$$

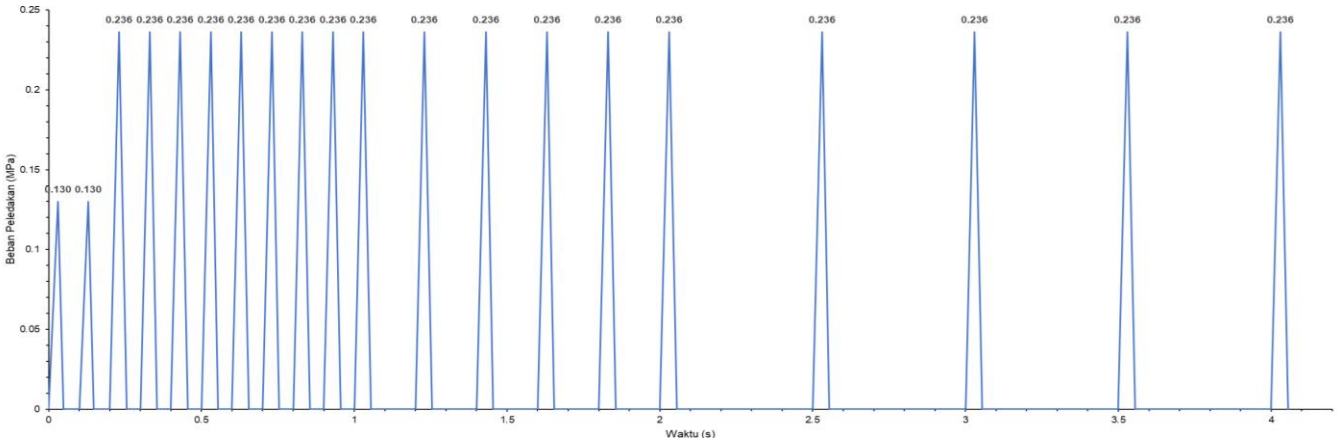
$$r = \frac{\bar{r}}{a} \quad (5)$$

Dimana a adalah jari-jari lubang ledak (m), $\bar{r}$ adalah jari-jari ekivalen area peledakan (blasting face), μ adalah nisbah *poisson*,



Gambar-2. Desain Peledakan

Lokasi peledakan dilakukan pada bagian *Top Heading Center*. Dimana digunakan waktu detonasi 0 ms sampai 4000 ms , jari-jari ekivalen ke perimeter 2,35 m. Tekanan puncak peledakan (blast load) ditentukan dengan banyaknya bahan peledak per delay. Gambar-3 menunjukan kurva hubungan antara blast load terhadap waktu.



Gambar-3. Kurva beban peledakan terhadap waktu

Matrik Redaman

Matriks redaman (*damping matrix*) dapat dimodelkan dengan menggunakan formulasi Rayleigh damping. Model tersebut merupakan kombinasi antara matriks massa dan matriks kekakuan.

$$[C] = \alpha\,[\mathrm{M}] + \beta\,[\mathrm{K}] \qquad (6)$$

Dimana α, β adalah konstanta Rayleigh, matriks massa [M], dan matriks kekakuan [K]. Nilai konstanta Rayleigh dapat berubah tergantung dari sifat redaman energi dari material. Dapat dikalkulasikan dengan formula sebagai berikut :

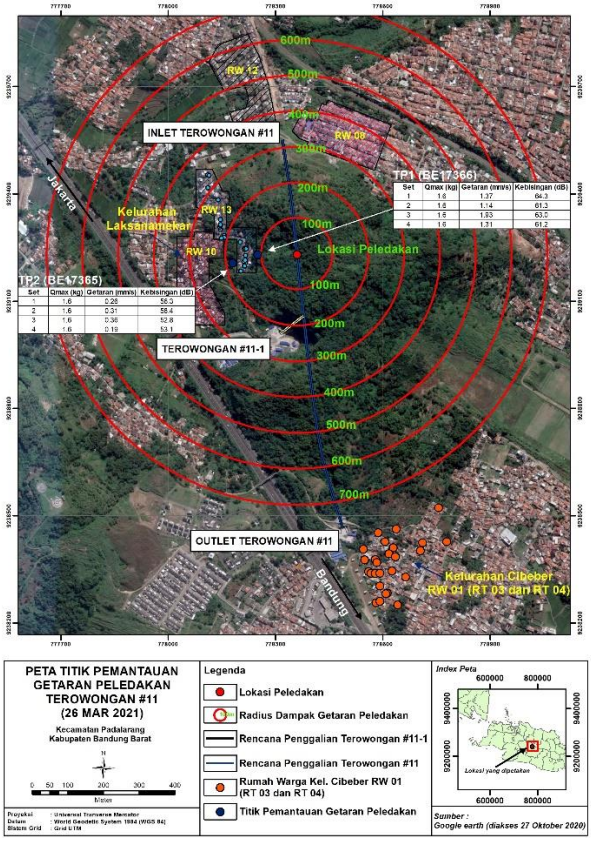
$$\alpha = \frac{(2\,\omega_1\omega_2)/\xi_1\omega_2 - \xi_2\omega_2}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \qquad (7)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_1\omega_2 - \xi_2\omega_2)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \qquad (8)$$

Nilai frekuensi getaran peledakan yang terendah ω_1 dan frekuensi getaran peledakan tertinggi ω_2 , nilai ini didapatkan dari frekuensi hasil dari alat getaran yaitu 75-85 Hz. Sedangkan untuk rasio redaman ξ_1, ξ_2 biasanya ditentukan melalui uji penelitian, sebagai gantinya penelitian ini digunakan nilai 0,01 sampai 0,05 karena kekuatan massa batuan relatif tinggi.

Data Pemantauan Getaran

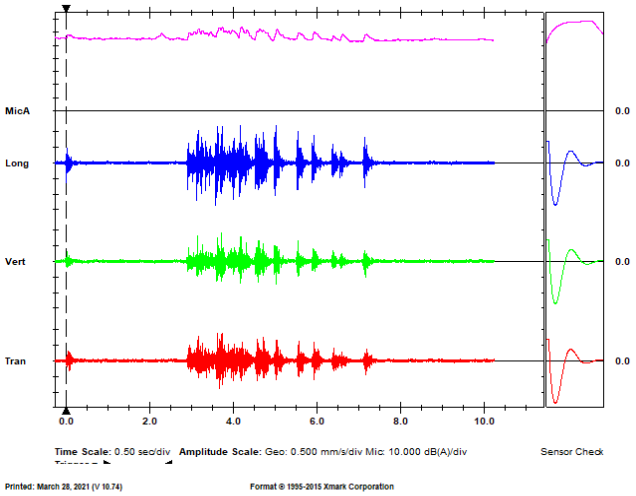
Alat yang digunakan yaitu alat ukur *Minimate Plus*. Alat getaran ini dapat menerima gelombang getaran yang merambat dan kebisingan yang terjadi pada saat kegiatan peledakan. Gelombang getaran diterima oleh sensor-sensor yang terdapat di dalam *geophone* serta kebisingan udara diterima oleh *microphone ambience*. Hasil yang diterima oleh *geophone* dan *microphone* tersebut kemudian ditampilkan dalam bentuk data di monitor seismograf.



Gambar-4. Peta titik getaran peledakan

Peledakan dilakukan dengan waktu tunda yang telah ditentukan dan dibagi menjadi 4 Set yaitu bagian pada *Top Heading* 3 Set dan *Benching* 1 Set. Pembagian ini berguna untuk mengurangi lubang yang meledak bersamaan agar getaran tanah lebih kecil. Data yang digunakan penelitian ini yaitu TP1 pada set 1. Lokasi pemantauan dapat dilihat (Gambar-4).

Setelah selesai melakukan pengukuran getaran, data hasil pengukuran diunduh dari *Minimate* menggunakan software *Blastware* untuk mengetahui hasil getaran per-eventnya. Pada event ini terekam gelombang longitudinal, vertikal dan transversal (Gambar-5).



Gambar-5. *Event Report* di Software *Blastware Instantel*

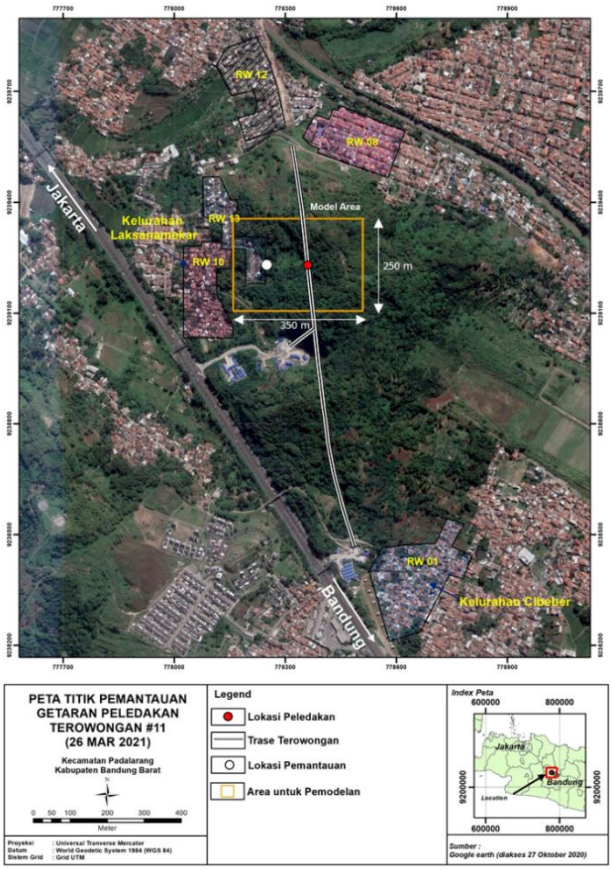
Tabel-2. Hasil Pemantauan Getaran

Alat	Set	Jarak (m)	PPV (mm/s)			PVS (mm/s)	Frekuensi (Hz)		
			Tran	Vert	Long		Tran	Vert	Long
BE17366	1	110	0.89	0.92	1.35	1.37	85	73	85
BE17366	2	193	0.92	0.87	1.08	1.14	64	73	85
BE17366	3	110	1.27	0.98	1.76	1.93	57	73	85
BE17366	4	110	0.75	0.43	1.16	1.31	73	100	85
BE17365	1	181	0.25	0.1	0.14	0.26	57	37	28
BE17365	2	231	0.19	0.13	0.25	0.31	73	51	37
BE17365	3	181	0.33	0.1	0.19	0.36	37	51	64
BE17365	4	181	0.18	0.1	0.11	0.19	37	51	85

Simulasi Tiga Dimensi (3D)

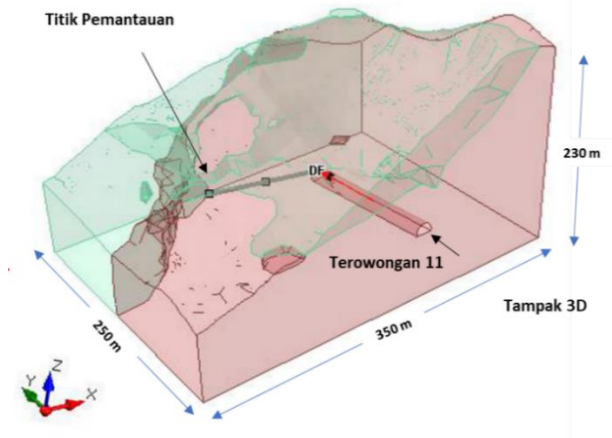
Kondisi dan bentuk Terowongan 11 dimodelkan secara tiga dimensi (3D) menggunakan bantuan perangkat lunak Rocscience yaitu RS3 dengan *Finite Element Methode* (FEM). Pemodelan akan dibuat berdasarkan kondisi area pada peledakan tanggal 26 maret 2021 (Gambar-6). Tahapan yang dilakukan untuk membuat dan mengontrol sistem pemodelan sehingga dapat mendekati kondisi di lapangan, antara lain :

- Kondisi Batas Geometri
- Input Damping Ratio dan frekuensi
- Kondisi Batas Regangan
- Menentukan *Distribution Load*
- Diskretisasi
- Kondisi Batas Dinamik
- Kondisi Pembebanan



Gambar-6. Peta titik pemantauan dan area pemodelan

Pada geometri terowongan model dibuat sama dengan geometri aktual dengan tinggi 12,7 m dan lebar 14,9 m dengan bentuk tapal kuda. Pada geometri eksternal dilakukan pemodelan dengan panjang 350 m, lebar 250 m dan tinggi 230 m. (Gambar-7).

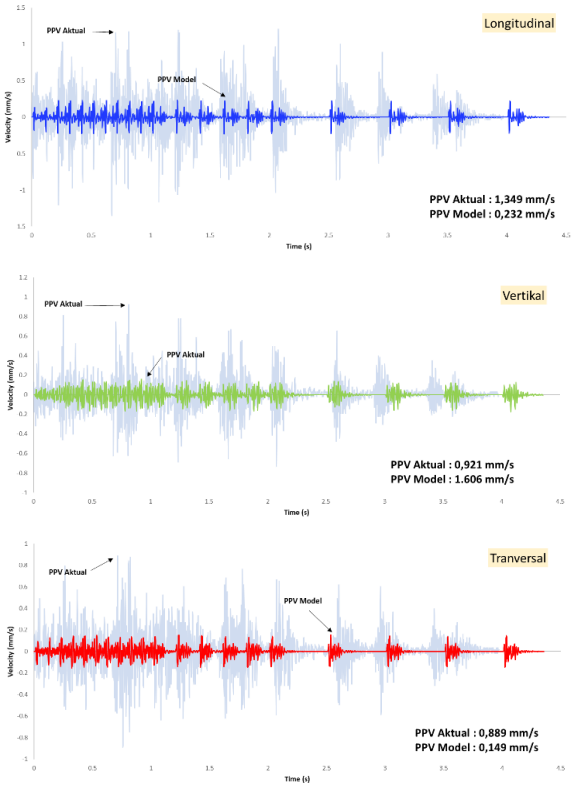


Gambar-7. Geometri ekstenal pada model RS3

HASIL DAN DISKUSI

Perbandingan dengan Hasil Getaran aktual dengan getaran model

Nilai dari perhitungan blastload dari persamaan original Mills, 1987 dimasukan kedalam simulasi pemodelan tiga dimensi. Hasil yang didapat dari persamaan Mills original belum mendapatkan hasil gelombang yang sesuai dengan aktual. Gambar-8 menunjukan gelombang getaran hasil simulasi menggunakan persamaan Mills (1987).

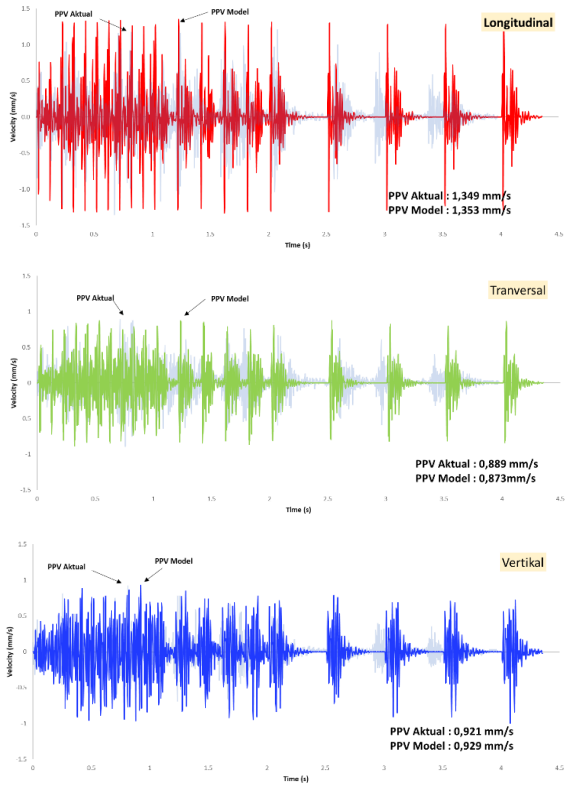


Gambar-8. Hasil Getaran di Simulasi Model 3D (Original)

Koreksi koefiesien *Blast Load* terhadap model

Dilakukan koreksi koefisien blastload untuk mencari nilai PPV maksimum model yang sesuai PPV maksimum aktual. Berdasarkan hasil pemodelan pada (Gambar-9) nilai faktor koreksi untuk PPV model adalah 5,8 sehingga persamaan blastload menjadi :

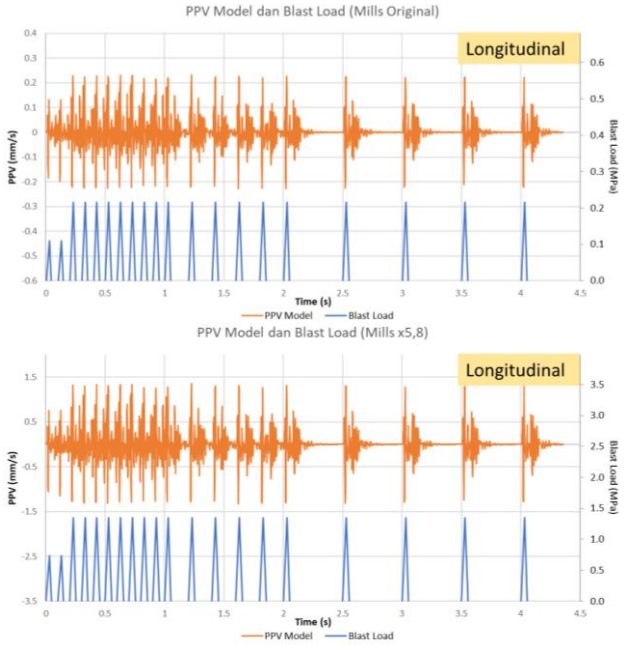
$$Pmax = 5{,}8\left(\frac{1772}{Z^3} - \frac{144}{Z^2} + \frac{108}{Z}\right) \quad (9)$$



Gambar-9. Hasil Getaran di Simulasi Model 3D (Mills 5,8x)

Hubungan Blast load dengan PPV

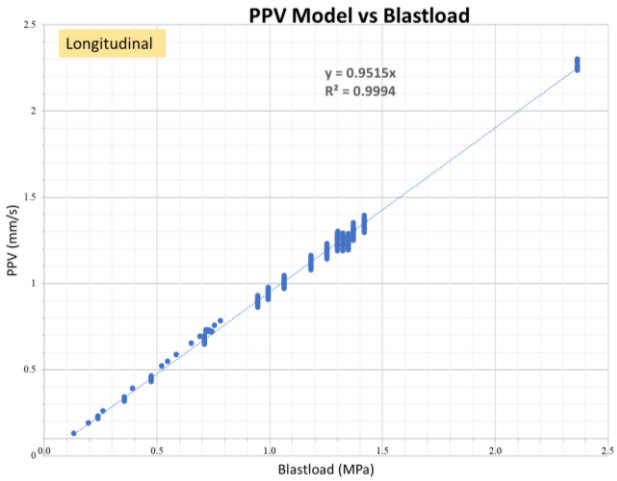
Untuk input beban ledak pada pemodelan numerik digunakan data blastload dan PPV di perimeter terowongan. Hubungan blastload dan getaran model pada (Gambar 8) :



Gambar-10. Hubungan Blast Load dengan PPV

Diketahui bahwa hasil pemodelan tiga dimensi, yang dimasukan nilai blastload yang telah dikoefisien atau dikalikan maka semakin besar nilai getaran PPV nya.

Berdasarkan regresi linear terhadap persamaan PPV dan blast load pada (Gambar-11) menunjukkan bahwa blastload dapat digunakan untuk memprediksi getaran peledakan yang menghasilkan nilai PPV yang sesuai dengan prediksi getaran.



Gambar-11. Perbandingan PPV dengan Blastload

Standar Koefisien Korelasi

Hubungan antara nilai PPV aktual dan PPV model dilakukan dengan analisis menggunakan standar error estimasi dari nilai PPV aktual dan nilai PPV modelnya: Nilai standar error estimasi pada gelombang longitudinal didapatkan (0,025), gelombang tranversal didapatkan (0,073) dan vertikal didapatkan (0,148).

Tabel-3. Standar Eror Estimasi

Longitudinal			
Waktu Detonasi	**Aktual**	**Model (Mills 5,8x)**	**Standar Eror Estimasi**
0	0,095	0,760	0,0256
0,1	0,841	0,757	
0,2	1,206	1,318	
0,3	0,968	1,302	
0,4	0,889	1,330	
0,5	0,714	1,308	
0,6	1,349	1,332	
0,7	1,159	1,339	
0,8	1,175	1,261	
0,9	0,556	1,251	
1	1,159	1,276	
1,2	1,191	1,353	
1,4	0,825	1,301	
1,6	0,984	1,311	
1,8	0,587	1,270	
2	1,206	1,314	
2,5	1,000	1,301	
3	0,889	1,282	
3,5	0,587	1,283	
4	0,460	1,287	

KESIMPULAN

Nilai PPV model mendekati PPV aktual ketika blast load dari persamaan Mills dikoreksi dengan nilai 5,8 menggunakan nilai rasio redaman 2% serta frekuensi peledakan 73 – 85 Hz. Verifikasi model dari kegiatan peledakan Terowongan 11 didapatkan nilai PPV aktual dan model dengan Standar Error Estimasi longitudinal 0,025 , Tranversal 0,077 dan Vertikal 0,148.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada KCIC, CREC dan kepada semua pihak yang terlibat dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Hoek, E., dan Brown, E.T., (1980) : *Underground Excavation in Rocks. The Institution of Mining and Metallurgy*. London

[2] Kwang Ahn, Jae., Park, Duhee., Kwon Yoo, Jin., (2015): Estimation of damping ratio of rock mass for numerical simulation of blas induced vibration propagation, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, Japan.

[3] Nikishkov. G. P., (2001) : *Introduction to Finite Element Method*. University of California Los Angeles

[4] 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