

ANALISIS KESTABILAN TEROWONGAN BEKAS TAMBANG BAWAH TANAH WATU JONGGOL TERHADAP GETARAN KENDARAAN

STABILITY ANALYSIS OF THE WATU JONGGOL UNDERGROUND MINE TUNNEL AGAINST VEHICLE VIBRATIONS

S. M. Sari^{*1}, S. Saptono²

^{1,2} Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral, UPN “Veteran” Yogyakarta

^{1,2}Jalan Padjajaran 104, Sleman, Yogyakarta, Indonesia, 55283

e-mail: ^{*1}112220006@upnyk.ac.id

ABSTRAK

Terowongan bekas tambang bawah tanah yang berada di bawah jalur jalan raya berpotensi mengalami ketidakstabilan akibat beban dinamis lalu lintas, terutama tanpa sistem penyanggaan yang memadai. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh getaran kendaraan terhadap kestabilan terowongan di Watu Jonggol, Kulon Progo, melalui pengukuran getaran lapangan dan analisis numerik metode *finite element*. Lalu lintas di atas terowongan didominasi kendaraan ringan dengan sesekali kendaraan berat, sehingga intensitas getaran bervariasi sesuai jenis dan beban kendaraan yang melintas. Getaran permukaan yang direkam menggunakan Micromate InstanTel pada delapan titik di atas terowongan menghasilkan nilai PPV transversal 15,6 mm/s, vertikal 10,2 mm/s, dan longitudinal 12,8 mm/s sebagai representasi intensitas getaran aktual. Analisis numerik 2D menggunakan RS2 dengan kriteria keruntuhan Hoek–Brown dan metode *Shear Strength Reduction* (SSR) menunjukkan bahwa nilai *Strength Reduction Factor* (SRF) pada kondisi statis sebesar 1,32 pada dinding dan 2,35 pada *crown*, kemudian menurun menjadi 1,30 dan 1,67 pada kondisi getaran rata-rata, serta 1,26 dan 1,66 pada getaran maksimum. Kontur tegangan, deformasi, dan zona *yielded* memperlihatkan bahwa pengaruh dinamis terutama terkonsentrasi pada dinding dan *crown*. Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa terowongan masih berada dalam kondisi stabil.

Kata kunci: PPV, getaran kendaraan, SSR, SRF, tambang bawah tanah

ABSTRACT

The former underground mine tunnel located beneath the highway is prone to instability due to dynamic traffic loads, especially without an adequate support system. This study evaluates the effect of vehicle vibrations on tunnel stability in Watu Jonggol, Kulon Progo, through field vibration measurements and finite element method numerical analysis. Traffic above the tunnel is dominated by light vehicles with occasional heavy vehicles, so the vibration intensity varies according to the type and load of the vehicles passing through. Surface vibrations recorded using Micromate InstanTel at eight points above the tunnel produced transverse PPV values of 15.6 mm/s, vertical PPV values of 10.2 mm/s, and longitudinal PPV values of 12.8 mm/s as a representation of actual vibration intensity. A 2D numerical analysis using RS2 with Hoek–Brown failure criteria and the *Shear Strength Reduction* (SSR) method showed that the *Strength Reduction Factor* (SRF) value in static conditions was 1.32 on the walls and 2.35 on the crown, then decreased to 1.30 and 1.67 under average vibration conditions, and 1.26 and 1.66 under maximum vibration conditions. The stress, deformation, and yielded zone contours show that the dynamic effect is mainly concentrated on the walls and crown. Overall, the analysis results indicate that the tunnel is still in a stable condition.

Keywords: PPV, vehicle vibration, SSR, SRF, underground mining

PENDAHULUAN

Terowongan bekas tambang bawah tanah yang dibiarkan terbuka tanpa penimbunan kembali berpotensi menimbulkan permasalahan geoteknik, terutama apabila terletak di bawah infrastruktur permukaan seperti jalan raya [1]. Kondisi tersebut dapat memicu ketidakstabilan akibat beban dinamis, salah satunya getaran yang ditimbulkan oleh kendaraan yang melintas di atasnya [2]. Getaran permukaan tanah (*ground-borne vibration*) menghasilkan gelombang yang merambat ke dalam struktur geologi dan menimbulkan perubahan tegangan serta regangan pada terowongan [3]. Respons massa batuan terhadap getaran ini bergantung pada karakteristik fisik dan mekanik batuan, serta intensitas dan jarak getaran. Umumnya getaran dinyatakan dalam parameter *Peak Particle Velocity* (PPV) [4]. Parameter PPV ini banyak digunakan sebagai indikator kuantitatif untuk dapat menilai dampak getaran terhadap kestabilan struktur bawah tanah seperti pada getaran yang dihasilkan oleh peledakan, *drilling*, dan kendaraan [3], [5], [6], [7]. Berbeda dari getaran akibat peledakan yang bersifat impulsif, getaran kendaraan memiliki karakteristik repetitif sehingga dapat menyebabkan degradasi bertahap terhadap kekuatan massa batuan [8].

Berbagai penelitian sebelumnya telah menunjukkan hubungan empiris antara PPV dan tingkat kerusakan struktural. Penelitian awal oleh [9] dari *United States Bureau of Mines* menemukan korelasi antara PPV dan tingkat kerusakan struktur bawah tanah. Model tersebut kemudian dikembangkan oleh [10] melalui kurva USBM RI 8507 yang menjadi acuan global dalam menentukan batas aman getaran. Studi-studi lanjutan oleh [11], standar dari [12], dan pedoman dari [8] memperkuat penerapan PPV sebagai dasar penilaian batas getaran aman. Sejalan dengan itu, [13] menunjukkan bahwa peningkatan PPV akibat aktivitas peledakan berdampak langsung pada peningkatan tegangan dinamis di sekitar dinding dan *crown* terowongan. Pada [4] juga meneliti kestabilan terowongan bawah tanah terhadap getaran dari terowongan berdampingan dan menunjukkan bahwa PPV merupakan indikator efektif dalam memprediksi potensi kerusakan struktural. Penelitian lain oleh [14] menegaskan perlunya penentuan ambang batas aman getaran pada struktur bawah tanah dengan pendekatan PPV berbasis analisis numerik dan observasi lapangan. Kemudian [2] juga meneliti efek getaran lalu lintas pada bukaan tambang bawah tanah menggunakan data PPV aktual yang diterapkan dalam analisis FLAC 2D, dan menunjukkan bahwa getaran berulang berpotensi meningkatkan tegangan serta memperluas zona plastis di sekitar bukaan.

Meskipun studi terkait pengaruh PPV terhadap struktur bangunan telah banyak dilakukan, namun kajian yang secara spesifik menilai respons terowongan bekas tambang bawah tanah *unsupported* yang berada tepat di bawah jalan raya masih sangat terbatas. Kondisi

geometri terowongan yang tidak diperkokoh dengan penyangga, serta sifat getaran yang repetitif dari kendaraan menimbulkan ketidakpastian tingkat degradasi yang harus dievaluasi secara kuantitatif. Selain itu, sebagian besar penelitian sebelumnya menggunakan data getaran dari aktivitas peledakan atau kondisi terowongan yang memiliki sistem penyangga, sehingga belum merepresentasikan kondisi terowongan tua yang *unsupported* dan terpapar beban dinamis lalu lintas harian secara langsung. Minimnya integrasi antara data PPV aktual hasil pengukuran lapangan dengan analisis numerik berbasis *Strength Reduction Factor* (SRF) juga meninggalkan celah penelitian dalam memahami penurunan margin keamanan akibat getaran berulang pada struktur bawah tanah berusia lama.

Sehingga penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh getaran kendaraan terhadap perilaku massa batuan dan kestabilan terowongan bekas tambang bawah tanah tanpa penyangga. Analisis dilakukan menggunakan data PPV hasil pengukuran lapangan yang dimodelkan secara numerik dengan nilai *Strength Reduction Factor* (SRF) sebagai indikator batas kestabilan batuan terhadap beban dinamis kendaraan [15]. Pendekatan ini diharapkan memberikan dasar kuantitatif untuk menilai keterkaitan antara intensitas getaran kendaraan, kekuatan massa batuan, serta menjadi bahan evaluasi risiko terhadap infrastruktur di atasnya.

METODE PENELITIAN

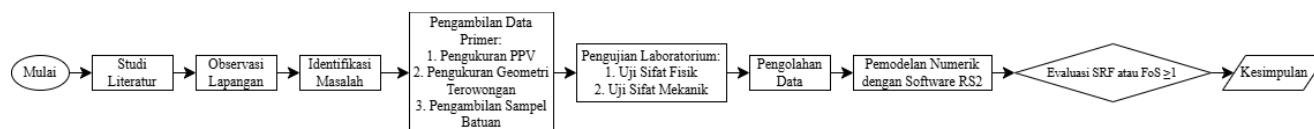
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif dengan metode analisis numerik berbasis *finite element* untuk mengevaluasi pengaruh getaran kendaraan terhadap kestabilan terowongan bekas tambang bawah tanah yang tidak memiliki sistem penyanggaan. Proses analisis dilakukan melalui tahapan pengukuran langsung getaran di lapangan, pengolahan data getaran secara statistik, dan pemodelan numerik menggunakan *software* RS2.

Penelitian ini dilaksanakan pada bekas tambang bawah tanah di Watu Jonggol, Desa Karangsari, Kecamatan Pengasih, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta, yang saat ini berfungsi sebagai jalur jalan raya aktif. Lokasi tersebut dipilih karena memiliki karakteristik berupa terowongan tanpa sistem penyangga (*unsupported tunnel*) yang secara langsung terpapar getaran kendaraan di permukaan.

Analisis dalam penelitian ini difokuskan pada evaluasi pengaruh getaran kendaraan terhadap kestabilan massa batuan pada terowongan tanpa penyangga, tanpa mempertimbangkan pengaruh lain seperti faktor air tanah. Data getaran kendaraan yang digunakan berupa nilai *Peak Particle Velocity* (PPV) dalam satuan mm/s, yang diperoleh melalui pengukuran aktual menggunakan alat Micromate Instantel. Pemodelan numerik disusun dalam bentuk dua dimensi dengan menggunakan kriteria

keruntuhan Mohr–Coulomb. Desain pemodelan didasarkan pada kondisi aktual geometri terowongan saat pengukuran dilakukan, dengan asumsi tidak terjadi

perubahan bentuk atau evolusi geometri dalam jangka panjang. Alur keseluruhan tahapan penelitian yang dilakukan dalam studi ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Metode Penelitian

Geologi Lokal

Daerah penelitian berada pada zona Pegunungan Kulon Progo yang didominasi oleh batu gamping bioklastik Formasi Sentolo berumur Miosen Tengah hingga Pliosen, yang tersingkap tidak selaras di atas satuan batuan gunungapi Formasi Kebobutak [16].

Properties Material

Pengambilan sampel batuan dilakukan berdasarkan hasil observasi lapangan langsung yang menunjukkan bahwa litologi penyusun di lokasi penelitian berupa batu gamping. Lima sampel batuan kemudian diuji di laboratorium untuk memperoleh sifat fisik dan sifat mekaniknya. Lima sampel batuan kemudian diuji di laboratorium untuk memperoleh sifat fisik dan sifat mekaniknya. Pengujian mekanik yang dilakukan sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2 yang meliputi uji geser langsung, uji kuat tarik, tidak langsung, uji kuat tekan bebas (Uniaxial Compressive Strength/UCS), serta uji *Point Load Index* (PLI) untuk melengkapi karakterisasi kekuatan batuan. Seluruh parameter hasil pengujian tersebut digunakan sebagai data input pada pemodelan numerik RS2. Data hasil pengujian diolah secara statistik, dan penentuan jenis distribusi setiap parameter dilakukan menggunakan uji *goodness of fit* Kolmogorov–Smirnov untuk memperoleh distribusi dengan nilai p-value tertinggi [17]. Ringkasan hasil pengujian disajikan pada Tabel 1.



Gambar 2. Contoh Proses Uji Laboratorium Sifat Mekanik Sampel Batuan pada Terowongan Watu Jonggol

Tabel 1. *Properties* Batuan di Lokasi Penelitian

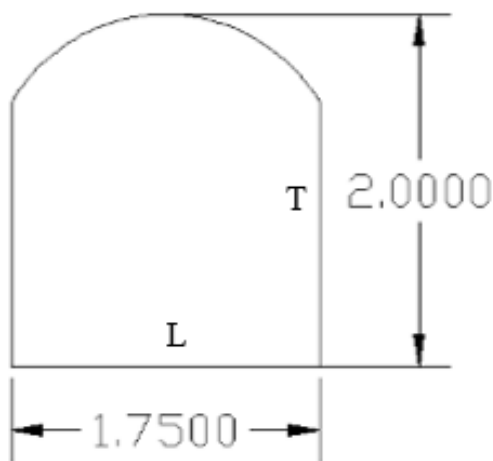
Parameter	Jenis Distribusi	Mean	SD	Rel. Min	Rel. Max
Kuat Tekan (MPa)	Gamma	13,51	2,37	10,01	16,30
<i>Modulus Young</i> (MPa)	Log normal	1.005	251	763	1.429
Poisson Rasio	Eksponensial	0,29	0,20	0,10	0,59
Natural <i>Unit Weight</i> (kN/m ³)	Normal	18,76	0,15	18,52	18,91
Kohesi (MPa)	Gamma	2,09	0,01	2,07	2,10
Sudut Geser Dalam (°)	Normal	25,76	1,05	24,11	26,87
<i>Point Load Index</i> (Is) (MPa)	Gamma	0,60	0,21	0,34	0,85

Geometri Terowongan

Geometri terowongan ditentukan berdasarkan pengukuran langsung menggunakan total station agar sesuai dengan kondisi aktual di lapangan. Terowongan bekas tambang Watu Jonggol memiliki geometri sesuai pada Tabel 2 dengan penampang dinding vertikal dan atap melengkung (*arched roof*). Bentuk ini kemudian dimodelkan dalam RS2 sebagai batas geometri analisis untuk mengevaluasi distribusi tegangan, deformasi, dan zona plastis. Geometri terowongan divisualisasikan dengan model yang ditampilkan pada Gambar 3.

Tabel 2. Geometri Terowongan Watu Jonggol

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Lebar terowongan	L	1,75	m
Tinggi terowongan	T	2,0	m



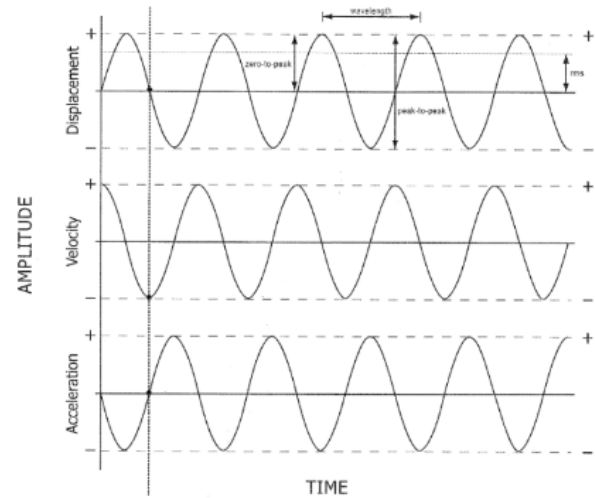
Gambar 3. Geometri Terowongan Watu Jonggol

Getaran

Secara teoritis, getaran tanah dapat direpresentasikan sebagai gerak harmonik sederhana (*simple harmonic motion*), di mana perpindahan, kecepatan, dan percepatan partikel berhubungan melalui turunan terhadap waktu [10]. Hubungan antara perpindahan, kecepatan, dan percepatan pada getaran harmonik sederhana ditunjukkan pada Gambar 4. Nilai puncak parameter getaran diperoleh melalui persamaan (1) berikut:

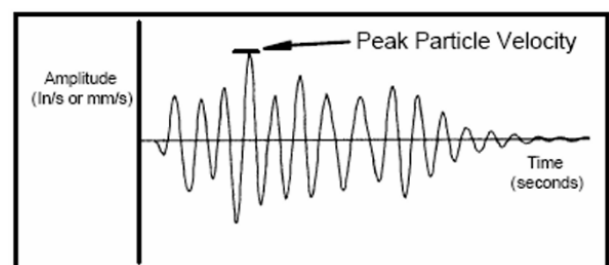
$$V_0 = 2\pi f D_0, A_0 = (2\pi f)^2 D_0 = 2\pi f V_0 \quad (1)$$

Pada persamaan ini, V_0 adalah kecepatan puncak partikel, A_0 adalah percepatan puncak partikel, D_0 adalah simpangan puncak partikel, dan f merupakan frekuensi getaran.



Gambar 4. Hubungan Gelombang Getaran antara Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan terhadap Waktu [17]

Parameter getaran yang digunakan adalah *Peak Particle Velocity* (PPV) yang didefinisikan sebagai kecepatan maksimum partikel tanah yang terjadi selama penjarangan gelombang getaran (dalam mm/s). PPV menjadi parameter utama karena memiliki korelasi paling kuat terhadap potensi kerusakan struktur dibandingkan percepatan atau simpangan [10]. Semakin besar nilai PPV, maka semakin tinggi deformasi batuan dan semakin menurun faktor keamanan (FoS) dari terowongan bawah tanah. Ilustrasi bentuk gelombang yang menunjukkan puncak nilai PPV ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Peak Particle Velocity [19]

Data getaran berupa PPV harus diubah menjadi *peak particle acceleration* untuk memudahkan dalam menjadi data inputan pada analisis numerik dengan persamaan (2):

$$a = 2\pi f v \quad (2)$$

Variabel a adalah *peak particle acceleration* dimana untuk mencarinya perlu memasukan variabel f yaitu

angular frequency dan v adalah *peak particle velocity* [18].

Perekaman Getaran

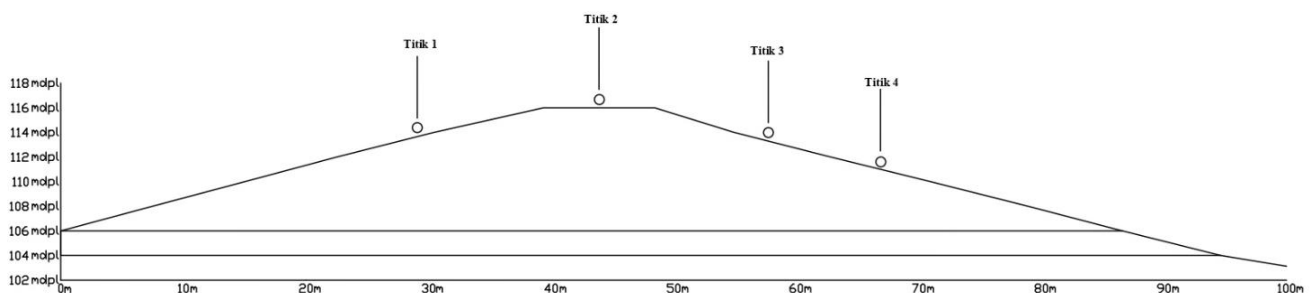
Instrumen utama yang digunakan adalah Micromate produksi InstanTel, yaitu kombinasi *seismograph* dan *vibration monitor* yang dirancang untuk merekam getaran tanah (*ground vibration*) dan tekanan udara (*overpressure*). Alat ini memenuhi standar ISEE (*International Society of Explosives Engineers*) dan DIN (*Deutsches Institut für Normung*) serta terdiri atas unit utama dan sensor *geophone* tiga sumbu (transversal–vertikal–longitudinal) [20]. Penggunaan alat ini memungkinkan pengukuran getaran tanah secara presisi pada tiga arah utama.

Pengukuran data lapangan dilakukan pada tanggal 22 September 2025 dan 3 Oktober 2025 (Gambar 6). Pengukuran dilakukan dengan menempatkan sensor Micromate di permukaan jalan yang berada tepat di atas lintasan terowongan bawah tanah. Sensor diatur agar dapat mendeteksi getaran dari berbagai jenis kendaraan yang melintas, seperti mobil pribadi, truk, dan bus. Setiap pengukuran menghasilkan data gelombang waktu (*waveform*) yang otomatis dikonversi menjadi nilai PPV menggunakan perangkat lunak bawaan alat [20].



Gambar 6. Pengambilan data getaran menggunakan Micromate InstanTel

Pengambilan data getaran dilakukan sebanyak 80 kali pada empat titik yang saling berseberangan (Gambar 7). Setiap titik diukur sebanyak sepuluh kali dan seluruh titik pengukuran berada tepat di atas terowongan bekas tambang. Perekaman getaran menggunakan Micromate InstanTel dilaksanakan pada kondisi lalu lintas normal yang didominasi kendaraan ringan dengan lalu lintas yang meningkat pada jam sibuk, serta sesekali dilalui kendaraan berat dengan rentang waktu pengukuran yang bervariasi.



Gambar 7. Titik Pengukuran Data Getaran Kendaraan

Setelah kegiatan akuisisi data selesai, dilakukan tahap pengolahan data untuk memperoleh parameter getaran yang mewakili karakteristik dinamis kondisi lapangan secara kuantitatif lalu yang akan digunakan sebagai beban dinamis dalam pemodelan numerik. Data diolah secara statistik untuk memperoleh nilai rata-rata ($\bar{X}$), maksimum (X_{max}), minimum (X_{min}).

Analisis Numerik RS2

Analisis numerik dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak RS2 (Rocscience) yang berbasis *Finite Element Method* (FEM) [21]. Metode FEM merupakan metode numerik yang digunakan dalam menyelesaikan berbagai persamaan diferensial. Prinsip dasarnya adalah membagi domain besar menjadi elemen-elemen kecil [22].

Analisis stabilitas terowongan dilakukan menggunakan metode *shear strength reduction* (SSR) berbasis *finite element*, di mana parameter kekuatan geser massa batuan direduksi secara bertahap melalui *strength reduction factor* (SRF) hingga model mencapai kondisi tidak stabil [23]. Simulasi pada penelitian ini dilakukan pada dua kondisi, yaitu kondisi statis untuk memperoleh nilai awal SRF dan kondisi dinamis dengan menerapkan beban getaran kendaraan untuk menilai perubahan nilai SRF. Kriteria Hoek–Brown digunakan karena sifat non-liniernya mampu merepresentasikan perilaku kegagalan hampir seluruh tipe batuan secara lebih akurat dibandingkan kriteria Mohr–Coulomb. Pada kriteria Mohr–Coulomb, proses reduksi dilakukan dengan menurunkan parameter kohesi dan sudut geser internal melalui hubungan (pers. (3)):

$$c' = \frac{c}{SRF}, \tan \phi' = \frac{\tan \phi}{SRF} \quad (3)$$

Pada persamaan tersebut c adalah kohesi awal batuan, c' adalah kohesi setelah direduksi, ϕ adalah sudut geser internal awal, dan ϕ' adalah sudut geser internal setelah direduksi berdasarkan nilai SRF.

Sedangkan pada kriteria Hoek–Brown, reduksi kekuatan dilakukan dengan menurunkan kurva *shear strength envelope* berdasarkan faktor F , sehingga parameter seperti σ_{ci} , m_b , dan s berubah mengikuti hubungan dasar reduksi (pers. (4)):

$$\sigma_{ci,red} = \frac{\sigma_{ci}}{F} \quad (4)$$

Dimana σ_{ci} adalah kuat tekan uniaksial batuan utuh, dan $\sigma_{ci,red}$ merupakan nilai kuat tekan yang telah direduksi berdasarkan faktor F .

Kurva kekuatan Hoek–Brown tereduksi diperoleh dengan membagi seluruh persamaan selubung geser terhadap F [23]. Model *finite element* dalam RS2 kemudian dijalankan secara iteratif untuk setiap nilai

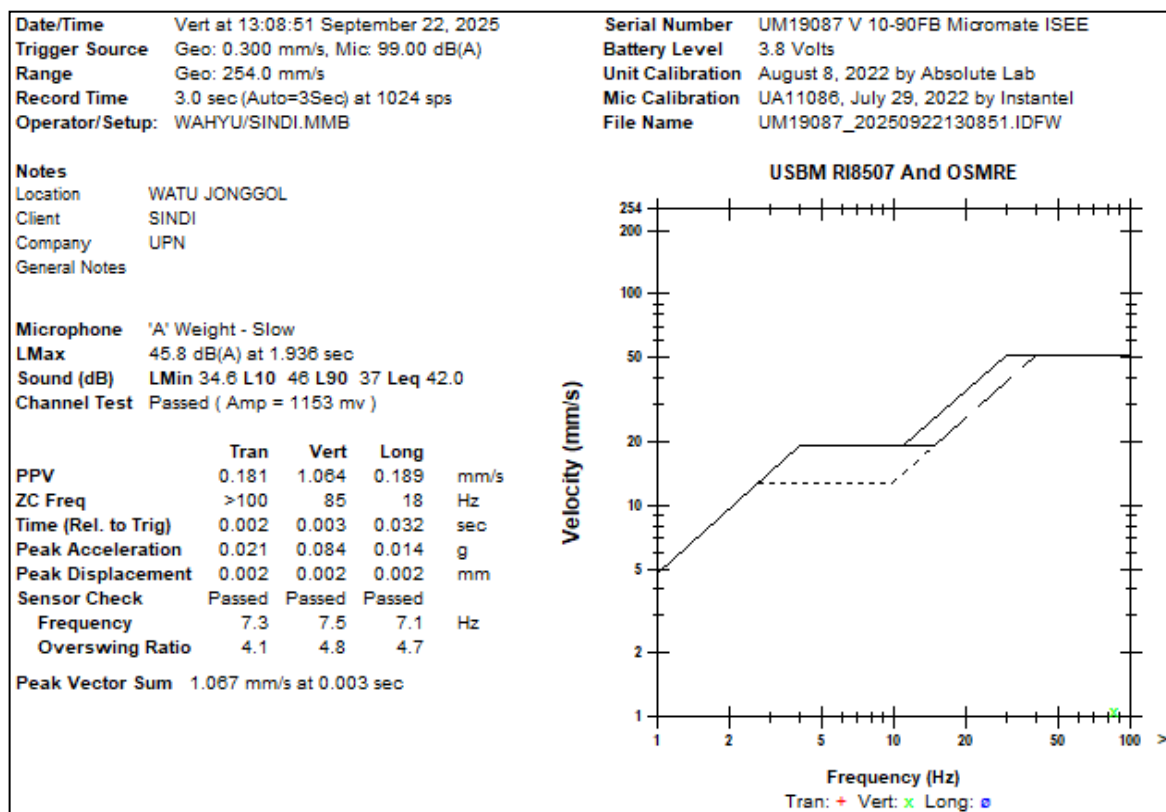
SRF hingga terjadi non-konvergensi, deformasi berlebih, atau perkembangan zona plastis yang kontinu di sekitar bukaan terowongan. Nilai SRF kritis tersebut dianggap sebagai *factor of safety* (FoS) sistem karena mewakili besarnya reduksi kekuatan yang diperlukan untuk mencapai kegagalan [15]. Nilai SRF yang tinggi ≥ 1 menunjukkan massa batuan yang stabil, sedangkan $SRF \leq 1$ menandakan bahwa kondisi terowongan berada pada atau di bawah batas kestabilan [15].

Selain menghasilkan nilai SRF, RS2 juga menampilkan hasil analisis berupa kontur tegangan, deformasi, serta zona plastis (*yielded zones*) yang menggambarkan area batuan yang telah mencapai batas plastisitas. Zona ini digunakan sebagai indikator risiko keruntuhan lokal di sekitar terowongan [24].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan Statistik Data Getaran

Dari pengukuran getaran yang dilakukan di lapangan, diperoleh *output* berupa *report* digital berisi informasi mengenai amplitudo getaran, waktu kejadian, serta parameter teknis lainnya yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Contoh *Report* Hasil Pengukuran Getaran Kendaraan Menggunakan Micromate

Data hasil pengukuran kemudian diolah secara statistik berdasarkan nilai PPV pada arah transversal, vertikal, dan longitudinal, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Nilai *Mean Peak Particle Velocity*

Parameter	Satuan	Nilai
PPV Transversal	mm/s	0.256
PPV Vertikal	mm/s	0.289
PPV Longitudinal	mm/s	0.297

Selain itu, digunakan pula nilai maksimum dari *peak particle sum* untuk memperoleh variasi kondisi pada PPV tertinggi, yaitu pada data rekaman nomor 79, dengan parameter yang ditampilkan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Nilai *Max Peak Particle Velocity*

Parameter	Satuan	Nilai
PPV Transversal	mm/s	1.97
PPV Vertikal	mm/s	3.381
PPV Longitudinal	mm/s	0.922

Untuk keperluan pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak RS2 (Rocscience), nilai PPV hasil pengukuran dikonversi menjadi parameter percepatan partikel (*particle acceleration*). Konversi ini dilakukan melalui persamaan gerak harmonik sederhana yang menghubungkan kecepatan partikel dengan percepatan terhadap waktu. Hasil konversi percepatan tersebut disajikan pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 5. Nilai Konversi PPV Mean ke *Acceleration*

Parameter	Satuan	Nilai
<i>Acceleration</i> Transversal	g	0.010
<i>Acceleration</i> Vertikal	g	0.018
<i>Acceleration</i> Longitudinal	g	0.016

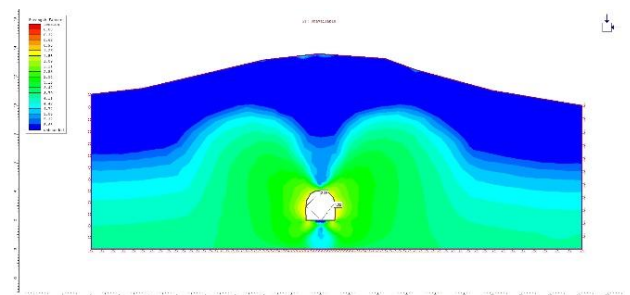
Tabel 6. Nilai Konversi PPV Maksimum ke *Acceleration*

Parameter	Satuan	Nilai
<i>Acceleration</i> Transversal	g	0.083
<i>Acceleration</i> Vertikal	g	0.142
<i>Acceleration</i> Longitudinal	g	0.038

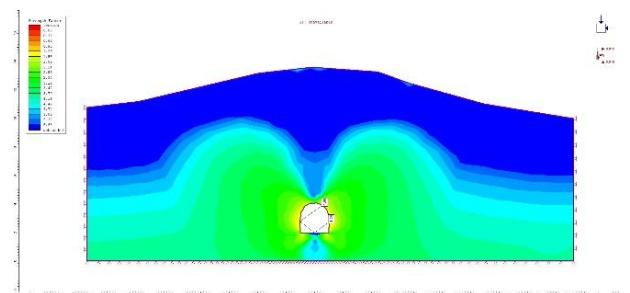
Pemodelan Data dan Analisis Numerik

Pemodelan dilakukan menggunakan elemen *triangle node* dan penerapan kriteria keruntuhan Hoek–Brown. Analisis dilakukan pada dua kondisi pembebanan, yakni kondisi statis dan kondisi dinamis. Pada kondisi statis, pemodelan bertujuan untuk memperoleh nilai dasar *Strength Reduction Factor* (SRF) sebagai acuan kestabilan terowongan sebelum adanya pengaruh getaran kendaraan. Nilai SRF ini menjadi dasar pembandingan untuk menilai degradasi kestabilan yang terjadi ketika beban dinamis diterapkan. Pada kondisi dinamis, beban yang dimasukkan dalam bentuk *acceleration* yang telah dikonversi dari nilai PPV.

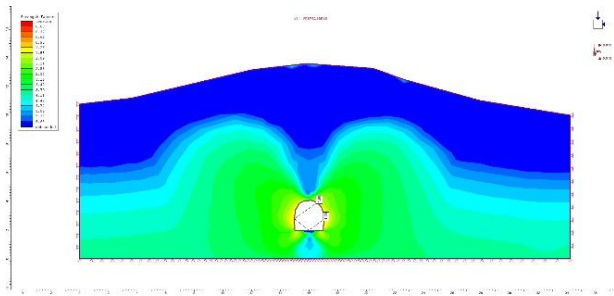
Untuk menggambarkan variasi intensitas getaran yang mungkin terjadi, simulasi dinamis dibagi menjadi dua skenario. Skenario pertama menggunakan nilai *acceleration mean* sebagai representasi intensitas getaran rata-rata yang menggambarkan kondisi lalu lintas normal. Skenario kedua menggunakan nilai *maximum peak particle sum*, yang mewakili kondisi getaran paling ekstrem dan berpotensi menyebabkan respons kritis pada massa batuan. Penerapan kedua kondisi ini bertujuan untuk menilai sensitivitas kestabilan terowongan terhadap rentang variasi getaran yang terjadi akibat kendaraan yang melintas di atas terowongan. Hasil visualisasi pemodelan pada ketiga kondisi tersebut ditunjukkan berturut-turut pada Gambar 9, Gambar 10, dan Gambar 11.



Gambar 9. Hasil Analisis Numerik RS2 pada Kondisi Statis



Gambar 10. Hasil Analisis Numerik RS2 pada Kondisi Dinamis dengan Nilai PPV *Mean*

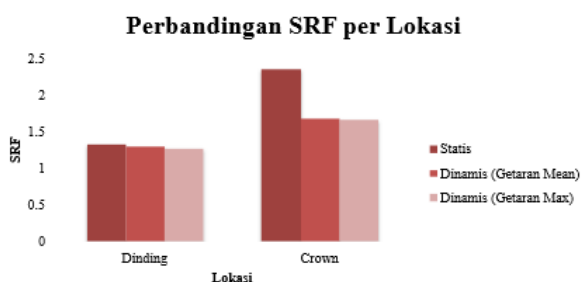


Gambar 11. Hasil Analisis Numerik RS2 pada Kondisi Dinamis dengan Nilai PPV Maksimum

Berdasarkan kontur *Strength Reduction Factor* (SRF) pada Gambar 9, 10, dan 11, zona massa batuan yang berjarak jauh dari bukaan terowongan didominasi nilai SRF tinggi ($SRF > 2$), sehingga secara umum berada dalam kondisi stabil. Sebaliknya, zona kritis terfokus di sekitar dinding dan *crown*, yang merupakan area paling sensitif terhadap perubahan pembebanan.

Pada kondisi statis, nilai SRF kritis tercatat sebesar 1,32 pada dinding dan 2,35 pada *crown* (Gambar 9). Ketika beban dinamis berupa getaran kendaraan dengan nilai *mean* diterapkan, terjadi penurunan kecil menjadi 1,30 pada dinding dan 1,67 pada *crown* (Gambar 10). Penerapan beban dinamis dengan getaran maksimum menyebabkan penurunan lanjutan, yaitu menjadi 1,26 pada dinding dan 1,66 pada *crown* (Gambar 11).

Tren penurunan ini juga terlihat pada grafik perbandingan SRF statis–dinamis di dinding dan *crown* (Gambar 12) yang menunjukkan pola penurunan konsisten seiring peningkatan intensitas getaran. Hal ini mengindikasikan adanya reduksi margin keamanan, meskipun secara keseluruhan terowongan tetap berada dalam kondisi stabil karena seluruh nilai SRF lebih besar dari satu ($SRF > 1$).



Gambar 12. Perbandingan Nilai SRF pada Dinding dan *Crown* Terowongan untuk Kondisi Statis dan Dinamis

Hal ini sejalan dengan visualisasi sebaran zona plastis (*yielded zones*) pada *output* RS2, yang menunjukkan bahwa elemen batuan yang telah mencapai atau

mendekati kondisi leleh plastis terutama terkonsentrasi di sekitar perimeter bukaan, khususnya pada bagian dinding dan *crown*. Pada kondisi dengan beban getaran kendaraan, zona *yielded* tampak sedikit meluas dibandingkan kondisi statis, yang mengindikasikan adanya peningkatan lokal akumulasi tegangan serta deformasi di sekitar terowongan.

Kombinasi antara penurunan nilai SRF dan perluasan zona *yielded* tersebut memperkuat bahwa dinding dan *crown* merupakan area dengan sensitivitas tertinggi terhadap pengaruh beban dinamis berulang, sehingga menjadi fokus dalam evaluasi kestabilan terowongan. Namun, dengan mempertimbangkan kemungkinan pelapukan massa batuan maupun pengaruh gempa di masa mendatang, terowongan tetap disarankan untuk diberikan sistem penyangga. Hal ini menjadi semakin penting mengingat terowongan merupakan lokasi bersejarah, sehingga pemasangan penyanggaan berperan dalam menjaga agar struktur tidak runtuh sekaligus memperkuat kestabilan jangka panjang terowongan.

KESIMPULAN

Penelitian ini memberikan evaluasi kuantitatif terhadap pengaruh getaran kendaraan pada kestabilan terowongan bekas tambang bawah tanah yang berada tepat di bawah jalan raya. Suatu konteks yang selama ini jarang dikaji dengan mempertimbangkan kondisi terowongan yang tidak diperkokoh penyangga serta sifat getaran kendaraan yang repetitif. Integrasi data *Peak Particle Velocity* (PPV) hasil pengukuran lapangan dengan pemodelan numerik menggunakan *Strength Reduction Factor* (SRF) menunjukkan bahwa nilai SRF pada kondisi statis adalah 1,32 pada dinding dan 2,35 pada *crown*, kemudian menurun menjadi 1,30 dan 1,67 pada kondisi dinamis *mean*, serta turun lebih lanjut menjadi 1,26 dan 1,66 pada kondisi dinamis maksimum.

Penurunan ini mencerminkan adanya degradasi margin keamanan akibat beban dinamis berulang, meskipun terowongan secara keseluruhan masih dikategorikan stabil ($SRF > 1$) pada kondisi getaran *eksisting*. Visualisasi zona plastis (*yielded zones*) juga menunjukkan perluasan area *yielded* pada kondisi dinamis, khususnya di dinding dan *crown*, yang menandakan peningkatan akumulasi tegangan lokal. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berhasil memetakan hubungan antara intensitas getaran kendaraan, respons massa batuan, dan potensi risiko terhadap infrastruktur di atasnya, tetapi juga menggaris-bawahi perlunya evaluasi lanjutan dan pertimbangan pemasangan penyangga untuk menjaga kestabilan jangka panjang terowongan bersejarah tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Salmi, E. F., & Sellers, E. J. (2022). A rock engineering system based abandoned mine

- instability assessment index with case studies for Waihi gold mine. *Eng Geol*, 310.
- [2] Lee, H.-W., Lee, S.-J., & Choi, S.-O. (2023). Evaluation of traffic vibration effect for utilization of abandoned mine openings. *Tunnel & Underground Space*, 33(2), 95–107.
- [3] Le Gonidec, Y., Kergosien, B., Wassermann, J., Jaeggi, D., & Nussbaum, C. (2021). Underground traffic-induced body waves used to quantify seismic attenuation properties of a bimaterial interface nearby a main fault. *J Geophys Res Solid Earth*, 126(8).
- [4] California Department of Transportation. (2013). *Transportation and construction vibration guidance manual*. Retrieved from <http://www.dot.ca.gov/hq/env/noise/index.htm>.
- [5] Xie, L., Yu, Q., Liu, J., Wu, C., & Zhang, G. (2024). Prediction of ground vibration velocity induced by long hole blasting using a particle swarm optimization algorithm. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(9).
- [6] Wang, X., Hou, X., Yuan, W., He, C., Sarfarazi, V., & Fan, H. (2024). Attenuation of blast-induced vibration on tunnel structures. *Geohazard Mechanics*, 2(3), 153–163.
- [7] Nateghi, R., Kiany, M., & Gholipouri, O. (2009). Control negative effects of blasting waves on concrete of the structures by analyzing of parameters of ground vibration. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(6), 608–616.
- [8] Queensland Department of Transport and Main Roads. (2025). *TN03: Guidelines for construction-induced ground vibration on structures*. Technical Note.
- [9] Duvall, W. I., & Fogelson, D. E. (1962). *Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations*. U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations 5968.
- [10] Dowding, C. H. (1980). Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/255119822>.
- [11] Volpe, J. A. (2018). *Transit noise and vibration impact assessment manual*.
- [12] German Institute for Standardization. (n.d.). *Vibrations in buildings - Part 3: Effects on structures*. Retrieved from <https://www.din.de>.
- [13] Luo, Y., Wei, X., Huang, J., Zhang, G., Bian, X., & Li, X. (2021). PPV distribution of sidewalls induced by underground cavern blasting excavation. *Sci Rep*, 11(1).
- [14] Xue, F., Xia, C., Li, G., Jin, B., He, Y., & Fu, Y. (2019). Safety threshold determination for blasting vibration of the lining in existing tunnels under adjacent tunnel blasting. *Advances in Civil Engineering*, 2019.
- [15] Rocscience Inc. (2004). *Application of the finite element method to slope stability*. Toronto.
- [16] Maryanto, S. (2015). Perkembangan sedimentologi batugamping berdasarkan data petrografi pada Formasi Sentolo di sepanjang lintasan Pengasih, Kulonprogo. *Geological Engineering Diponegoro University*.
- [17] Cenek, P. D., Sutherland, A. J., & McIver, I. R. (2012). *Ground vibration from road construction*. NZ Transport Agency.
- [18] Yang, R. (2025). Relationship between peak particle acceleration, velocity and displacement of blast vibration.
- [19] Alcudia, A. D., Stewart, R. R., Eliuk, N., & Espersen, R. (2007). Vibration monitoring and air pressure monitoring of seismic sources.
- [20] InstanTel. (2018). *Micromate vibration and overpressure monitor – Operator manual*.
- [21] Rocscience Inc. (2024). *RS2 overview*. Retrieved from <https://www.rocscience.com/help/rs2/overview/rs2-overview>.
- [22] Slama, A., El-Amin, M. F., & Kou, J. (2022). Numerical modeling of nanoparticle transport in porous media. *Elsevier*.
- [23] Hammah, R. E., Curran, J. H., Yacoub, T. E., & Corkum, B. (2005). Shear strength reduction technique for finite element slope stability analysis. *International Journal of Geomechanics*, 5(4), 1–9.
- [24] Rocscience Inc. (2024). *Yielded elements (RS2 documentation)*. Retrieved from <https://www.rocscience.com/help/rs2/documentation/rs2-interpret/data-contours/basic-data/yielded-element>.