

ANALISA DINAMIK PENGARUH PELEDAKAN TERHADAP KESTABILAN TEROWONGAN NANJUNG

Dynamic Analysis of Blasting Effect on Nanjung Tunnel Stability

Alio Jasipto^{1*}, Nuhindro Priagung Widodo², Ganda Marihot Simangunsong³, Simon Heru Prasetyo⁴, Made Astawa Raji⁵, Dhika Noor Pradhana⁶, Dimas Agung Saputra⁷

^{1,2,3,4,5}Prodi Rekayasa Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung, Bandung 40132, Indonesia.

^{6,7} PT. Wijaya Karya (Persero) Tbk, Proyek Pembangunan Terowongan Nanjung, Kabupaten Bandung

Artikel masuk : 15-02-2020, Artikel diterima : 07-07-2020

Kata kunci:

Prediksi Velocity, Blastload, Model Numerik, dan Kestabilan Terowongan

Keywords:

Velocity Prediction, Blastload, Numerical Model, and Tunnel Stability

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa secara dinamik terhadap peledakan yang dilakukan di terowongan Nanjung. Terowongan Nanjung merupakan terowongan kembar yang berpenampang tapal kuda dengan masing-masing terowongan berdimensi 10,2 m x 9,2 m, dan memiliki panjang 230 meter. Batuan penyusun pada terowongan ini antara lain silty clay, sandstone, dan dacite. Peledakan dilakukan pada salah satu terowongan yang terdiri dari batuan dacite, memiliki RQD 75-90% dan UCS 49-61 MPa. Saat peledakan berlangsung dilakukan juga pengukuran PPV di beberapa titik disekitar terowongan menggunakan minimate unit.

Analisa dinamik dilakukan dengan cara membangun model Terowongan Nanjung pada software RS2 dengan metode elemen hingga. Input data pada pemodelan ini diusahakan mendekati kondisi aktual dilapangan, seperti geometri terowongan, properties massa batuan, dan rencana peledakan yang dilakukan pada STA 30-32 terowongan 2. Pemodelan ini diharapkan menghasilkan PPV yang mendekati PPV aktual dan hasil model ini akan dilanjutkan ke analisa kestabilan terowongan 1.

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa kondisi terowongan 1 dalam keadaan stabil selama peledakan berlangsung. Stabilitasnya terowongan 1 berdasarkan *strength factor* terkecil dibagian atap berkisar 2,6. Kestabilan juga dilihat dari strain level pada batuan dacite dan sandstone yaitu 0,07 % dan 0,38 %. Strain level tersebut masih diperbolehkan menurut diagram strain level Sakurai, 1983.

*Penulis Koresponden: alio.jasipto@gmail.com

Doi : <https://doi.org/10.36986/impj.v2i1.17>

ABSTRACT

This study aims to dynamically analyze blasting conducted in the Nanjung tunnel. Nanjung Tunnel is a twin tunnel that has a horseshoe-shaped section with each tunnel having a dimension of 10.2 m x 9.2 m, and 230 meters in length. The layers rock of this tunnel include silty clay, sandstone and dacite. Blasting was carried out on one of the tunnels consisting of dacite rock, having a 75-90% RQD and UCS 49-61 MPa. During the blast, PPV measurements were taken at several points around the tunnel using a minimize. Dynamic analysis is done by building a Nanjung Tunnel model on the RS2 software with the finite element method. Input data in this modeling is endeavored to approach actual conditions in the field, such as tunnel geometry, rock mass properties, and blasting plans carried out at STA 30-32 tunnels 2. This modeling is expected to produce PPV that is close to actual PPV and the results of this model will be continued to the stability analysis tunnel 1. Modeling results indicate that the tunnel 1 condition is stable during blasting. The stability of tunnel 1 based on smallest strength factor on the roof is around 2.6. Stability also seen from the strain level in dacite and sandstone rocks which are 0.07% and 0.38%. These strain levels are still permissible according to the Sakurai strain level diagram, 1983.

PENDAHULUAN

Terowongan Nanjung merupakan terowongan kembar pengelak air Nanjung yang berada di kawasan hulu Citarum di Curug Jompong, Kecamatan Margaasih, Kabupaten Bandung. Terowongan ini mulai dibangun pada April 2018 hingga selesai pada Desember 2019. Pembangunan terowongan Nanjung merupakan salah satu dari 16 proyek penanganan banjir Daerah Aliran Sungai Citarum. Pengelolaan proyek ini berada pada SNVT Pelaksanaan Jaringan Sumber Air Balai Besar Wilayah Sungai Citarum, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR).

Terowongan ini berpenampang tapal kuda yang berdimensi 10,2 m x 9,2 m, dan total panjang 230 m. Pengerjaannya dilakukan oleh PT. Wijaya Karya dan PT. Adhi Karya atau WIKA-ADHI (KSO). Untuk pekerjaan penggalian terowongan diawasi oleh konsultan supervisi dari PT. Virama Karya Supraharmonia (KSO), dan PT. Patria Karya Persada untuk pelaksanaan pemboran dan peledakan.

Metode penggalian terowongan dilakukan secara mekanis dan peledakan, untuk penggalian mekanis menggunakan *twin-header* pada material lunak yaitu kombinasi *silty clay* dan *sandstone* dengan RQD 25-75% dan UCS 2-6 MPa. Metode pemboran dan peledakan dilakukan pada material *dacite* cukup keras dengan RQD 75-90 % dan UCS 49-61 MPa. Penggalian mekanis dimulai dari *outlet* hingga sepanjang ± 190 meter sedangkan pemboran dan peledakan dilakukan sepanjang ± 40 meter yang dimulai dari *inlet*.

Peledakan dilakukan pada batuan *dacite* yang merupakan batuan beku yang cukup keras, akan tetapi kondisi batuan yang ditemukan di lapangan tidak semuanya *fresh*, ditemukan di beberapa lokasi batuan yang terlapukan. Berdasarkan penelitian sebelumnya bahwa jika dilakukan penggalian mekanis secara bersamaan pada kedua terowongan akan tetap aman (Udy Hartadi, 2019). Selanjutnya akan melihat pengaruh kestabilan dari efek peledakan jika salah satu terowongan telah dilakukan penggalian.

Kestabilan terowongan dapat dikatakan aman dari pengaruh peledakan jika hasil perhitungan faktor keamanan (*FK*) sebelum dan setelah peledakan tidak jauh berbeda. Batasan menurut teori pada umumnya $FK > 1$, akan tetapi untuk terowongan Nanjung tidak dapat menerapkan sepenuhnya batasan $FK > 1$, hal ini dikarenakan kondisi material yang cukup beragam (*silty clay*, *sandstone*, dan *dacite*). Selain *FK*, akan dihitung *total strain* yang terjadi setelah peledakan pada setiap material. Batasan *total strain* dalam kondisi aman akan mengacu pada *strain level diagram* Sakurai, 1983.

METODE

Pengukuran *peak particle velocity* (PPV) di lapangan menggunakan *minimate unity* yang merupakan produk dari perusahaan *InstanTel*, Canada. Lokasi *minimate* diletakkan pada jarak ± 50 meter dari peledakan (gambar 1), lokasi ini dipilih karena dijadikan kontrol terhadap batasan getaran pada konstruksi bangunan (*boiler*). Batasan ini telah dianalisa dengan pendekatan getaran yang dihasilkan oleh alat berat *rock breaker* (0,7-2 mm/s).



Gambar 1. Lokasi boiler dan jarak terhadap peledakan

Setiap hasil pengukuran getaran peledakan menggunakan *minimate* menghasilkan rekaman PPV (mm/s), frekuensi (hz), waktu (s), dan suara (dB) yang diunduh menggunakan program *blastware*. Pada penelitian ini akan berfokus pada analisa stabilitas terowongan dari hasil pengamatan peledakan tanggal 24 Mei 2019 di STA 30-32 di area *inlet*. Perhitungan stabilitas terowongan dilakukan dengan metode numerik menggunakan software RS2 2019 (*academic lisence*). Hasil perhitungan model numerik

berupa *y-velocity* (mm/s) akan diverifikasi dengan mendekati hasil pengukuran PPV(mm/s) aktual.

Data properties batuan yang diperoleh dari uji laboratorium dan pengamatan GSI secara langsung akan dihitung dengan persamaan empiris *Hoek, Kaiser, dan Bawden* (1995) untuk mendapatkan *Modulus Young* massa batuan (E_m). Untuk properties 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 batuan dijadikan sebagai input untuk membangun model numerik dengan menggunakan kriteria keruntuhan *Mohr Coulumb*.

Data input *dynamic load* pada model numerik berkaitan dengan data peledakan seperti *damping ratio* (ζ), frekuensi, jumlah bahan peledak dan *delay* yang digunakan. Nilai *damping ratio* akan menggunakan metode *trial and errors* sampai *y-velocity* mendekati PPV aktual. *Damping ratio* sangat berpengaruh terhadap perubahan *velocity* dalam software RS2, dimana persamaan sistem dinamik yang digunakan seperti pada persamaan berikut.

$$[M] \left(\frac{d^2x}{dt^2} \right) + [C] \left(\frac{dx}{dt} \right) + [K](x(t)) = F_{stat} + F_{dyn} \quad (1)$$

Keterangan :

- $x(t)$ = Perpindahan sebagai fungsi waktu
- [M] = Matriks massa
- [C] = Matriks damping
- [K] = Matriks stiffness

Jumlah bahan peledak dan *delay* digunakan untuk membuat *triangle blastload* dengan menggunakan persamaan Mills (1987) sebagai berikut :

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

$$Z = R/W^{1/3} \quad (3)$$

Keterangan :

- P_{so} = *blastload* (kPa),
- Z = *scaled distance*.

Persamaan (2) akan disesuaikan dengan cara mengubah konstantanya hingga *y-velocity* model mendekati PPV aktual. *Scaled distance* merupakan perbandingan jumlah bahan peledak dan jarak

pengaruh terhadap sumber peledakan. Selanjutnya *triangle blastload* dibuat menggunakan persamaan Wang (1984) untuk mendapatkan *increasing time* (t_R) dan *total time* (t_S).

$$t_R = \frac{12 \sqrt{r^2 - \mu} Q^{0,05}}{K} \quad (4)$$

$$t_S = \frac{84 \sqrt[3]{r^2 - \mu} Q^{0,02}}{K} \quad (5)$$

$$r = \frac{\bar{r}}{a} \quad (6)$$

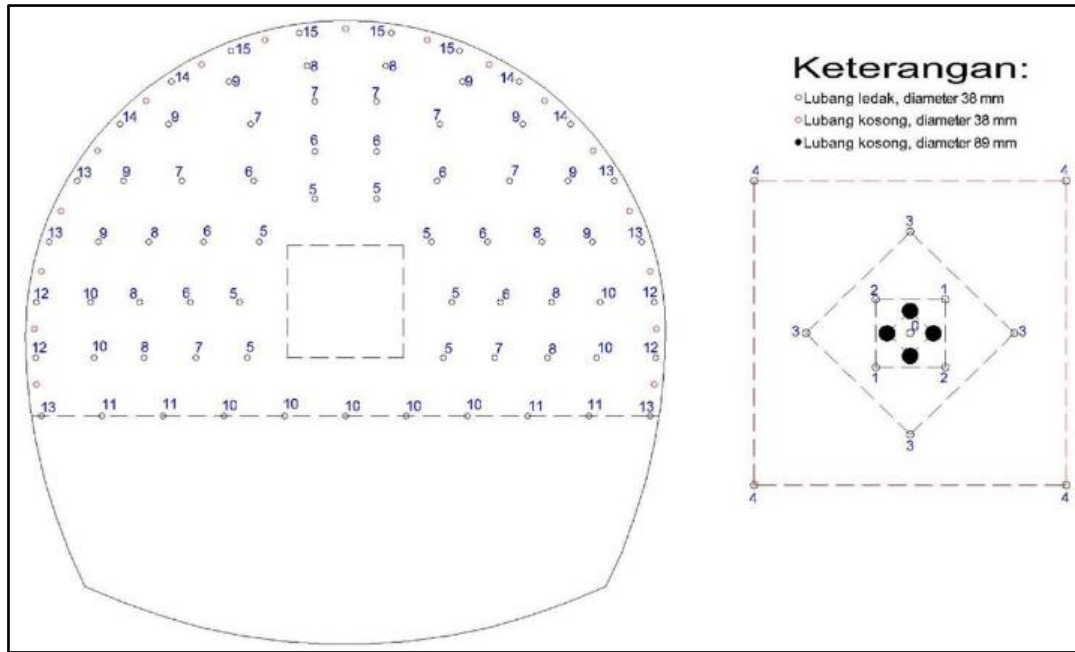
Keterangan :

- K = *modulus bulk* (Pa),
- Q = jumlah bahan peledak/delay (kg)
- μ = *poisson's ratio*,
- a = *borehole radius* (m),
- \bar{r} adalah *acting radius of the blasting load* (m).

Damping ratio (%) yang mendekati kondisi lapangan diperoleh dari verifikasi *y-velocity* model numerik terhadap PPV aktual. Nilai *damping ratio* dan *frekuensi* ini dapat digunakan untuk memodelkan peledakan pada hari yang lain guna mengetahui kesesuaian *y-velocity* terhadap PPV aktual dengan penggunaan jumlah bahan peledak dan delay yang berbeda. Selanjutnya model numerik dengan hasil *y-velocity* yang mendekati PPV aktual akan dilihat FK dan *total strain* yang dihasilkan untuk analisa stabilitas terowongan Nanjung.

DATA GETARAN DAN DATA PEMODELAN

Getaran peledakan yang diukur pada tanggal 24 Mei 2019 dihasilkan dari 65 lubang ledak dengan jumlah bahan peledak sebanyak 55 kg, untuk rencana pola penyalaaan dapat dilihat pada gambar 2 dan tabel 1. Pada *event* ini terekam gelombang *vertical*, *longitudinal*, dan *transversal* (gambar 3). Penggunaan data getaran yang dijadikan sebagai PPV aktual adalah gelombang *transversal*, hal ini dikarenakan PPV yang dihasilkan setiap waktu detonasinya mendekati bentuk *triangle blastload* pada saat perencanaan. Untuk mendapatkan PPV dari gelombang *transversal* dilakukan digitasi pada setiap waktu detonasinya (tabel 2). Berdasarkan hasil digitasi, diperoleh PPV tertinggi adalah 2,33 mm/s pada waktu detonasi 6,2s. PPV sebesar 2,33 mm/s ini akan dijadikan acuan untuk verifikasi *y-velocity* dari pemodelan.



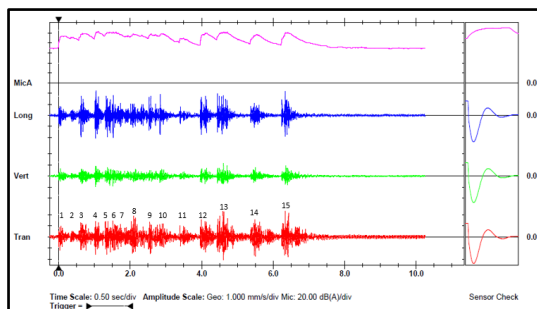
Gambar 2. Rencana pola penyalan

Tabel 1. Rencana dan pola peledakan 24 Mei 2019

Sequence	Area	Delay (s)	Waktu Detonasi (s)	Tinggi Isian (m)	Jumlah Lubang	Handak Per Lubang (Kg)
1	Center hole	0	0	0.85	2	1.7
2	Cut 1	0.3	0.3	0.85	3	2.6
3	Cut 1	0.3	0.6	0.85	4	3.4
4	Cut 2	0.3	0.9	0.85	4	3.4
5	Cut 3	0.3	1.2	0.85	4	3.4
6	Stopping	0.3	1.5	0.85	4	3.4
7	Stopping	0.3	1.8	0.85	4	3.4
8	Stopping	0.3	2.1	0.85	4	3.4
9	Stopping	0.3	2.4	0.85	8	6.8
10	Stopping	0.3	2.7	0.85	6	5.1
11	Stopping + Lifter	0.5	3.2	0.85	4	3.4
12	Lifter	0.5	3.7	0.85	4	3.4
13	Wall	0.5	4.2	0.85	6	5.1
14	Wall + Lifter	0.5	4.7	0.85	4	3.4
15	Roof	0.5	5.2	0.85	4	3.4

Tabel 2. Nilai PPV aktual hasil digitasi pada setiap waktu detonasi

Nomor Delay	Waktu Delay (ms)	Waktu Detonasi Rencana (ms)		PPV Aktual (mm/s)
		Rencana	Aktual	
1	000	000	69	1,05
2	300	300	375	0,56
3	300	600	612	1,37
4	300	900	1017	1,45
5	300	1200	1295	1,48
6	300	1500	1507	1,52
7	300	1800	1707	1,18
8	300	2100	2070	1,97
9	300	2400	2516	1,40
10	300	2700	2868	1,22
11	300	3200	3459	1,04
12	500	3700	3955	1,62
13	500	4200	4564	2,34
14	500	4700	5434	1,60
15	500	5200	6275	2,33



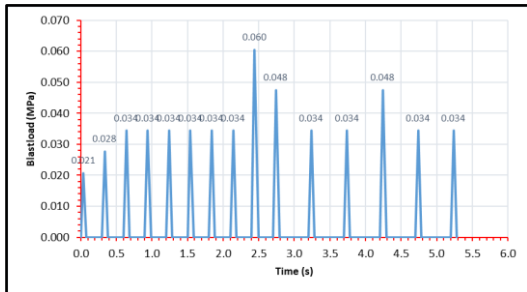
Gambar 3. Hasil pengukuran getaran pada peledakan 24 Mei 2019

Summary input properties material dan parameter dinamik untuk model peledakan tanggal 24 Mei 2019 disajikan pada tabel 2.

Tabel 2. Summary properties material dan parameter dinamik

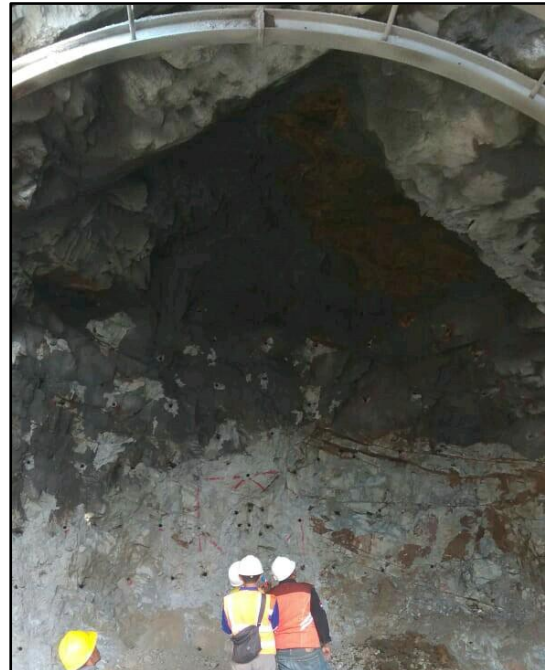
Material	Unit Weight	Modulus Young Rock Mass	Poisson Ratio	Mohr Columb Rock Mass	Dynamic Parameters			
	MN/m ³	Em MPa	v	C MPa	Phi (°)	σ _r Hz	σ _c Hz	F _{cp} Hz
Dacite	0,0258	3,900	0,47	3,975	43	0,02		0,02
Sandstone	0,0172	607	0,28	0,284	37	0,05	65	0,05 85
Siltstone	0,0195	108	0,26	0,086	26	0,1		0,1

Penyesuaian konstanta persamaan (2) agar perhitungan *blastload* mendekati kondisi terowongan Nanjung menjadi $P_{so} = \frac{744}{Z^3} - \frac{60}{Z^2} + \frac{45}{Z}$. Berdasarkan data pada tabel 2 dan rumus *blastload* yang telah disesuaikan, diperoleh triangle *blastload* seperti pada gambar 4.

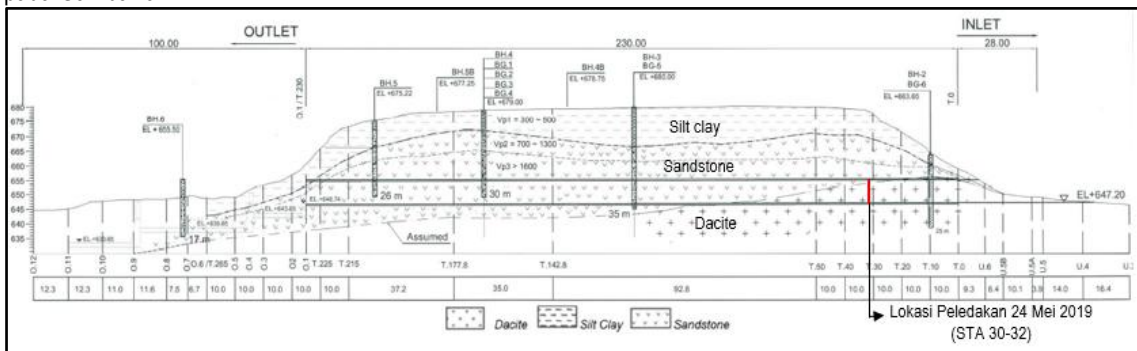


Gambar 4. Hasil triangle *blastload*

Geometri pemodelan yang dibangun berdasarkan penampang terowongan pada STA 30-32. Penyusun batuan terowongan STA 30-32 secara aktual terlihat *dacite* dan *sandstone* disajikan pada gambar 5. Penampang ini merupakan muka peledakan pada terowongan 2 dan kondisi terowongan 1 belum dilakukan penggalian, lokasi peledakan pada penampang keseluruhan terowongan dapat dilihat pada Gambar 6.



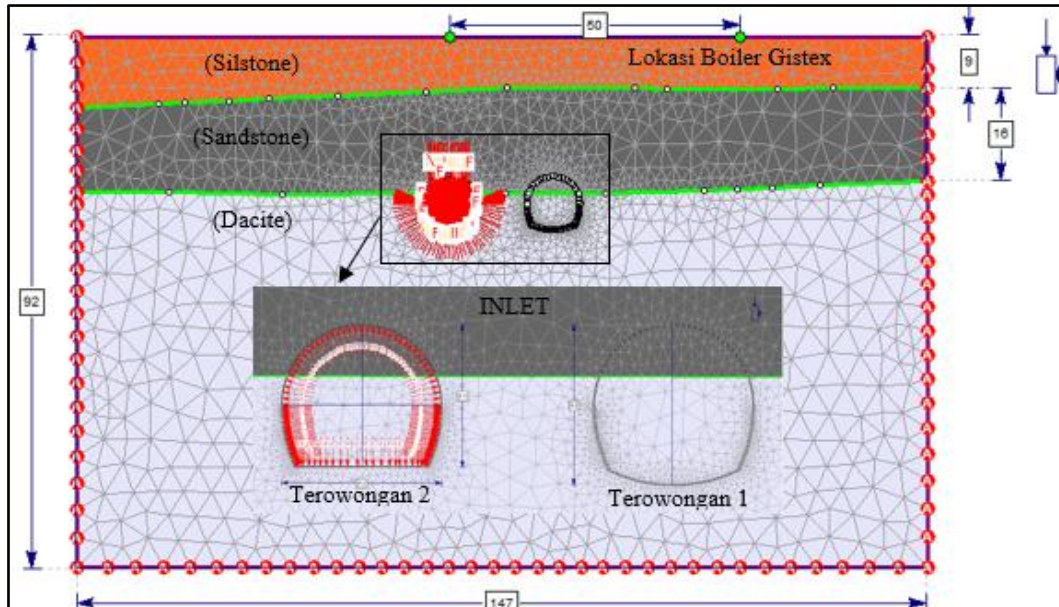
Gambar 5. Muka peledakan (STA 30-32)



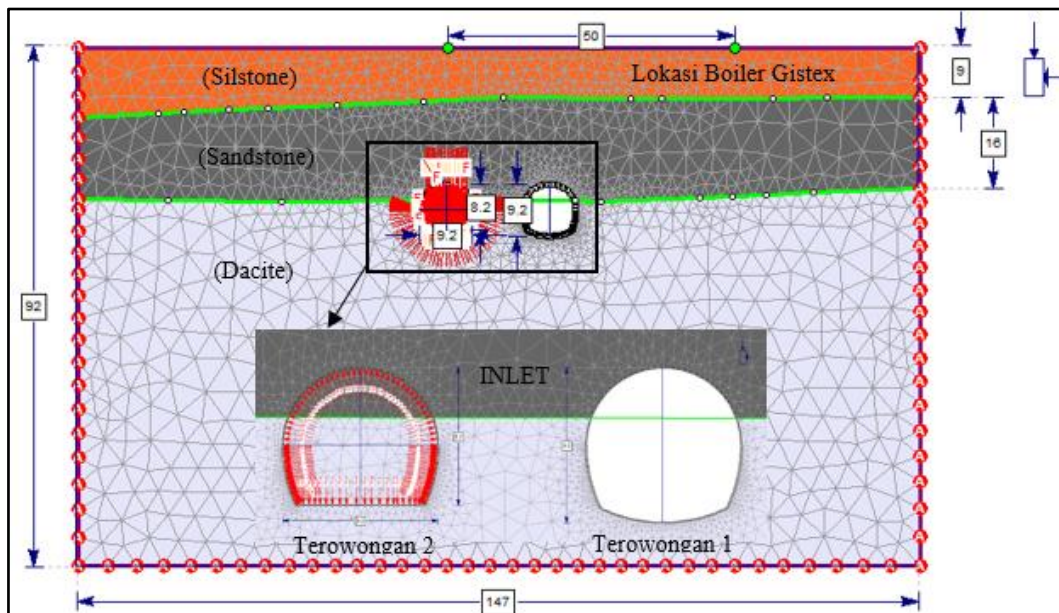
Gambar 6 Lokasi Peledakan tanggal 24 Mei 2019 (STA 30-32)

Berdasarkan analisa penampang keseluruhan dan pengamatan muka terowongan, maka geometri model numerik dibuat mendekati kondisi lapangan. Material penyusun yang dimodelkan adalah *Dacite*, *Sandstone*, dan *Siltstone*. Selain itu titik berwarna hijau merupakan lokasi pengukuran getaran. *Boundry condition* dinamik pada model ini adalah *absorb* (A). Penggunaan *boundry A* diharapkan gelombang peledakan terserap kesegala arah dan tidak di pasang dipermukaan agar partikel material bebas bergerak. Untuk

blastload diaplikasikan pada perimeter terowongan, hal ini dilakukan karena nilai R pada persamaan (3) menggunakan jari-jari terowongan sehingga diasumsikan sumber energi peledakan berada pada perimeter bukan titik pusat terowongan. Kondisi model untuk analisa PPV disajikan pada gambar 7 dan untuk analisa faktor keamanan dan total displacement pada gambar 8, perbedaan kedua model ini hanya pada kondisi terowongan 1 yang telah digali.



Gambar 7. Kondisi model untuk analisa PPV



Gambar 8. Kondisi model untuk analisa faktor keamanan dan total displacement

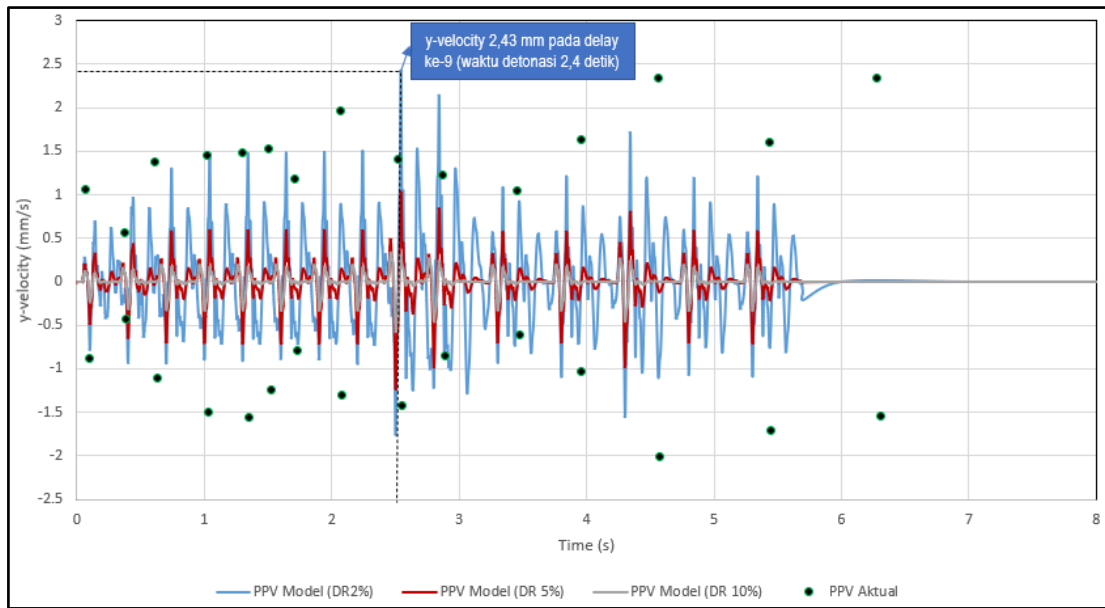
HASIL PEMODELAN

Hasil pemodelan RS2 untuk peledakan tanggal 24 mei 2019 di jelaskan pada beberapa point sebagai berikut :

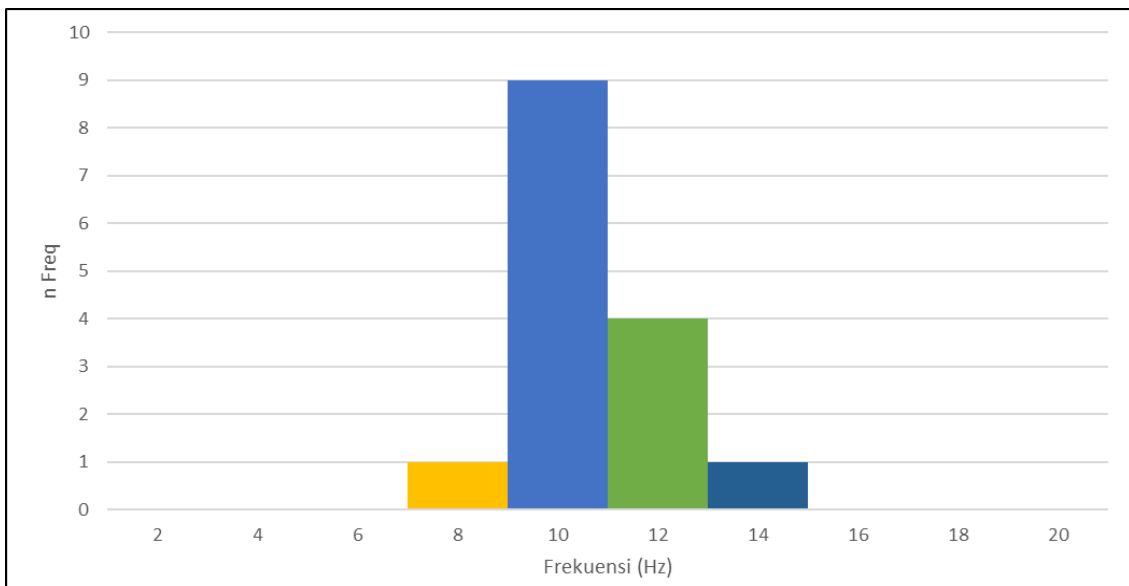
1. Secara metode *trial and error*, digunakan nilai *damping ratio* 2%, 5%, dan 10% untuk mendapatkan *y-velocity* yang mendekati PPV aktual 2,33 mm/s. Hasil model dengan *damping ratio* 2% yang mendekati PPV aktual yaitu 2,43 mm/s (gambar 9).
2. *Y-velocity* 2,43 mm/s terjadi pada *delay* ke-9 dimana penggunaan bahan peledak terbanyak dari peledakan tanggal 24 Mei 2019, sedangkan

PPV aktual tertinggi terjadi pada *delay* ke-15. Perbedaan ini terjadi dimungkinkan karena bahan peledak yang meledak secara bersamaan pada *delay* ke-15 lebih banyak dari yang direncanakan.

3. Perhitungan frekuensi yang dihasilkan model pada *damping ratio* 2% adalah 10-14 Hz dan frekuensi dominan pada 10 hz (gambar 10). Frekuensi ini belum mendekati frekuensi aktual 65-85 Hz. Perbedaan hasil ini menjadi batasan masalah pada penelitian ini, belum dapat ditemukan pengaturan khusus pada RS2 agar frekuensi dapat mendekati kondisi aktual.



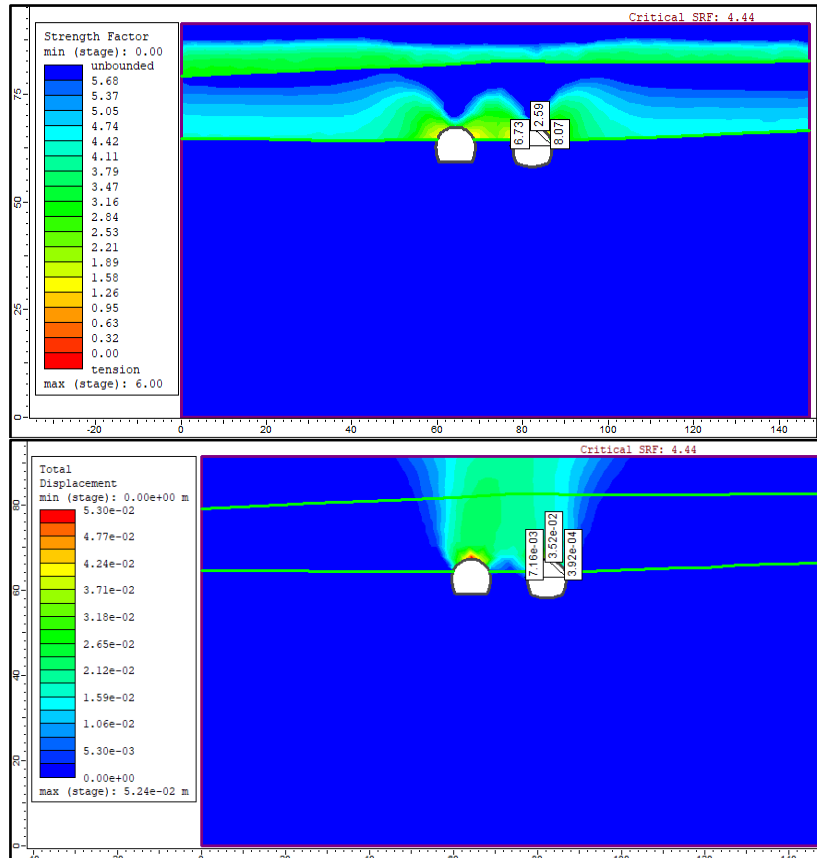
Gambar 9. Hasil y-velocity hasil model pada damping ratio 2%, 5%, dan 10%



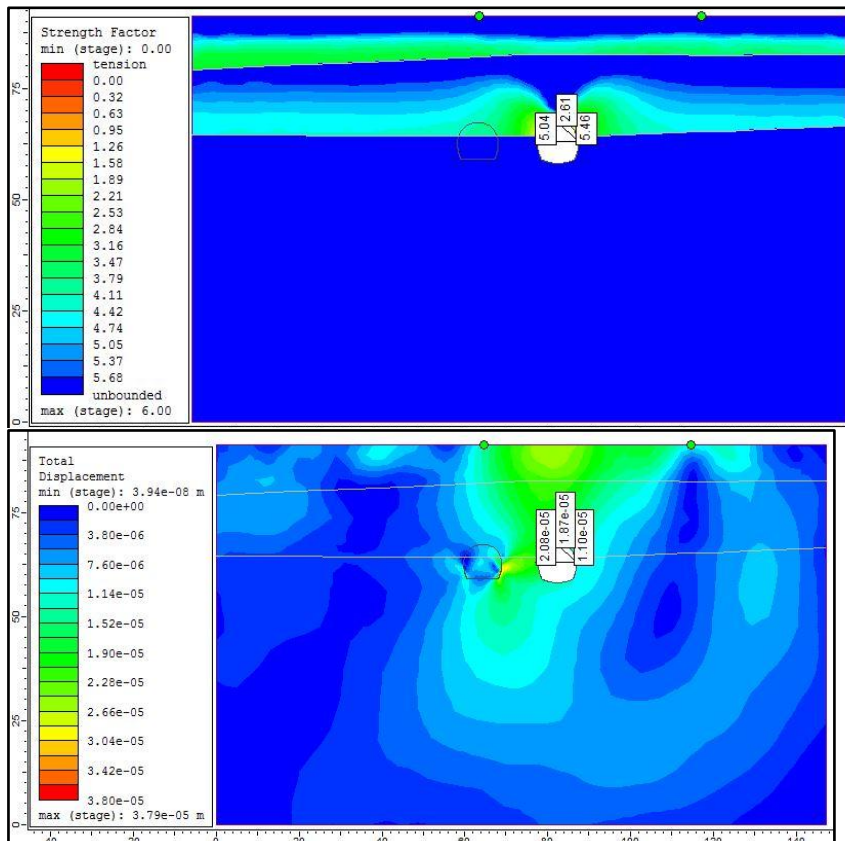
Gambar 10. Hasil frekuensi pada model *damping ratio* 2%

4. Untuk faktor keamanan dan *total displacement* yang dihasilkan pada model tidak ada perbedaan yang signifikan dengan kondisi sebelum dan setelah peledakan. Hasil model sebelum peledakan di-*running* pada kondisi non-

dinamik dan asumsi kondisi kedua terowongan sudah digali (gambar 11). Untuk hasil model selama peledakan di-*running* pada kondisi terowongan 1 yang telah digali (gambar 12).

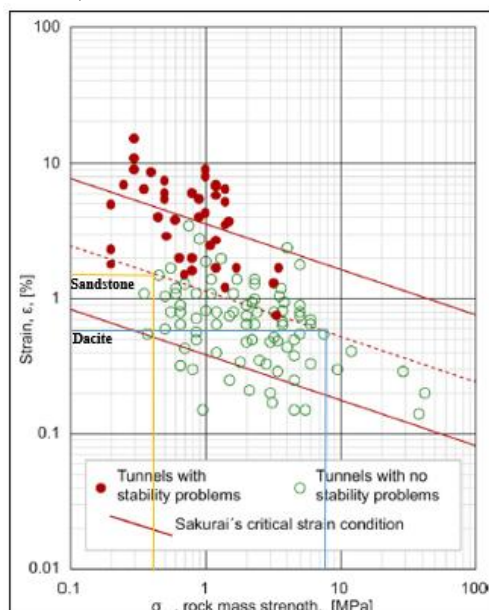


Gambar 11. Hasil pemodelan sebelum peledakan



Gambar 12. Hasil pemodelan setelah peledakan

5. Berdasarkan hasil model setelah peledakan diketahui bahwa *strength factor* terkecil berada pada atap terowongan (batuan sandstone) yaitu 2,61 dan dapat dinyatakan stabil.
6. Untuk *total displacement* terbesar pada hasil model sebelum dan setelah peledakan adalah 35,2 mm pada batuan sandstone. Menurut diagram *strain level* (Sakurai,1983) dapat dikatakan aman jika strain pada batuan sandstone dan silty clay antara 1-1,5% (92-138 mm) dan batuan dacite 0,6 % (55 mm), hasil plot pada diagram strain level dapat dilihat pada Gambar 13. *Total displacement* 35,2 mm pada atap terowongan berarti terjadi *strain* 0,38 % dari batuan *sandstone*, *level strain* ini masih dibawah *strain* yang diperbolehkan menurut diagram Sakurai, 1983.



Gambar 13. Hasil plot strain level material terowongan Nanjung

KESIMPULAN

1. Input *blastload* untuk prediksi *PPV* model yang paling mendekati kondisi aktual menggunakan persamaan Mills,1987 dengan faktor koreksi 0,42 sehingga persamaan pada kondisi terowongan Nanjung menjadi $P_{so} = \frac{744}{z^3} - \frac{60}{z^2} + \frac{45}{z}$.
2. Berdasarkan hasil pemodelan numerik diperoleh *PPV* yang paling mendekati aktual adalah *damping ratio* 2%.
3. Kestabilan terowongan satu pada peledakan 24 Mei 2019 dalam kondisi stabil sebelum maupun setelah peledakan. Hal ini karena faktor keamanan berkisar 2,6 dan *total strainsandstone* dan *dacite* kurang dari 1,5 % dan 0,6 %.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT.Wijaya Karya (Persero), Tbk dan PT. Adhi Karya (Persero), Tbk yang telah memberikan kesempatan atas kerjasama yang baik selama kegiatan pengukuran getaran peledakan Terowongan Nanjung.

Penelitian ini juga dibiayai oleh Program Penelitian, Pengabdian Masyarakat, dan Inovasi (P3MI) ITB Tahun 2019, Prodi Teknik Pertambangan ITB.

DAFTAR PUSTAKA

- 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.
- 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.
- Hoen, E., Nilsen, B., Olsson, R., (2019): Main Aspect of Deformation and Rock Support in Norwegian Road Tunnels, Tunneling and Underground Space Technology, Elsevier.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat., (2018): Pengeboran Geoteknik Proyek Pembangunan Terowongan Nanjung, Laporan Akhir Subsurface Investigation Nanjung Tunnel Project, Suwanda Karya Mandiri.
- 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.
- Nugroho, M. Fadli., (2014): Comparison of Predicted PPV Value By Using Empirical Equation and Its Artificial Neural Networks and Correlation With The Damage Resulted From Blasting Activities in Undercut DOZ Mine, Laporan Skripsi, Universitas Trisakti, Jakarta.
- Oliveira, Moura., Vrancic, Damir., (2015): Underdamped Second-Order Systems Overshoot Control, International Journal of Control Automation and System, Sciencedirect.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat., (2018): Upper Citarum Basin Flood Management Sector Load Project, Detail Design Report For Nanjung Diversion Tunnel, Oriental Consultant Global Co.Ltd.

- Rai, M.A., Kramadibrata S., Watimena, R.K., (2014):
Mekanika Batuan, Institut Teknologi Bandung,
Bandung.
- Rocscience, Inc : Quick start tutorial RS2 v.2019
Dynamic Analysis Tutorial
- 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.
- Suhendro, Bambang., Rifa'i, Ahmad., Aminullah,
Ahmad., (2018): Analisis Stabilitas Konstruksi
Terowongan Nanjung dengan Finite Element
Method, Laporan Akhir Analisis Metode
Elemen Hingga Proyek Terowongan Nanjung,
Lembaga Kerjasama Fakultas Teknik UGM.
- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., Ramsay, J. (2007):
Blast Loading and Blast Effect on Structures,
International Journal of Loading on Structures ,
eJSE.