

# PEMODELAN NUMERIK PENENTUAN PANJANG LAJU PENGALIAN UNTUK TEROWONGAN JALAN (NUMERICAL MODELLING FOR DETERMINATION OF ROAD TUNNEL EXCAVATION ROUND LENGTH)

Fahmi Aldiamar<sup>1)</sup>, Susy K Ariestianty<sup>2)</sup>

<sup>1,2</sup> Pusat Litbang Jalan dan Jembatan  
Jl. A.H. Nasution No. 264, Bandung, 40294,  
e-mail : <sup>1)</sup>fahmi.aldiamar@pusjatan.pu.go.id, <sup>2)</sup>susy.kartika@pusjatan.pu.go.id  
Diterima: 19 September 2014; direvisi: 19 November 2014; disetujui: 3 Desember 2014

## ABSTRAK

Panjang laju penggalian terowongan jalan harus direncanakan dengan mempertimbangkan perilaku batuan, bentuk penampang dan tahapan penggalian yang dilakukan. Pendekatan empiris berdasarkan kategori massa batuan umumnya digunakan untuk menentukan panjang laju penggalian. Untuk mengetahui efektivitas dan kesesuaian pendekatan empiris ini, maka dilakukan permodelan numerik 3 dimensi dengan metode elemen hingga. Dua kategori massa batuan yaitu kelas massa batuan dari Bieniawski (1989) dan klasifikasi dari Jepang (JSCE, 2007) dibandingkan untuk mendapatkan parameter desain yang akan dimodelkan. Terowongan jalan dua lajur dengan diameter 10 m yang melewati jenis batuan dengan kategori V (sangat jelek) digunakan dievaluasi dalam permodelan. Bentuk penampang penggalian terowongan yang dimodelkan terdiri dari 3 (tiga) model, yaitu: penggalian muka bidang galian dengan bench tambahan, bench kecil dan bench ganda. Permodelan dilakukan untuk mengetahui dua kondisi, yaitu kondisi mendekati kondisi keruntuhan (kritis), yaitu  $FK \approx 1$ , dan kondisi di atas  $FK$  minimum yang disyaratkan ( $FK \geq 1,8$ ). Hasil analisis menunjukkan bahwa metode penggalian bench ganda dengan panjang laju penggalian maksimum 1,00 m memenuhi kriteria faktor keamanan minimum yang disyaratkan. Hal ini juga menunjukkan kriteria panjang laju penggalian berdasarkan JSCE (2007) lebih mendekati dibandingkan dengan Bieniawski (1989) yang mensyaratkan laju penggalian 1,5 m.

**Kata kunci:** laju penggalian, terowongan jalan, metode elemen hingga, model 3D, penampang penggalian

## ABSTRACT

The round length of tunnel excavation should be designed by considering the behaviour of rock mass, the shape of tunnel cross section and the phases of excavation. In general, empirical approach based on rock mass classification is used to determine the round length of tunnel excavation. Therefore, to perceive the effectiveness and suitability of this empirical method, three dimensional numeric modellings using finite element method were applied. Two rock mass classifications i.e. Rock Mass Rating classification established by Bieniawski (1989) and classification from Japan (JSCE, 2007) were compared to determine design parameters that used. Two-lane road tunnel with diameter of 10 m categorized into very poor rock mass (category V) was evaluated in the modelling. The shape of tunnel cross section applied consist of 3 (three) models, namely: tunnel face excavation with additional bench, small bench and double bench. Modelling was applied in two conditions, i.e.: for critical condition with  $SF \approx 1$ , and for the condition above the minimum requirements,  $SF \geq 1,8$ . The result shows that double bench method with maximum round length of excavation 1,00 m satisfy the minimum safety factor criteria. Accordingly, the round length excavation based on JSCE (2007) showed better result compared to Bieniawski (1989) that requires excavation round length of 1,5 m.

**Keyword:** round length, road tunnel, finite element method, 3D model, shape of excavation section

## PENDAHULUAN

Penentuan panjang laju penggalian umumnya ditentukan menggunakan pendekatan empiris berdasarkan kategori massa batuan yang akan digali. Oleh karenanya, panjang laju penggalian harus direncanakan dengan mempertimbangkan pemahaman terhadap perilaku batuan yang digali serta bentuk penampang dan tahapan penggalian yang dilakukan.

Ketentuan-ketentuan dan tipikal penentuan panjang laju penggalian dijelaskan oleh beberapa pedoman teknis luar negeri. Pedoman teknis perancangan dan pelaksanaan terowongan jalan yang dikeluarkan oleh *Federal Highway Administration (FHWA)* pada tahun 2009 membahas mengenai rekomendasi panjang laju penggalian berdasarkan kelas massa batuan (*Rock Mass Rating/ RMR*) dari Bieniawski (1989) yang juga merupakan bagian dari penentuan tipe perkuatan dan metode penggalian terowongan dengan lebar 10 m.

Standar spesifikasi terowongan pegunungan yang diterbitkan pada tahun 2007 oleh himpunan teknik sipil Jepang (*Japan Society of Civil Engineers, JSCE*) menjelaskan pula tipikal panjang laju penggalian berdasarkan klasifikasi batuan yang akan digali. Penentuan panjang laju penggalian berdasarkan FHWA (2009) dan JSCE (2007) didasarkan oleh pendekatan empiris dari kumpulan pengalaman dan pengamatan proyek konstruksi terowongan.

Hingga saat ini belum tersedia kriteria keamanan dalam bentuk faktor keamanan yang digunakan pada penentuan panjang laju penggalian terowongan jalan. Umumnya kriteria keamanan yang dinyatakan pada standar atau pedoman teknis luar negeri didasarkan pada batas deformasi izin.

Selain itu kondisi seismotektonik Indonesia yang aktif mengakibatkan terbentuknya formasi batuan yang bervariasi dan kondisi geologi yang kompleks sehingga kemungkinan untuk didapatnya kondisi pembangunan terowongan pada kelompok massa batuan V (sangat jelek) sangatlah besar.

Untuk mengetahui panjang laju penggalian terowongan pada kelompok massa batuan V dengan bentuk penampang galian yang sesuai dengan kriteria JSCE (2007) dan

Bieniawski (1989) berdasarkan faktor keamanan minimum SNI 03-1962-1990.

Permodelan ini dilakukan untuk memberikan informasi kesesuaian pendekatan empiris yang dinyatakan oleh standar spesifikasi terowongan pegunungan (JSCE 2007) terhadap pendekatan analitis menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan peranti lunak *Plaxis 3D tunnel*. Kategori batuan yang digunakan pada permodelan didasarkan pada kelompok massa batuan V (sangat jelek) berdasarkan klasifikasi massa batuan (Bieniawski 1989), yang setara/mendekati dengan kategori batuan D berdasarkan standar spesifikasi terowongan pegunungan (JSCE 2007).

Bentuk penampang penggalian terowongan yang dimodelkan terdiri dari 3 (tiga) model, yaitu penggalian muka bidang galian dengan *bench* tambahan, *bench* kecil dan *bench* ganda berdasarkan JSCE (2007).

## KAJIAN PUSTAKA

### Klasifikasi batuan

Klasifikasi batuan ditentukan oleh parameter-parameter yang merupakan kombinasi antara pengujian lapangan dan laboratorium serta diidentifikasi oleh ahli di bidangnya. Untuk mengetahui kesetaraan kategori batuan antara standar spesifikasi terowongan pegunungan (JSCE 2007) dan salah satu penentuan klasifikasi massa batuan oleh Bieniawski (1989) pada FHWA (2009), maka dilakukan identifikasi terhadap parameter parameter yang disyaratkan oleh kedua kriteria tersebut.

Identifikasi awal dari parameter kondisi inti pengeboran *RQD (Rock Quality Designation)* (Deere 1963) yang disyaratkan oleh JSCE (2007) dan Bieniawski (1989), ditunjukkan pada perbandingan rentang nilai dan klasifikasi kategori batuan seperti diperlihatkan pada Tabel 1. Pengukuran nilai *RQD* mengacu pada ASTM D6032 – 08. Kategori batuan berdasarkan JSCE (2007) terlihat memiliki rentang nilai *RQD* yang lebih rendah dibandingkan dengan Bieniawski (1989). Hal ini mengindikasikan bahwa kategori batuan JSCE (2007) kemungkinan didasarkan oleh pendekatan empiris dengan

kondisi batuan yang lebih jelek dibandingkan dengan Bieniawski (1989).

Salah satu contoh pembangunan terowongan yang melewati kelompok massa batuan V (sangat jelek) adalah terowongan pengelak Jatigede. Terowongan pengelak Jatigede memiliki panjang ± 600 m dengan diameter penampang galian antara 12-14 m dan melewati 3 kelompok massa batuan dengan parameter massa batuan diperlihatkan pada Tabel 2. Kelompok massa batuan V pada terowongan pengelak Jatigede umumnya ditemui pada batuan breksi vulkanik yang berada pada zona patahan.

### Parameter desain permodelan dan tipikal panjang laju penggalian terowongan

Parameter desain yang diperlukan adalah parameter batuan yang mewakili kondisi kelompok massa batuan yang akan dimodelkan. Klasifikasi massa batuan berdasarkan Bieniawski (1989), selain memberikan parameter parameter untuk menentukan kategori kelompok massa batuan juga memberikan rentang parameter kekuatan batuan

yang terdiri dari parameter kohesi (c) dan sudut geser massa batuan (φ).

Klasifikasi kategori batuan berdasarkan JSCE (2007) hanya memberikan parameter parameter untuk menentukan kategori batuan dan tidak menginformasikan parameter kekuatan batuanya. Oleh karenanya, permodelan dengan metode numerik dilakukan dengan mengacu pada parameter kekuatan batuan yang direkomendasikan oleh Bieniawski (1989) seperti diperlihatkan pada Tabel 3 dan ditambahkan dengan pendekatan empiris lainnya untuk melengkapi model konstitutif batuan yang akan dimodelkan.

Modulus deformasi batuan yang digunakan mengacu pada persamaan 1 (Galera, et al. 2005) untuk  $RMR < 50$  dan persamaan 2 untuk  $RMR > 50$ .

$$E_m (GPa) = 0,0876.RMR \dots\dots\dots (1)$$

$$E_m (GPa) = 0,0876.RMR + 1,056(RMR - 50) \dots\dots (2) + 0,015(RMR - 50)^2$$

Keterangan:

$E_m$  adalah modulus deformasi (GPa)

$RMR$  adalah nilai kelas massa batuan

**Tabel 1.** Perbandingan klasifikasi batuan

Klasifikasi berdasarkan JSCE (2007)		Klasifikasi berdasarkan <i>Bieniawski</i> (1989)		
Kategori batuan	<i>RQD</i> (%)	Kelompok massa batuan	<i>RQD</i> (%)	<i>RMR</i>
CI	40-70	III (cukup)	50-75	41-60
CII	10-39	IV (jelek)	25-49	21-40
DI	< 10	V (sangat jelek)	< 25	<21
DII				

**Tabel 2.** Klasifikasi massa batuan terowongan Jatigede (Hastowo, P. dan Sambodo, P., 2013)

Kelompok massa batuan	<i>RQD</i> (%)	<i>RMR</i>
III (cukup)	25-50	44
IV (jelek)	25	22
V (sangat jelek)	<25	<22

Koefisien permeabilitas batuan yang digunakan mengacu pada persamaan 3 (Mohsin U Q., et al. 2014).

$$K_a = 0,01382 - 0,003 \ln RQD \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

$K_a$  adalah koefisien permeabilitas (cm/detik)

$RQD$  adalah kondisi inti pengeboran (%)

Penentuan tipikal panjang laju penggalian antara JSCE (2007) dan Bieniawski (1989) berdasarkan pendekatan empiris diperlihatkan pada Tabel 4. Panjang tipikal yang ditentukan oleh JSCE (2007) terlihat lebih pendek dibandingkan dengan Bieniawski (1989). Hal ini semakin menguatkan penjelasan sebelumnya, yaitu kategori batuan JSCE kemungkinan didasarkan oleh pendekatan empiris dengan kondisi batuan yang lebih jelek dibandingkan dengan Bieniawski.

**Faktor keamanan penggalian terowongan**

Faktor keamanan umumnya dinyatakan dalam perencanaan sebagai kapasitas daya dukung yang melampaui beban rencana. Untuk kasus penggalian terowongan, faktor keamanan dinyatakan sebagai kapasitas daya dukung batuan/tanah yang melampaui daya dukung kritisnya.

Mengingat belum tersedianya kriteria desain faktor keamanan minimum yang

disyaratkan untuk terowongan jalan, maka kriteria yang digunakan untuk evaluasi mengacu pada faktor keamanan lereng seperti diperlihatkan pada Tabel 5. Kriteria faktor keamanan SNI 03-1962-1990 cukup memadai karena konsep penentuan nilai faktor keamanan umumnya didasarkan pada kriteria risiko dan parameter kekuatan geser tanah/batuan yang digunakan dalam perencanaan. Kriteria risiko tinggi yaitu bila ada konsekuensi terhadap manusia cukup besar, dan atau bangunan sangat mahal, dan atau sangat penting. Risiko menengah bila ada konsekuensi terhadap manusia tetapi sedikit, dan atau bangunan tidak begitu mahal dan atau tidak terlalu penting. Adapun untuk risiko rendah yaitu bila tidak ada konsekuensi terhadap manusia dan terhadap bangunan.

Parameter kekuatan geser digunakan dalam penentuan tingkat risiko, yaitu kekuatan geser maksimum dan kekuatan geser sisa/residual. Kekuatan geser maksimum adalah harga puncak dan dipakai apabila massa tanah/batuan yang potensial longsor tidak mempunyai bidang diskontinuitas (perlapisan, rekahan, sesar, dan sebagainya) dan belum pernah mengalami gerakan. Kekuatan geser residual dipakai apabila: (i) massa tanah/batuan yang potensial bergerak mempunyai bidang diskontinuitas, dan atau (ii) pernah bergerak (walaupun tidak mempunyai bidang diskontinuitas)

**Tabel 3.** Parameter desain berdasarkan korelasi empiris

Kelompok massa batuan	$RQD$ (%)	$RMR$	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	$K_a$ (m/hari)	$E_m$ (Kpa)
V (sangat jelek)	15	15	22	50	10	4,921	1.314.000

Keterangan:

$\gamma$  adalah berat isi batuan (kN/m<sup>3</sup>)

$c$  adalah kohesi (kN/m<sup>2</sup>)

$K_a$  adalah koefisien permeabilitas (m/hari)

$E_m$  adalah modulus deformasi batuan (Kpa)

**Tabel 4.** Komparasi panjang laju penggalian

Kelompok massa batuan	Panjang laju penggalian (m) (JSCE, 2007)	Panjang laju penggalian (m) (Bieniawski, 1989)
V (sangat jelek)	≤ 1,0	0,5-1,5

**Tabel 5.** Rekomendasi nilai faktor keamanan untuk lereng (SNI 03-1962-1990)

Risiko	Parameter Kekuatan Geser			
	Maksimum		Sisa	
	Teliti	Kurang teliti	Teliti	Kurang teliti
Tinggi	1,80	2,00	1,60	1,80
Menengah	1,50	1,80	1,35	1,50
Rendah	1,25	1,40	1,10	1,20

Terowongan adalah konstruksi yang memiliki risiko tinggi, karena dapat mempengaruhi keselamatan kerja manusia yang bekerja di dalam terowongan dan masuk kategori bangunan yang penting. Dengan menggunakan asumsi parameter kuat geser permodelan merupakan parameter maksimum yang didapatkan dari hasil pengujian yang teliti, maka faktor keamanan minimum yang disyaratkan dalam permodelan ini adalah 1,8.

Analisis keamanan (*safety analysis*) penggalian terowongan dilakukan menggunakan analisis numerik dengan metode elemen hingga dengan bantuan piranti lunak Plaxis *3D tunnel* (R.B.J.Brinkgreve and W.Broere, 2004). Konsep analisis keamanan menggunakan *Plaxis 3D tunnel* adalah dengan mengurangi parameter kekuatan tanah/batuan (sudut geser dalam,  $\phi$  dan kohesi,  $c$ ) atau dikenal dengan metode pengurangan  $\phi$ - $c$  ( $\phi$ - $c$  reduction) dengan persamaan dasar sebagai berikut:

$$\sum Mfk = \frac{\tan \phi_{input}}{\tan \phi_{direduksi}} = \frac{c_{input}}{c_{direduksi}} \dots\dots\dots (4)$$

$$FK = \frac{\text{kekuatan yang tersedia}}{\text{kekuatan saat runtuh}} \dots\dots\dots (5)$$

= nilai  $\sum Mfk$  saat runtuh

Keterangan:

$\sum Mfk$  adalah pengali faktor keamanan total saat runtuh (*total multiplier safety factor*)

$\phi$  adalah sudut geser dalam (derajat)

$c$  adalah kohesi (kN/m<sup>2</sup>)

$FK$  adalah faktor keamanan

## HIPOTESIS

Penggalian terowongan menggunakan metode penggalian *bench* ganda dengan panjang laju penggalian maksimum 1,00 m pada klasifikasi massa batuan V memenuhi

kriteria minimum faktor keselamatan yang disyaratkan ( $FK \geq 1,8$ ).

## METODOLOGI

Evaluasi model numerik menggunakan Plaxis *3D tunnel* dilakukan untuk menentukan panjang laju penggalian dilakukan menggunakan variasi bentuk penampang penggalian seperti diperlihatkan pada Tabel 6.

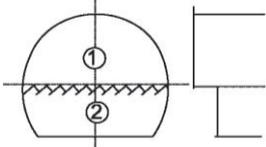
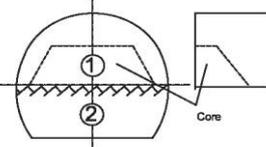
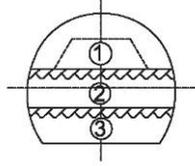
Diameter terowongan yang dimodelkan adalah 10.00m dengan ilustrasi penampang diperlihatkan pada Gambar 1 dan tebal lapisan penutup yang dimodelkan adalah 2 kali diameter terowongan ( $2 \times 10 \text{ m} = 20 \text{ m}$ ).

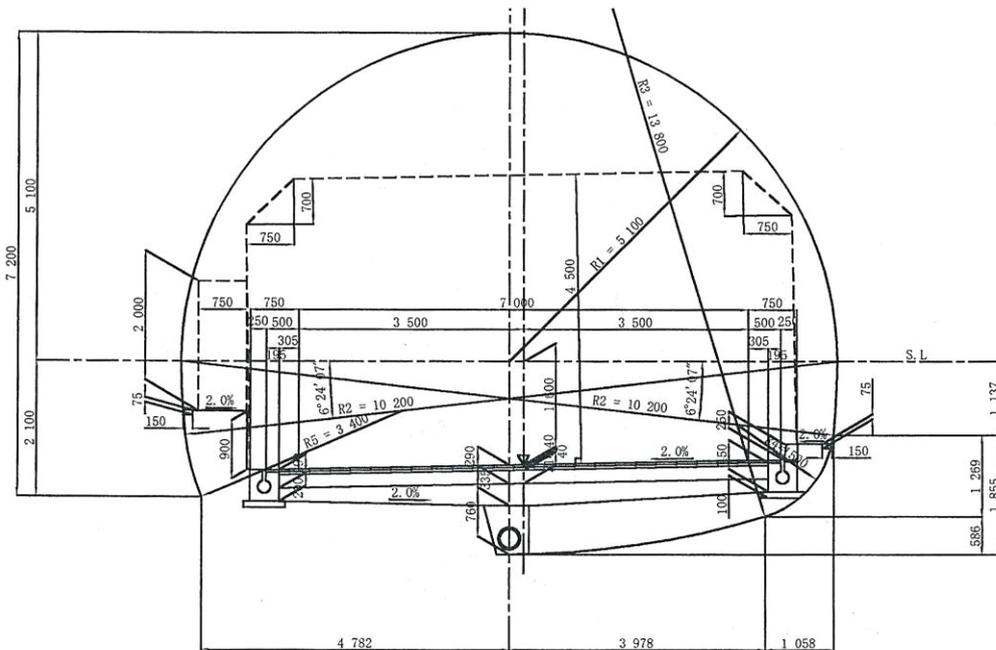
Terdapat tiga model penampang yang didasarkan pada pembagian muka bidang galian. Jenis batuan yang digunakan pada permodelan adalah batuan dengan kategori massa batuan V dengan model homogen. Kajian dilakukan dengan meninjau besar perpindahan total dan faktor keamanan yang dihasilkan pada setiap panjang laju penggalian.

Pada tahap awal perhitungan, gunakan  $\sum Mfk = 1,0$  agar semua parameter kekuatan sesuai dengan parameter masukan dalam peranti lunak. Selanjutnya gunakan faktor pengali reduksi kekuatan sebesar 0,1 hingga model mengalami keruntuhan dan didapatkan nilai faktor keamanan untuk masing-masing tahapan penggalian pada setiap model.

Setiap model penampang dan panjang laju penggalian selanjutnya dievaluasi berdasarkan kondisi kritis, yaitu kondisi panjang laju penggalian yang memiliki Faktor Keamanan sama dengan atau mendekati 1 ( $FK \approx 1$ ). Pada kondisi ini kondisi model mendekati kondisi keruntuhan dan merupakan kondisi yang harus dihindarkan pada tahap penggalian terowongan.

**Tabel 6.** Tipikal metode penggalian terowongan (JSCE 2007)

Metode penggalian	Pembagian muka bidang galian
<p><b>Model-1:</b> Penggalian seluruh muka bidang galian dengan <i>bench</i> tambahan</p>	 <p>Panjang <i>bench</i> 2m-4m</p>
<p><b>Model-2:</b> Metode penggalian dengan <i>bench</i> kecil</p>	 <p>Panjang <i>bench</i> &lt; 5D</p>
<p><b>Model-3:</b> Metode penggalian dengan <i>bench</i> ganda</p>	



**Gambar 1.** Contoh penampang melintang model terowongan dengan kapasitas 2 lajur (JSCE 2007)

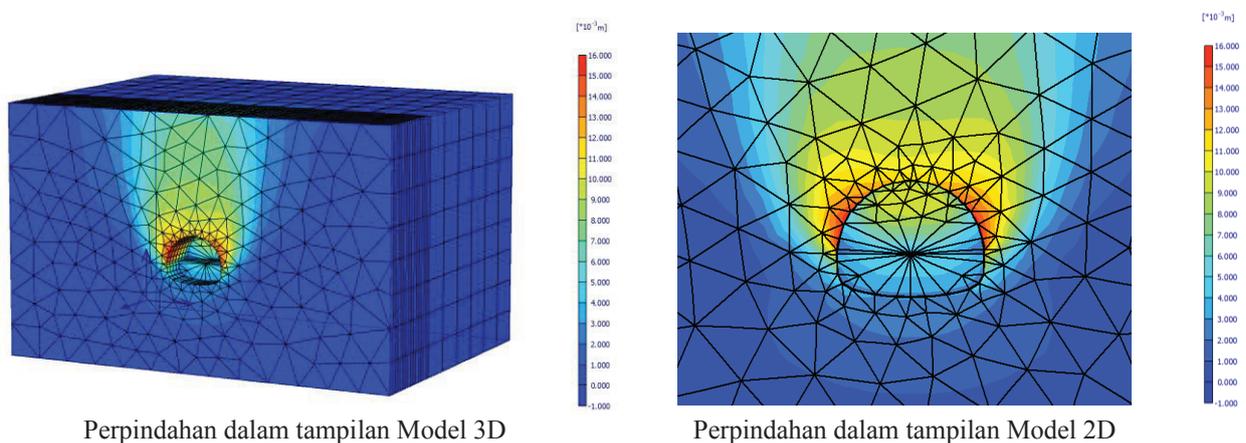
## HASIL DAN ANALISIS

Hasil analisis model-1, 2 dan 3 dengan tahapan penggalian mengacu pada Tabel 6 dan panjang penggalian dilakukan secara bertahap

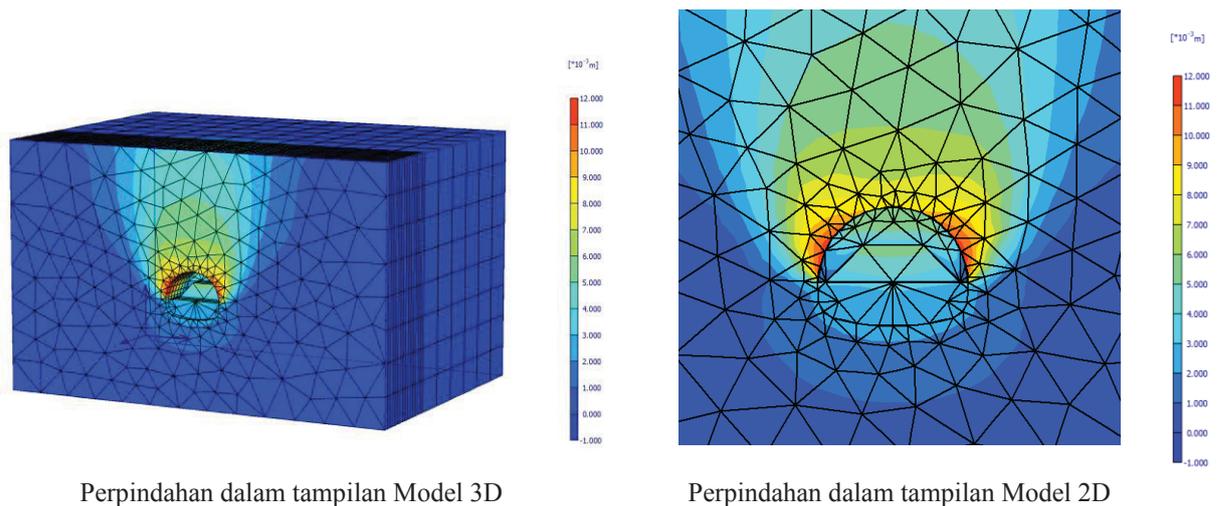
dengan laju penggalian setiap 1 m. Hasil analisis pada model-1 menunjukkan bahwa perpindahan total pada kondisi kritis ( $FK \approx 1$ ) adalah 15,86 mm dengan perpindahan terbesar berada pada daerah lengkungn atap

terowongan seperti diperlihatkan pada Gambar 2. Analisis pada model-2 menunjukkan posisi perpindahan terbesar berada pada lokasi yang sama dengan model-1 dan perpindahan total pada kondisi kritis yang terjadi adalah 11,91 mm seperti diperlihatkan pada Gambar 3. Analisis pada model-3 menunjukkan perpindahan total terkecil dibandingkan dengan model-1 dan model-2, yaitu 10,67 mm dengan posisi perpindahan terbesar berada pada lokasi yang sama dengan model-1 dan model-2 seperti diperlihatkan pada Gambar 4.

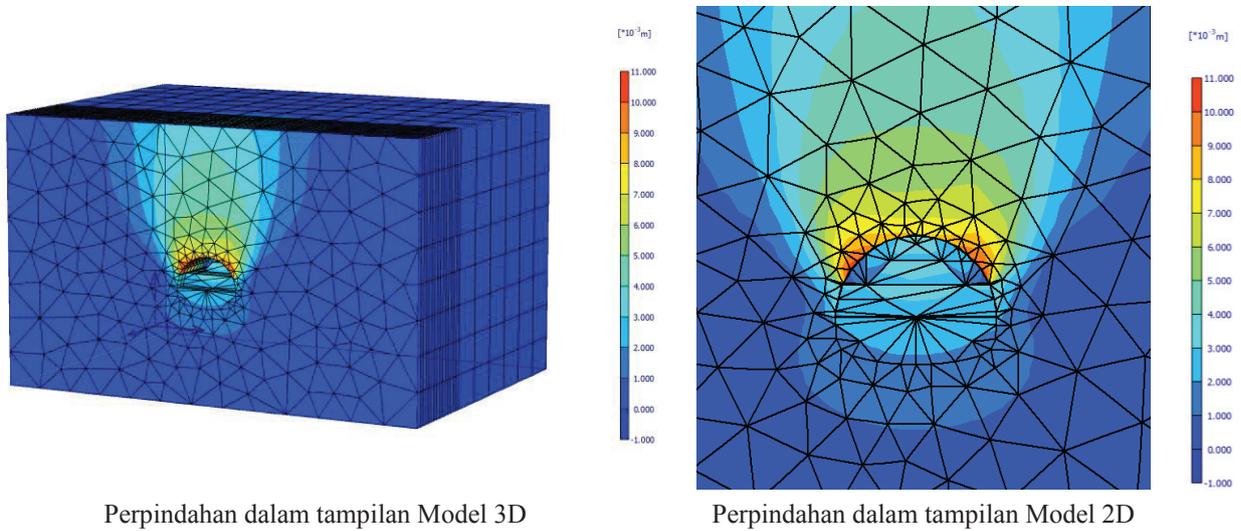
Analisis panjang penggalian menunjukkan bahwa panjang penggalian kritis dengan faktor keamanan mendekati 1 untuk model-1 dan model-2 adalah 7 m, sedangkan untuk model-3 adalah 8 m seperti diperlihatkan pada Gambar 5. Faktor keamanan yang dihasilkan setelah panjang penggalian 1 m adalah 1,56 untuk model-1, 1,70 untuk model-2 dan 1,91 untuk model-3. Analisis faktor keamanan terhadap panjang penggalian menunjukkan, semakin panjang area yang digali, maka semakin kecil faktor keamanan yang dihasilkan.



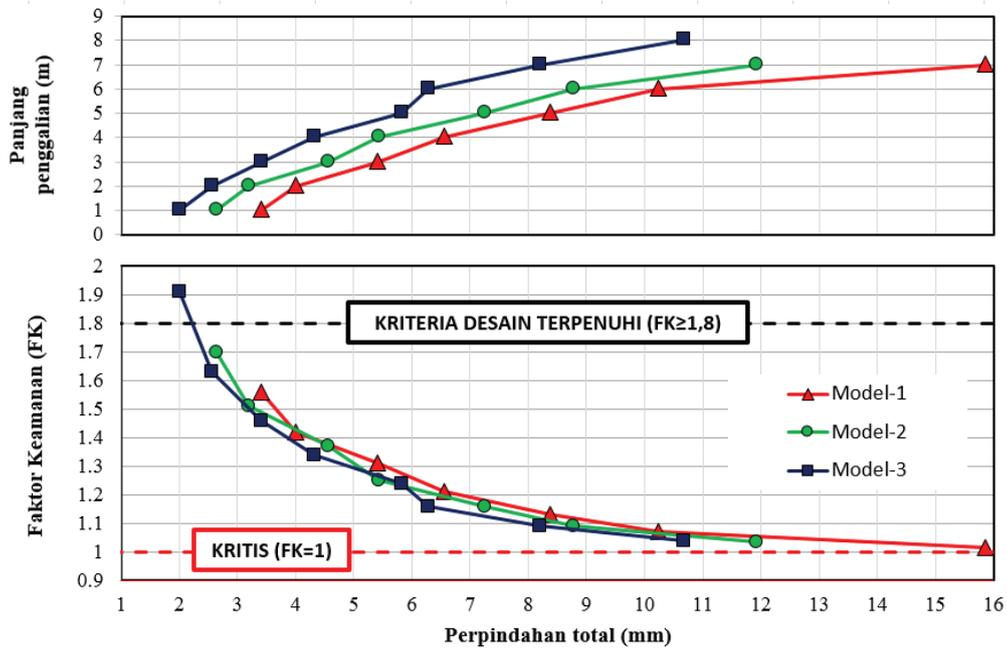
**Gambar 2.** Perpindahan total untuk model-1 pada kondisi kritis ( $FK \approx 1$ )



**Gambar 3.** Perpindahan total untuk model-2 pada kondisi kritis ( $FK \approx 1$ )



Gambar 4. Perpindahan total untuk model-3 pada kondisi kritis ( $FK \approx 1$ )



Gambar 5. Perpindahan total berdasarkan panjang penggalian dan faktor keamanan

## PEMBAHASAN

Model-1 menghasilkan perpindahan total lebih besar dan faktor keamanan yang lebih kecil dibandingkan dengan model-2 dan model-3 untuk setiap panjang laju penggalian. Hal ini menunjukkan bahwa dari cara pandang global, penggalian menggunakan penampang model-1 kurang stabil dibandingkan kedua model lainnya.

Gambar 5 memperlihatkan perpindahan total berdasarkan panjang penggalian dan

faktor keamanan untuk masing-masing model. Berdasarkan hasil tersebut, diketahui bahwa hanya model-3 dengan panjang laju penggalian 1,00 m yang memenuhi kriteria desain keamanan ( $FK \geq 1,8$ ).

Model-1 dan 2 dengan panjang laju penggalian 1,00 m hanya memenuhi kriteria desain risiko menengah. Hal ini secara tidak langsung memberikan gambaran bahwa untuk kelompok massa batuan V (sangat jelek) penggunaan metode penggalian dengan *bench ganda* dan panjang laju penggalian maksimum

1,00 m lebih disarankan dibandingkan metode *bench* tambahan dan *bench* kecil.

Panjang laju penggalian tersebut mengkonfirmasi kesesuaian model dengan kriteria batas maksimum panjang laju penggalian JSCE (2007). Meski berada pada rentang kriteria yang disyaratkan *Bieniawski* (1989), pertimbangan khusus terhadap risiko dan metode konstruksi perlu dilakukan bila panjang penggalian 1,50 m akan digunakan.

Bila metode *bench* tambahan dan *bench* kecil akan digunakan pada klasifikasi massa batuan V, maka penggunaan penyangga awal (*pre-support*) perlu dipertimbangkan agar kondisi batuan diperkuat dan memiliki kemampuan awal yang cukup untuk menopang dirinya sendiri sebelum penggalian dilakukan.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

1. Hasil analisis menunjukkan bahwa metode penggalian dengan *bench* ganda dan panjang laju penggalian maksimum 1,00 m memenuhi kriteria faktor keamanan minimum ( $FK > 1,8$ ) dan sesuai diterapkan untuk kelas massa batuan V.
2. Hasil analisis menunjukkan bahwa kriteria panjang laju penggalian berdasarkan JSCE (2007) lebih mendekati dibandingkan dengan *Bieniawski* (1989).

### Saran

1. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan batuan homogen dan tidak dipengaruhi oleh diskontinuitas batuan akibat pengaguh struktur geologi. Oleh karenanya, untuk massa batuan yang dipengaruhi oleh struktur geologi, perlu dilakukan kajian menggunakan peranti lunak yang sesuai.
2. Bila metode *bench* tambahan dan *bench* kecil akan digunakan pada klasifikasi massa batuan V, maka perlu dilakukan evaluasi penggunaan penyangga awal (*pre-support*) bersama dengan metode tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

- American Society for Testing and Materials, ASTM. 2011. Standard Test Method for Determining Rock Quality Designation (RQD) of Rock Core, ASTM D6032 – 08. *2011 Annual Book of ASTM Standards*. Section four, volume 04.09. West Conshohocken: ASTM International
- Badan Standardisasi Nasional. 1990. *Tata Cara Perencanaan Penanggulangan Longsor*, SNI 03-1962-1990. Jakarta: BSN.
- Bieniawski, Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classification*. New York: John Wiley & Sons.
- Brinkgreve, R.B.J. and W. Broere. 2004. *Plaxis 3D tunnel-version 2 reference manual*. Delft: Delft University of technology & Plaxis B.V.
- Deere, D.U. 1963. "Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes". *Rock Mech. Eng. Geol.* 1, 1963, pp. 16-22.
- Federal Highway Administration. 2009. *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels - Civil Elements*. FHWA-NHI-10-034. New Jersey: FHWA.
- Galera, Jose M., M. Álvarez and Z. T. Bieniawski. 2000. "Evaluation of The Deformation Modulus of Rock Masses: Comparison of Pressure meter and Dilatometer Tests with RMR Prediction". *ISP5-PRESSIO 2005 International Symposium*. [http://www.geocontrol.es/publicaciones/18\\_isp5-international\\_symposium-05\\_evaluation-of-the-deformat.pdf](http://www.geocontrol.es/publicaciones/18_isp5-international_symposium-05_evaluation-of-the-deformat.pdf) (diakses 25 November 2014).
- Hastowo, P. dan P., Sambodo. 2013. "Diversion Tunnel Bendungan Jatigede Sumedang". *Buletin Komite Nasional Indonesia untuk Bendungan Besar (KNI-BB)*. No. 44-45-46 TH.XIV Kwartal I/II/III : 3-9.
- Japan Society of Civil Engineers. 2007. *Standard Specifications for Tunneling-2006: Mountain Tunnels*. Tokyo: JSCE.
- Mohsin U Q., et al., (2014), An Empirical Relationship between In-situ Permeability and RQD of Discontinuous Sedimentary Rocks. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. <http://www.ejge.com/2014/Ppr2014.453ma.pdf>. (Accessed 25 November 2014).