

EVALUASI NUMERIK METODE PENGGALIAN TEROWONGAN CISUMDAWU (NUMERICAL EVALUATION OF CISUMDAWU TUNNEL EXCAVATION METHOD)

Ridwan Umbara¹⁾, I Gde Budi Indrawan²⁾, Fahmi Aldiamar³⁾

¹⁾Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian PUPR, ²⁾Departemen Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, ³⁾Pusat Litbang Jalan dan Jembatan

¹⁾Jl. Pattimura No, 20 Jakarta, ²⁾Jl. Grafika No. 2 Yogyakarta, ³⁾Jl. A.H. Nasution No. 264 Bandung
e-mail: ¹⁾umbara.ridwan@gmail.com, ²⁾igbindrawan@ugm.ac.id, ³⁾fahmi.aldiamar@pusjatan.pu.go.id
Diterima: 28 Mei 2019; direvisi: 26 Juni 2019; disetujui: 28 Juni 2019.

ABSTRAK

Makalah ini menampilkan hasil penelitian yang dilakukan untuk mengevaluasi metode penggalian Terowongan Cisumdawu sisi kiri (barat) menggunakan metode numerik. Menggunakan data hasil penyelidikan tapak dalam proses perancangan dan data hasil face mapping di delapan stasiun titik amat, penggalian terowongan dengan metode penggalian bench ganda (bench cut multiple), metode penggalian seluruh muka bidang galian dengan bench tambahan (full face with bench cut) dan metode penggalian diafragma tengah (centre diaphragm) dimodelkan secara numerik dalam dua dimensi menggunakan metode elemen hingga. Hasil pemodelan numerik dibandingkan dengan hasil pengukuran lapangan untuk menentukan metode penggalian yang paling sesuai diterapkan di Terowongan Cisumdawu. Hasil penelitian menunjukkan roof displacement terowongan dengan metode penggalian bench cut (multiple) yang diperoleh dalam pemodelan numerik mendekati roof displacement pada pengukuran lapangan. Metode penggalian bench cut (multiple) yang diterapkan di lapangan menghasilkan nilai roof displacement lebih rendah dibandingkan metode full face with bench cut dan centre diaphragm. Namun demikian, ketiga metode penggalian tersebut masih memenuhi batasan nilai displacement maksimum 10 cm yang ditentukan dalam JSCE (2007) dan menghasilkan nilai roof strength factor > 1,25 yang menunjukkan terowongan dalam kondisi stabil.

Kata Kunci: metode penggalian, pemodelan numerik, roof displacement, roof strength factor, terowongan Cisumdawu

ABSTRACT

This paper presents results of research works carried out to evaluate the excavation method of the left (west) side of the Cisumdawu Tunnel by a numerical method. Using data obtained from site investigation during design process and face mapping at eight observation points, tunnel excavations by bench cut multiple, full face with bench cut, and centre diaphragm methods were numerically modelled in two dimensions using a finite element method. The numerical modelling results were compared with field measurement results to determine the most suitable excavation method to be applied in Cisumdawu Tunnel. Results of this research showed that roof displacements induced by the bench cut (multiple) excavation method obtained in the numerical modelling was close to that obtained in the field measurement. The bench cut (multiple) excavation method applied in the field induced lower roof displacement value than the full face with bench cut and centre diaphragm methods. However, the three excavation methods induced roof displacements lower than a 10 cm maximum displacement specified in the JSCE (2007) and roof strength factor > 1.25, indicating stable tunnel condition.

Key words: excavation method, numerical method, roof displacement, roof strength factor, Cisumdawu tunnel

PENDAHULUAN

Terowongan Cisumdawu menembus bukit Cilengsar yang berada pada Ruas Jalan Tol Cileunyi – Sumedang – Dawuan (Cisumdawu) Seksi II (Rancakalong – Sumedang) fase II pada STA. 12+628 – STA. 13+100 Provinsi Jawa Barat. Terowongan ini dibangun oleh Satuan Kerja Pelaksanaan Jalan Bebas Hambatan Cisumdawu, Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat menggunakan metode NATM (*New Austrian Tunneling Method*) dengan bentuk penampang tapal kuda (*horse shoe*), lebar 11,7 m, tinggi 8,5 m dan panjang 472 m. Terowongan Cisumdawu terdiri dari 2 (dua) terowongan yaitu terowongan sisi kiri (barat) dan sisi kanan (timur) (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017)

Beberapa penelitian telah dilakukan di terowongan Cisumdawu, Ira dkk. (2017) telah melakukan analisis sistem penyangga untuk mengatasi deformasi yang terjadi di Terowongan Cisumdawu sisi kanan (timur) STA 13+028 hingga STA 13+100. Holomoan (2018) melakukan penelitian metode penggalian Terowongan Cisumdawu pada sisi kanan (timur) antara STA 13+005 hingga STA 13+033 menggunakan metode empiris.

Penggalian Terowongan Cisumdawu sisi kiri (barat) dilakukan dengan menggunakan metode *bench cut multiple*. Selain *bench cut (multiple)*, JSCE (2007) juga merekomendasikan metode penggalian *full face with bench cut* dan *centre diaphragm* untuk diterapkan di Terowongan Cisumdawu yang memiliki lapisan penutup yang dangkal (*shallow overburden*), berada pada media batuan/tanah yang relatif buruk dengan penampang terowongan yang besar ($A > 60 \text{ m}^2$). Kestabilan Terowongan Cisumdawu dengan metode penggalian *bench cut (multiple)*, *full face with bench cut* dan *centre diaphragm* belum pernah dibandingkan.

Makalah ini menampilkan hasil evaluasi metode penggalian *bench cut (multiple)* yang diterapkan di Terowongan Cisumdawu sisi kiri (barat) menggunakan metode numerik. Menggunakan data hasil penyelidikan tapak dalam proses perancangan dan data hasil *face mapping* bukaan terowongan di beberapa stasiun titik amat, penggalian Terowongan Cisumdawu dengan tiga metode yang direkomendasikan dalam JSCE (2007) yaitu *bench cut multiple*, *full face with bench cut* dan *centre diaphragm*,

dimodelkan secara dua dimensi menggunakan metode elemen hingga.

Hasil perbandingan pemodelan numerik diharapkan dapat memberikan gambaran metode penggalian terowongan yang efektif diterapkan di daerah berbatuan vulkanik dengan tingkat pelapukan lanjut seperti di Terowongan Cisumdawu.

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian pada Gambar 1 berada pada Ruas Jalan Tol Cileunyi – Sumedang – Dawuan (Cisumdawu) Seksi II (Rancakalong – Sumedang) fase II pada STA. 12+628 – STA. 13+100 sepanjang 472 meter, daerah Pamulihan, Kecamatan Rancakalong, Kabupaten Sumedang, Provinsi Jawa Barat, dengan koordinat $06^{\circ}52'13,03''$ LS dan $107^{\circ}49'53,31''$ BT pada daerah *inlet* serta $06^{\circ}51'59,40''$ LS dan $107^{\circ}50'0,24''$ BT pada daerah *outlet*.



Gambar 1. Lokasi Terowongan Cisumdawu

Geologi dan Geologi Teknik Regional

Peta Geologi Regional Lembar Bandung Djawa yang disusun oleh Silitonga (1973), menunjukkan bahwa daerah penelitian dan sekitarnya terdiri dari Satuan Hasil Gunung Api Muda Tak Teruraikan (Qyu) dengan litologi pasir tufaan, lapili, breksi, lava dan aglomerat dan Satuan Hasil Gunung Api Tua Tak Teruraikan (Qvu) dengan litologi breksi gunung api, lahar dan lava berseling-seling. Peta Geologi Teknik Lembar Bandung (Djaja dan Hermawan 1996) menunjukkan bahwa lokasi Terowongan Cisumdawu tertutup oleh tanah residu lempung

lanauan dan lanau pasiran hasil pelapukan batu pasir tufaan, tufa, konglomerat, aglomerat, lapilli dan breksi, dengan ketebalan 2 sampai 20 m. Tanah residu ini memiliki karakteristik keteknikan antara lain tingkat plastisitas sedang sampai tinggi, permeabilitas rendah, teguh hingga kaku. Daya dukung tanah yang diijinkan yaitu rendah sampai sedang. Tingkat kemudahan penggalian yaitu mudah sampai agak sulit jika menggunakan peralatan non mekanik. Kondisi kedalaman muka air tanah yaitu sedang hingga dalam.

KAJIAN PUSTAKA

Metode Penggalian Terowongan

JSCE (2007) memberikan pedoman metode penggalian terowongan pada media batuan dan tanah. Metode *full face* dapat digunakan pada semua media batuan atau tanah untuk terowongan dengan penampang yang kecil, namun untuk terowongan dengan penampang yang besar metode ini hanya dapat digunakan pada media batuan atau tanah yang stabil. Metode *full face with bench cut* dapat digunakan pada media batuan/tanah baik diselingi dengan media yang buruk. Metode *bench cut* memiliki kemampuan adaptasi yang baik terhadap perubahan kondisi media batuan atau tanah untuk terowongan dengan penampang yang besar. Metode *centre diaphragm* dapat digunakan pada media batuan/tanah dengan lapisan penutup yang tipis (*shallow overburden*) serta dapat digunakan pada media batuan/tanah yang relatif buruk untuk terowongan dengan penampang yang besar. Metode *side drift advancing* dapat digunakan pada media batuan atau tanah yang memiliki kapasitas daya dukung yang tidak mencukupi untuk menggunakan metode *bench cut* sehingga harus ditingkatkan sebelum penggalian dilakukan serta memerlukan perkuatan sementara (dinding beton maupun diafragma).

Mengacu pada pedoman metode perencanaan penggalian dan sistem perkuatan terowongan jalan pada media campuran tanah – batuan (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat 2015), pemilihan penggalian dilakukan melalui beberapa tahap berikut:

1. Mengevaluasi kondisi media tanah/batuan berdasarkan pengujian di lapangan dan di laboratorium.
2. Menentukan kategori batuan/tanah yang sesuai.

3. Mengevaluasi kelebihan dan kekurangan metode penggalian dan pembagian muka bidang galian berdasarkan aspek-aspek teknis dan kemudahan pelaksanaan.
4. Menentukan metode penggalian berdasarkan JSCE (2007) dan berdasarkan evaluasi dari ketiga poin di atas.

Pemodelan Numerik

Perangkat lunak yang digunakan untuk penelitian ini adalah *Rocscience Inc*. Terdapat 3 (tiga) jenis program keluaran *Rocscience Inc* yaitu slide, RS2 dan RS3. Slide merupakan program dengan metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium method*), sedangkan RS2 dan RS3 menggunakan metode elemen hingga (*finite element method*). Pemodelan yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan pemodelan numerik dua dimensi RS2 (*Rocscience, Inc*). Beberapa parameter masukan dalam pemodelan numerik dua dimensi meliputi *field stress properties*, *material properties*, *support system properties* dan geometri terowongan.

Field stress properties diperlukan untuk menggambarkan tegangan in situ yang terjadi pada bukaan terowongan. Tegangan in situ ditentukan dalam dua arah tegangan yaitu arah horisontal (σ_h) dan arah vertikal (σ_v). Pada arah vertikal, penentuan nilai σ_v didasarkan pada kedalaman lapisan penutup (*overburden*), sedangkan pada arah horisontal penentuan nilai σ_h menggunakan nilai *stress ratio* (k) yang menggambarkan perbandingan antara tegangan *horizontal* dan *vertical*. Karena daerah penelitian didominasi oleh tanah residu, maka penentuan nilai k dilakukan dengan menggunakan persamaan (1) (Jaky'44 dalam Michalowski, 2005):

$$K_0 = 1 - \sin \phi \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

K_0 : tegangan lateral dalam kondisi tanah diam pada kedalaman (*overburden*) tertentu.

Material properties didapatkan dari pengujian sifat keteknikan dan indeks propertis tanah. Pengujian sifat keteknikan tanah meliputi pengujian berat jenis dan kuat geser tanah. Kuat geser tanah (τ_f) diperlukan sebagai bentuk gaya perlawanan butiran tanah terhadap suatu desakan yang akan ditahan oleh kohesi tanah (c) dan gesekan antar butiran tanah (ϕ) yang besarnya berbanding lurus dengan tegangan normal (σ_f) pada bidang gesernya dan dikenal sebagai kriteria keruntuhan *Mohr-Coloumb* (Das, 1988).

Data geometri dan *support system properties* merupakan data perencanaan terowongan yang didapat dari Satuan Kerja Pelaksanaan Jalan Bebas Hambatan Cisumdawu, Kementerian PUPR.

HIPOTESIS

Berdasarkan kondisi geologi teknik daerah penelitian, diperkirakan metode penggalian yang tepat untuk digunakan adalah *bench cut multiple*.

Berdasarkan pemodelan numerik dua dimensi *software RS2 (Rocscience, Inc)*, diperkirakan metode penggalian *bench cut multiple* menghasilkan nilai *roof displacement* yang lebih rendah dibandingkan dengan metode penggalian lainnya yaitu *full face method with bench cut* dan *centre diaphragm method*.

METODOLOGI

Tahapan yang digunakan untuk mengevaluasi metode penggalian yang sesuai untuk terowongan Cisumdawu sebagai berikut:

1. Menentukan kategori jenis tanah dan batuan didasarkan pada data penyelidikan lapangan dan laboratorium untuk mendapatkan parameter desain sesuai dengan kondisi sesungguhnya di lapangan.
2. Melakukan pemodelan numerik dua dimensi menggunakan *software RS2* pada metode *bench cut multiple* sesuai tahapan pelaksanaan konstruksi dilakukan di lapangan untuk *back analysis* kesesuaian parameter tanah yang digunakan pada pemodelan numerik.
3. Melakukan pemodelan numerik pada dua model penggalian lainnya, yaitu *full face with bench cut* dan *centre diaphragm* untuk mengetahui apakah metode lain lebih efektif atau tidak dibandingkan dengan metode *bench cut multiple*.
4. Mengevaluasi model penggalian yang paling sesuai didasarkan pada kriteria deformasi terkecil dan *strength factor* terbesar.

HASIL DAN ANALISIS

Parameter Desain Tanah

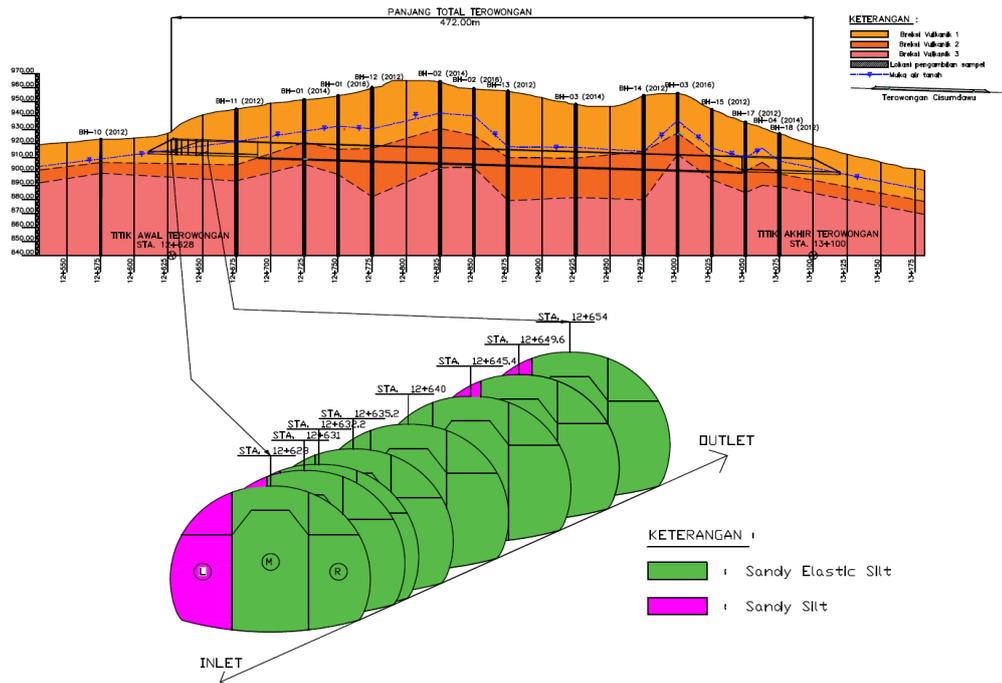
Lokasi konstruksi Terowongan Cisumdawu tersusun oleh litologi breksi vulkanik, sesuai dengan hasil penelitian

Silitonga (1973). Berdasarkan perbedaan karakteristik keteknikannya, breksi vulkanik pada jalur Terowongan Cisumdawu dapat dibagi menjadi tiga lapisan, yaitu lapisan breksi vulkanik 1, 2 dan 3. Hasil *face mapping* menunjukkan bahwa litologi pada jalur terowongan Cisumdawu berupa breksi vulkanik yang telah mengalami pelapukan dengan tingkat tinggi, sehingga data primer yang diambil berupa tanah yang merupakan hasil pelapukan batuan tersebut dan hasil uji laboratorium menunjukkan tanah pada terowongan diklasifikasi sebagai *sandy elastic silt* (MH) dan *sandy silt* (ML) yang ditampilkan pada Gambar 2.

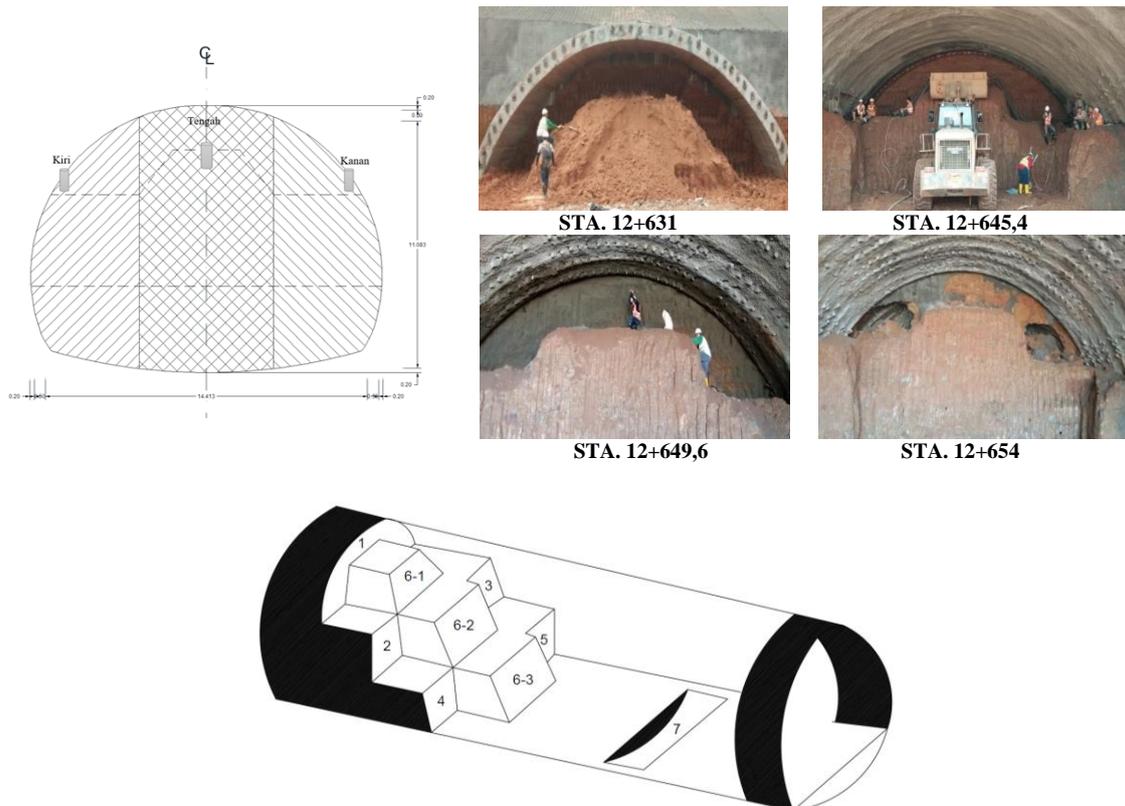
Pengambilan sampel tanah tersebut dilakukan di dalam terowongan sisi kiri sebanyak 8 STA sepanjang 26 meter mulai dari STA. 12+628 hingga STA. 12+654. Pengambilan sampel tanah berupa sampel tanah *disturb* dan *undisturb* dengan menggunakan *shelby tube*, yang dilakukan setiap penggalian dengan jarak penggalian bervariasi. Sampel tanah di bawah permukaan diambil 3 titik yaitu mewakili titik kiri, tengah, dan kanan, yang kemudian diplot dalam suatu *face map* setelah dilakukan pengujian laboratorium. Jumlah sampel tanah yang diambil harus mencukupi kebutuhan beberapa pengujian laboratorium seperti sifat indeks, batas-batas *Atterberg*, distribusi ukuran tanah dan (*X-ray Diffraction, XRD*) yang ditampilkan pada Gambar 3.

Hasil perhitungan rasio tegangan *horizontal* dan *vertical* tanah dalam kondisi *at rest* (K_0) sebagai parameter masukan dalam *field stress properties* menggunakan persamaan (1) (Jaky'44 dalam Michalowski, 2005), menunjukkan bahwa nilai tegangan *vertical* (σ_v) berkisar antara 333 hingga 779 kPa dan nilai K_0 sekitar 0,5, tegangan *horizontal* (σ_h) yang bekerja pada tanah di sekitar terowongan berkisar antara 188 hingga 371 kPa yang ditampilkan pada Tabel 1.

Nilai γ_{bulk} dan γ_{sat} diperoleh dari pengujian sifat indeks. Nilai c' dan ϕ' diperoleh dari pengujian kuat geser tanah berupa *consolidated-undrained (CU) triaxial*. Nilai E diperoleh dari grafik hubungan antara *stress* dan *strain* hasil pengujian *CU triaxial*. Nilai ν diperoleh dari pendekatan jenis tanah yang ditampilkan pada Tabel 2.



Gambar 2. Lapisan batuan sepanjang Terowongan Cisumdawu sisi kiri berdasarkan data seismik dan data pengeboran inti dan *face map* bukaan terowongan



Gambar 3. Pengambilan sampel tanah yang dilakukan di dalam Terowongan Cisumdawu sisi kiri

Nilai *support system properties* diperoleh dari data perencanaan terowongan Satuan Kerja Pelaksanaan Jalan Bebas Hambatan Cisumdawu, Kementerian PUPR. Pemodelan numerik dua dimensi *software RS2 (Rocscience, Inc)*, memiliki keterbatasan dalam

simulasi sistem penyangga yaitu *forepoling*. Perkuatan *forepoling* tidak dapat dimodelkan dengan tipe *bolt* sehingga dimodelkan sebagai *material properties* berupa *composite* (Hoek dalam Hefny dkk. 2004) yang ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 1. Nilai *field stress properties* Terowongan Cisumdawu sisi kiri

Material	H (m)	ρ_b (gr/cm ³)	ρ_b (kg/m ³)	ρ_{sat} (gr/cm ³)	ρ_{sat} (kg/m ³)	σ_v (kPa)	σ_v (MPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)	K ₀	σ_h (kPa)	σ_h (MPa)
Breksi Vulkanik 1 <i>Unsaturated</i>	20,0	1,6	1693,1	-	-	333,2	0,3	40,2	25,7	0,5	188,5	0,1
Breksi Vulkanik 1 <i>Saturated</i>	35,4	-	-	1,7	1738,7	604,9	0,6	40,6	27,7	0,5	323,0	0,3
Breksi Vulkanik 2 <i>Saturated</i>	47,8	-	-	1,6	1660,4	779,4	0,7	35,7	31,5	0,4	371,7	0,3
Breksi Vulkanik 3 <i>Saturated</i>	-	-	-	1,6	1690,0	-	-	44,1	31,0	0,4	-	-

Sumber: PT. Perentjana Djaja (2012); CV. Geocipta Bangun Optima (2014); CV. Geocipta Bangun Optima (2016).

Keterangan: H = ketebalan overburden rata-rata; ρ_b = densitas *bulk*; ρ_{sat} = densitas *saturated*; σ_v = tegangan vertikal; c' = kohesi, ϕ' = sudut gesek dalam; K₀ = tegangan lateral; dan σ_h = tegangan horisontal.

Tabel 2. Nilai *material properties* Terowongan Cisumdawu sisi kiri

Material	γ_b (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (kPa)	ν
Breksi Vulkanik 1 <i>Unsaturated</i>	14,1	-	40,2	25,7	53.039,9	0,3
Breksi Vulkanik 1 <i>Saturated</i>	-	15,8	40,6	27,7	57.074,7	0,3
Breksi Vulkanik 2 <i>Saturated</i>	-	16,3	35,7	31,5	58.055,3	0,3
Breksi Vulkanik 3 <i>Saturated</i>	-	16,2	44,1	31,0	58.545,7	0,3

Sumber: PT. Perentjana Djaja (2012) ; CV. Geocipta Bangun Optima (2014); CV. Geocipta Bangun Optima (2016).

Keterangan: γ_b = *unit weight bulk*; γ_{sat} = *unit weight saturated*; c' = kohesi, ϕ' = sudut gesek dalam; E = modulus elastisitas; dan ν = *poisson's ratio*.

Tabel 3. Nilai *support system properties* terowongan Cisumdawu sisi kiri

Sistem penyangga	s (m)	d (mm)	P (m)	A (m ²)	t (m)	I (m ⁴)	E (kPa)	ν	σ_c (kPa)	σ_T (kPa)	Tesile Capacity (kN)
<i>Steel Arch Rib</i> (H-150x150x7x10)	0,6	-	-	0,0039	-	1,62x10 ⁻⁵	210.000.000	0,3	490.000	490.000	-
<i>Wire Mesh Shotcrete</i>	0,5	-	-	1,62x10 ⁻⁵	-	1,26x10 ⁻¹¹	210.000.000	0,3	400.000	400.000	-
<i>Steel Pipe Grouting</i>	-	0,25	-	-	-	-	24.246.500	0,2	31.000	1.550	-
<i>Steel Pipe Grouting</i>	-	76,3	5	-	-	-	210.000.000	-	-	-	488,659
<i>Forepoling (Composite)</i>	0,6	60,5	5	-	-	-	228.971.929	0,3	-	-	-

Sumber: PT. Hi Way Indotek JO PT. Wahanan Mitra Amerta (2014).

Keterangan: s = spasi; d = diameter; P = Panjang; t = tebal; A = luas permukaan; I = momen inersia; E = modulus elastisitas; ν = *poisson's ratio*; σ_c = kuat tekan; σ_T = kuat tarik.

Pemodelan Numerik

Nilai deformasi (*displacement*) pada makalah ini ditinjau pada bagian atap (*roof*), dengan asumsi bahwa pada bagian tersebut berpotensi mengalami keruntuhan yang terbesar akibat tegangan vertikal (σ_v) yang bekerja diatas terowongan. Nilai *displacement* dibedakan menjadi dua yaitu *roof displacement (excavation stage)* dan *(over all stage)*. *Roof displacement (excavation stage)* merupakan kondisi setelah tahapan pemasangan *forepoling*. *Roof displacement (over all stage)* merupakan kondisi setelah seluruh tahapan penggalian dan pemasangan *steel arch rib*, *wire mesh*, *shotcrete* selesai dilaksanakan. Hal tersebut didasarkan pada hasil pengukuran *displacement* lapangan dari Satuan Kerja Jalan Bebas Hambatan Cisumdawu yang dilakukan secara kontinu pada bagian *roof* terowongan Cisumdawu.

Tahapan analisis pemodelan numerik dua dimensi menggunakan *software RS2 (Rocscience, Inc)*, yang dilakukan pada makalah ini sebagai berikut:

1. Analisis verifikasi secara numerik terhadap metode penggalian *bench cut multiple* sesuai tahapan pelaksanaan konstruksi dilakukan di lapangan. Pemodelan numerik dilakukan untuk mendapatkan nilai *displacement* yang paling mendekati dengan hasil pengukuran lapangan (*back analysis*), sehingga dapat menunjukkan kesesuaian parameter masukan yang digunakan pada permodelan numerik dan nilai *displacement* tersebut memenuhi persyaratan nilai *displacement* yang diijinkan dalam JSCE (2007) sebesar 0,1 m.
2. Analisis penentuan metode penggalian yang efektif secara numerik. Pemodelan numerik dilakukan untuk mendapatkan nilai *displacement* yang paling kecil diantara ketiga metode penggalian yang dibahas pada makalah ini yaitu *full face with bench cut*, *bench cut multiple* dan *centre diaphragm* dan nilai *displacement* tersebut memenuhi

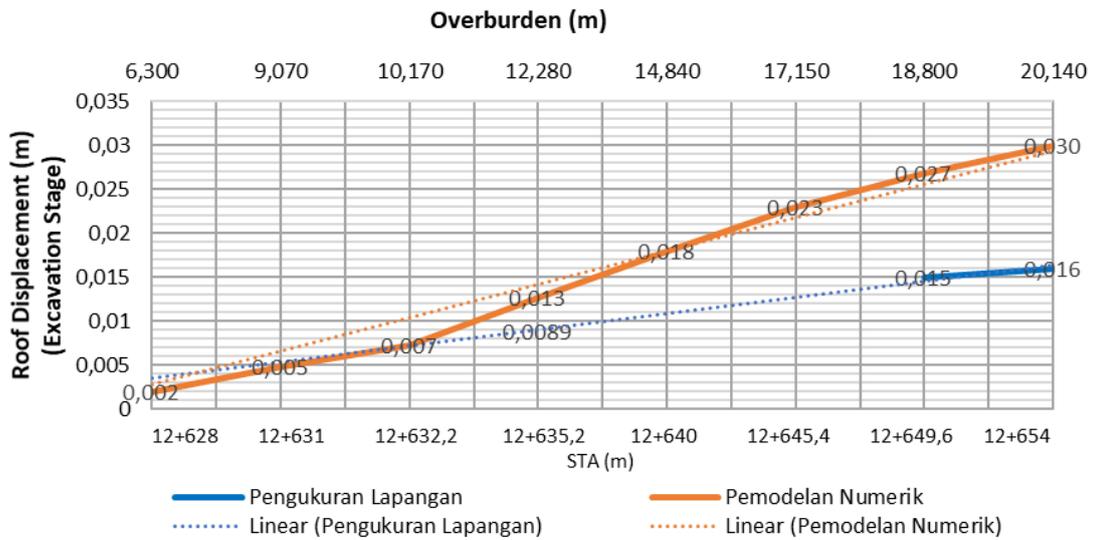
persyaratan nilai *displacement* yang diijinkan dalam JSCE (2007) sebesar 0,1 m serta memenuhi batasan nilai *strength factor* berdasarkan SNI 8460:2017 (BSN 2017) yaitu sebesar 1,25.

Analisis verifikasi secara numerik terhadap metode penggalian *bench cut multiple* menghasilkan nilai *roof displacement (excavation stage)* dan *(over all stage)* yang mendekati nilai hasil pengukuran lapangan, sehingga dapat diasumsikan bahwa parameter masukan yang digunakan pada pemodelan numerik dua dimensi menggunakan *software RS2 (Rocscience, Inc)*, telah sesuai dengan kondisi lapangan yang ditampilkan pada Gambar 4 dan 5.

Analisis penentuan metode penggalian yang efektif secara numerik menghasilkan nilai *roof displacement (excavation stage)* dan *(over all stage)* metode penggalian *bench cut multiple* yang lebih rendah dibandingkan dengan metode penggalian *full face with bench cut* dan *centre diaphragm* yang ditampilkan pada Gambar 6 dan 7.

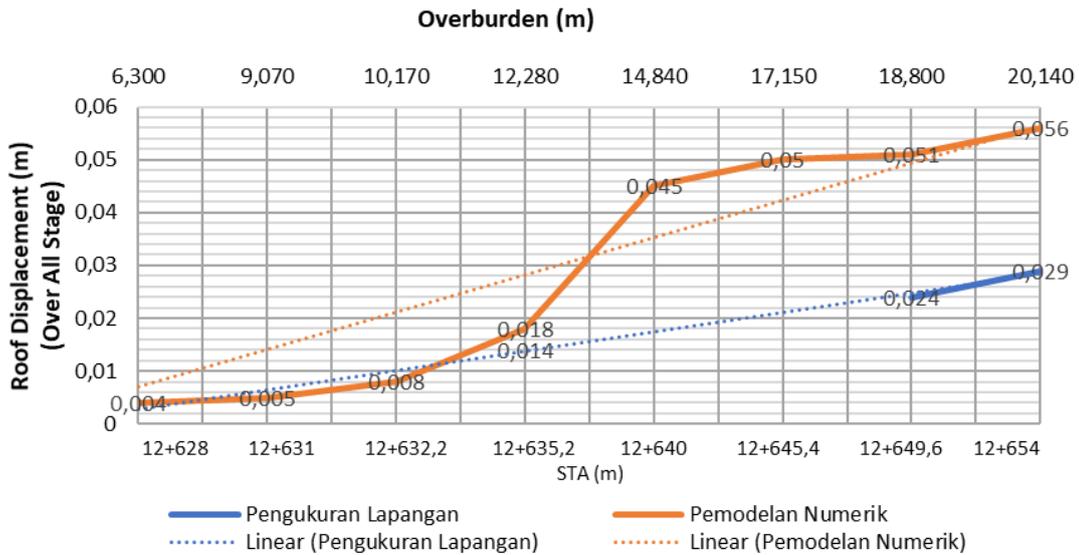
Nilai *displacement* berbanding terbalik dengan nilai *strength factor*, sehingga metode penggalian *bench cut multiple* menghasilkan nilai *roof strength factor (excavation stage)* dan *(over all stage)* yang lebih besar dibandingkan dengan metode penggalian *full face with bench cut* dan *centre diaphragm* yang ditampilkan pada Gambar 8 dan 9.

Gambar 10 menunjukkan contoh hasil analisis pemodelan numerik dua dimensi *software RS2 (Rocscience, Inc)* pada STA. 12+654 berupa nilai *displacement* dan *strength factor*. Nilai *total displacement* dan *strength factor* tersebut menunjukkan pembacaan secara keseluruhan *boundary (global)*, sedangkan pada makalah ini tinjauan hanya dilakukan ditinjau pada bagian atap (*roof*).



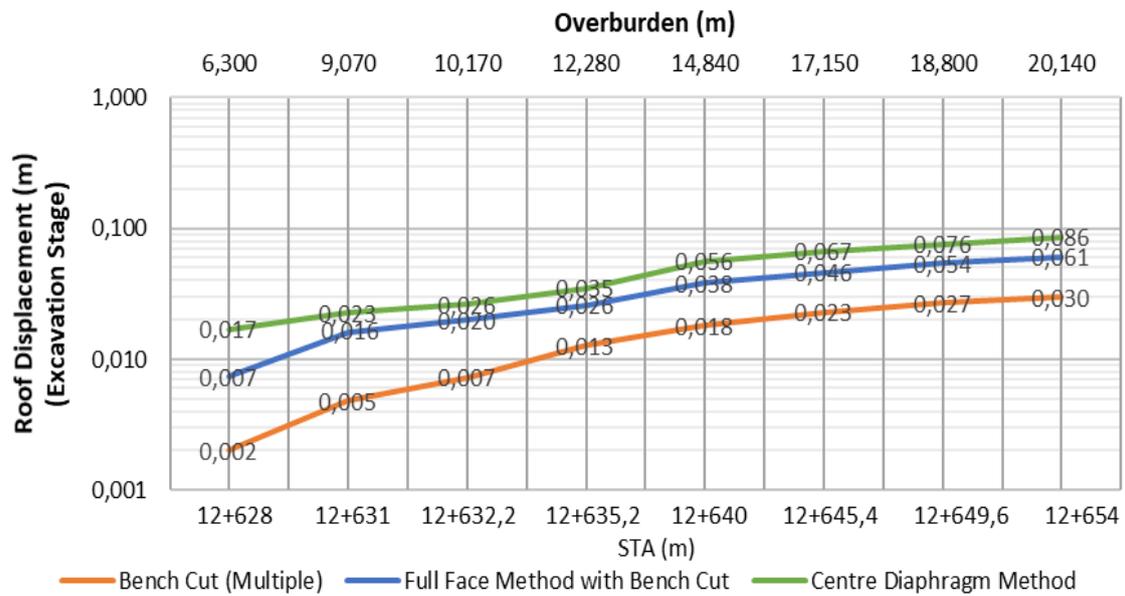
Sumber: Hasil analisis pemodelan numerik dua dimensi software RS2 (Rocscience, Inc)

Gambar 4. Grafik hubungan *roof displacement (excavation stage)* dengan kedalaman (*overburden*) menggunakan metode penggalian *bench cut multiple*

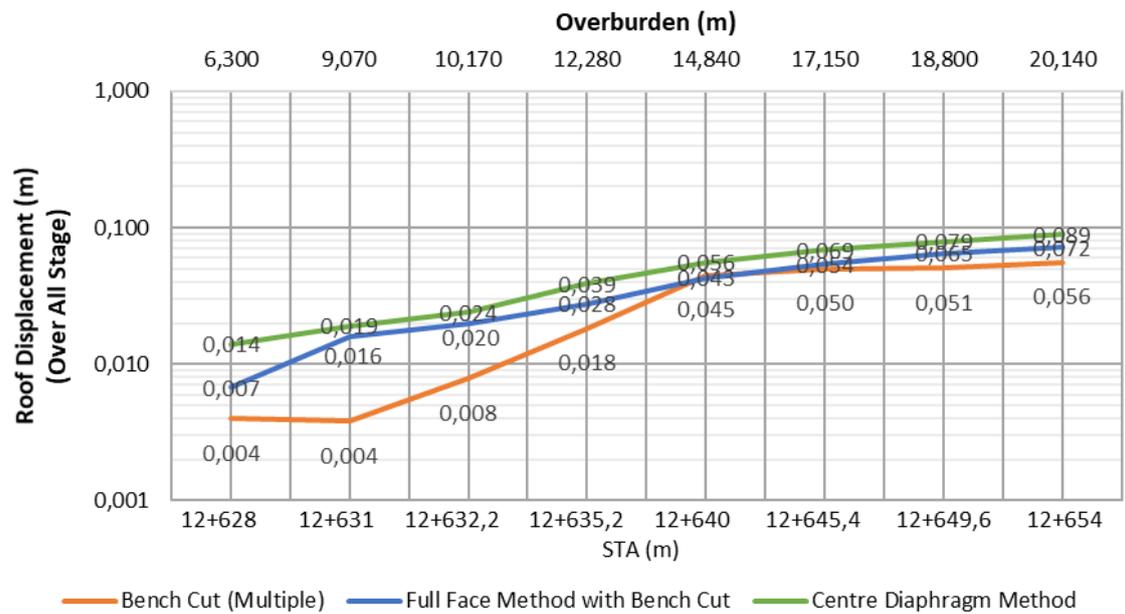


Sumber : Hasil analisis pemodelan numerik dua dimensi software RS2 (Rocscience, Inc)

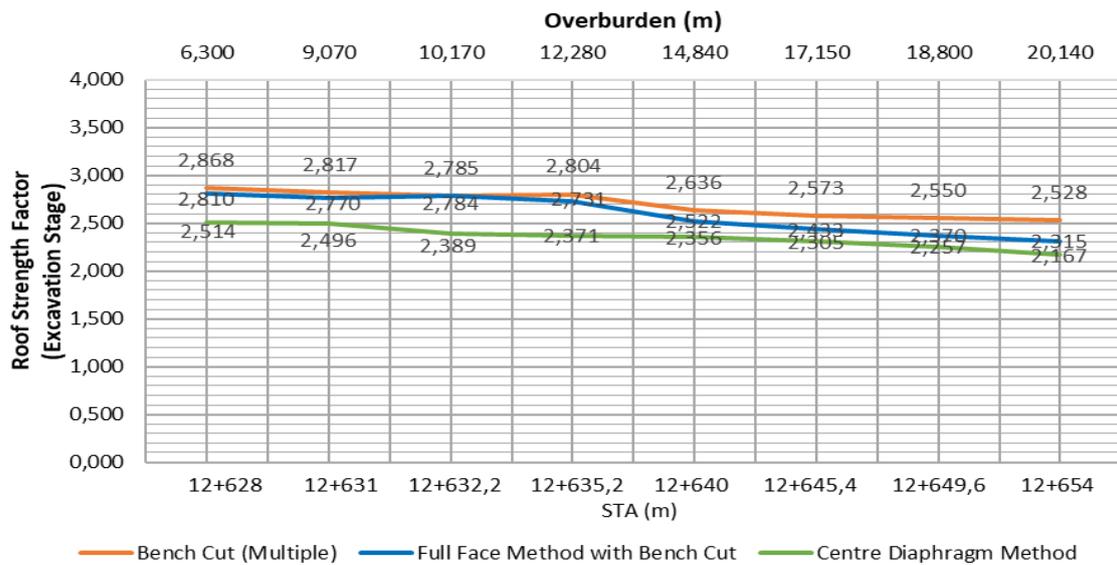
Gambar 5. Grafik hubungan *roof displacement (over all stage)* dengan kedalaman (*overburden*) menggunakan metode penggalian *bench cut multiple*



Sumber: Hasil analisis pemodelan numerik dua dimensi *software RS2 (Rocscience, Inc)*
Gambar 6. Grafik hubungan *roof displacement (excavation stage)* dengan kedalaman (*overburden*) menggunakan beberapa metode penggalian

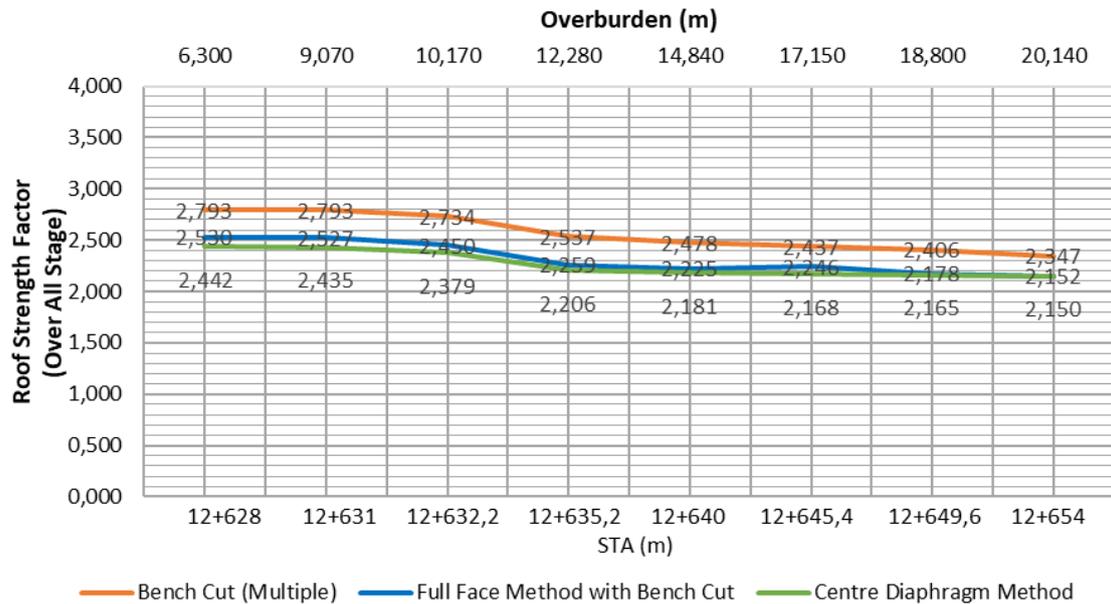


Sumber: Hasil analisis pemodelan numerik dua dimensi *software RS2 (Rocscience, Inc)*
Gambar 7. Grafik hubungan *roof displacement (over all stage)* dengan kedalaman (*overburden*) menggunakan beberapa metode penggalian



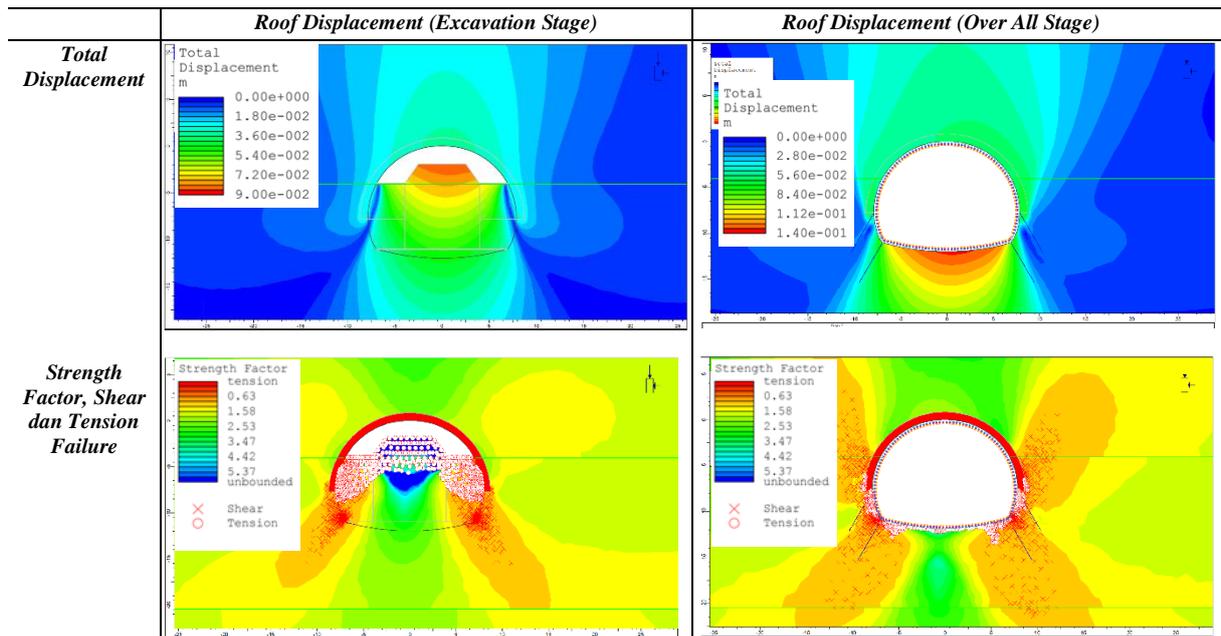
Sumber: Hasil analisis pemodelan numerik dua dimensi software RS2 (Rocscience, Inc)

Gambar 8. Grafik hubungan *roof strength factor (excavation stage)* dengan kedalaman (*overburden*) menggunakan beberapa metode penggalian



Sumber: Hasil analisis pemodelan numerik dua dimensi software RS2 (Rocscience, Inc)

Gambar 9. Grafik hubungan *roof strength factor (over all stage)* dengan kedalaman (*overburden*) menggunakan beberapa metode penggalian



Sumber: Hasil analisis pemodelan numerik dua dimensi *software RS2 (Rocscience, Inc)*
Gambar 10. Contoh hasil pemodelan numerik pada STA 12+654

PEMBAHASAN

Analisis verifikasi metode penggalian *bench cut multiple*

Pada makalah ini terdapat 3 (tiga) titik acuan yang merupakan hasil pengukuran *roof displacement* lapangan dari Satuan Kerja Jalan Bebas Hambatan Cisumdawu yaitu STA. 12+636 sebesar 0,9 cm hingga 1,4 cm, STA. 12+648 sebesar 1,5 cm hingga 2,4 cm dan STA. 13+655 sebesar 1,6 cm hingga 2,9 cm. Rentang nilai tersebut menunjukkan bahwa pengukuran di lapangan dilakukan secara kontinu mulai dari pemasangan *forepoling (excavation stage)* sampai dengan pemasangan *steel arch rib, wire mesh, dan shotcrete (over all stage)*.

Nilai *roof displacement (excavation stage)* dan *(over all stage)* hasil pemodelan numerik dibandingkan dengan nilai *roof displacement* hasil pengukuran lapangan terdekat dengan stasiun titik amat. Pada *roof displacement (excavation stage)* menghasilkan selisih nilai pada STA. 12+635,2 sebesar 0,4 cm; STA. 12+649,6 sebesar 1,2 cm; STA. 12+654 sebesar 1,4 cm. Pada *roof displacement (over all stage)* menghasilkan selisih nilai pada STA. 12+635,2 sebesar 0,4 cm; STA. 12+649,6 sebesar 2,7 cm; STA. 12+654 sebesar 2,7 cm.

Pada makalah ini pemodelan numerik hanya ditinjau secara dua dimensi sehingga

belum dapat sepenuhnya menyerupai kondisi lapangan. Pemodelan memiliki keterbatasan dalam simulasi pemodelan metode penggalian serta keterbatasan dalam simulasi pemasangan sistem penyangga (*forepoling*). Pemodelan hanya dapat menerapkan tahapan penggalian (*step*), namun belum dapat menerapkan penggalian secara bertingkat (*bench*). Hal tersebut mengakibatkan nilai *displacement* hasil pemodelan numerik hanya dapat mendekati nilai hasil pengukuran lapangan. Apabila nilai *displacement* hasil pemodelan numerik dibandingkan dengan nilai deformasi maksimum JSCE (2007), maka nilai tersebut masih memenuhi persyaratan deformasi maksimum yang diijinkan yaitu tidak lebih dari 0,1 m.

Analisis penentuan metode penggalian yang efektif

Nilai maksimum *roof displacement (excavation stage)* dan *(over all stage)* yang dihasilkan dari analisis metode penggalian yang efektif secara numerik terdapat pada STA. 12+654 yang memiliki *overburden* paling tinggi yaitu 20,140 m. Nilai maksimum *roof displacement (excavation stage)* yang dihasilkan dari metode penggalian *bench cut multiple* sebesar 0,030 m, *full face method with bench cut* sebesar 0,061 m dan *centre*

diaphragm method sebesar 0,086 m. Nilai maksimum *roof displacement (over all stage)* yang dihasilkan dari metode penggalian *bench cut multiple* sebesar 0,056 m, *full face method with bench cut* sebesar 0,072 m dan *centre diaphragm method* sebesar 0,089 m. Apabila nilai *displacement* ketiga metode penggalian tersebut dibandingkan dengan nilai deformasi maksimum JSCE (2007), maka ketiga metode penggalian tersebut masih memenuhi persyaratan deformasi maksimum yang diijinkan yaitu tidak lebih dari 0,1 m.

Apabila ketiga metode penggalian dibandingkan, maka metode penggalian *bench cut multiple* menghasilkan nilai *roof displacement (excavation stage)* dan *(over all stage)* yang lebih rendah dibandingkan dengan metode penggalian *full face with bench cut* dan *centre diaphragm*. Hal ini dapat disebabkan karena metode penggalian *bench cut multiple* dilakukan 7 (tujuh) tahapan (*step*) sehingga muka bidang galian lebih mudah distabilisasi, alat berat yang digunakan lebih mudah bekerja di dalam terowongan, pemasangan sistem penyangga disesuaikan dengan tahapan penggalian, monitoring dapat dilakukan kontinu sehingga dapat meminimalisir terjadinya *displacement* di dalam terowongan. Metode penggalian *full face with bench cut* memerlukan area muka bidang galian yang besar, sehingga pada kondisi media tanah yang buruk sulit untuk dilakukan stabilisasi yang mengakibatkan *displacement* yang terjadi cukup besar. Metode penggalian *centre diaphragm* memerlukan pengamanan tambahan berupa diafragma pada *centre* muka bidang galian, sehingga akan terjadi *displacement* yang cukup besar pada saat pencabutan diafragma tersebut.

Nilai *displacement* berbanding terbalik dengan nilai *strength factor*. Semakin besar nilai *displacement*, maka semakin kecil nilai *strength factor* yang dihasilkan. Nilai minimum *roof strength factor (excavation stage)* terdapat pada STA. 12+654, metode penggalian *bench cut multiple* sebesar 2,528, *full face method with bench cut* sebesar 2,315 dan *centre diaphragm method* sebesar 2,167. Nilai minimum *roof strength factor (over all stage)* terdapat pada STA. 12+654, metode penggalian *bench cut (multiple)* sebesar 2,347, *full face method with bench cut* sebesar 2,152 dan *centre diaphragm method* sebesar 2,150. Apabila nilai *strength factor* ketiga metode

penggalian tersebut dibandingkan dengan batasan nilai *strength factor* berdasarkan SNI Standar Nasional Indonesia 8460 (2017), maka terowongan dengan menggunakan ketiga metode penggalian tersebut dalam kondisi aman karena lebih besar dari 1,25.

Pada pemodelan numerik dua dimensi *software RS2 (Rocscience, Inc)*, nilai faktor keamanan (*safety factor*) dapat ditunjukkan oleh nilai *strength factor*. *Strength factor* merupakan perbandingan antara *yield strength* dengan *design stress*. Kategori kondisi aman adalah apabila *stress* yang terjadi pada struktur tersebut masih di bawah *yield strength* atau masih berada pada daerah elastis, sehingga struktur yang mengalami *displacement* masih dapat kembali pada kondisi semula. Kategori kondisi tidak aman adalah apabila struktur yang mengalami *stress* telah melewati *yield strength* sehingga telah terdeformasi plastis dan telah terjadi perubahan geometri, sehingga struktur tersebut dinyatakan tidak aman walaupun belum terjadi keruntuhan.

Secara keseluruhan hasil pemodelan numerik menunjukkan bahwa semakin tinggi *overburden* yang berada diatas terowongan, maka semakin besar nilai *displacement* yang terjadi. Hal ini menunjukkan pengaruh besaran tegangan vertikal (σ_v) akibat tebal lapisan penutup yang bekerja pada saat penggalian terowongan dilakukan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari hasil analisis pemodelan numerik adalah Kuantitatif terhadap *displacement*:

1. Ketiga metode penggalian menghasilkan nilai *roof displacement (excavation stage)* dan *(over all stage)* yang masih memenuhi persyaratan deformasi maksimum yang diijinkan yaitu tidak lebih dari 0,1 m.
2. Ketiga metode penggalian menghasilkan nilai *roof displacement (excavation stage)* dan *(over all stage)* terkecil pada STA. 12+628 yaitu pada kedalaman 6,30 m dan nilai terbesar pada STA. 12+654 yaitu pada kedalaman 20,14 m.

Kuantitatif terhadap *strength factor*:

1. Ketiga metode penggalian menghasilkan nilai *roof strength factor (excavation stage)* dan *(over all stage)* lebih besar dari 1,25

yang mengindikasikan terowongan dalam kondisi aman.

2. Ketiga metode penggalian menghasilkan nilai *roof strength factor* (*excavation stage*) dan (*over all stage*) terbesar pada STA. 12+628 yaitu pada kedalaman 6,30 m dan nilai terkecil pada STA. 12+654 yaitu pada kedalaman 20,14 m.

Apabila ketiga metode penggalian dibandingkan, maka metode penggalian *bench cut multiple* lebih aman dibandingkan dengan metode *full face with bench cut* dan *centre diaphragm* karena menghasilkan nilai *displacement* terkecil dan *roof strength factor* terbesar.

Saran

Material penyusun pada daerah Terowongan Cisumdawu terdiri dari satuan breksi vulkanik yang telah mengalami pelapukan tingkat tinggi, sehingga dalam pembangunan terowongan rentan mengalami keruntuhan pada bagian atap. Penanggulangan yang dapat dilakukan untuk mengatasi masalah keruntuhan adalah dengan menggunakan *steel pipe grouting* yang dipasang sebelum penggalian atap terowongan.

Saran yang dapat diberikan apabila nilai *displacement* dan *strength factor* tidak memenuhi ketentuan yang diijinkan adalah dengan cara pemasangan *steel pipe grouting* menggunakan metode *double layer* dengan sudut yang berbeda, penyesuaian jarak pemasangan antar *steel pipe grouting* menjadi lebih rapat, penyesuaian diameter *steel pipe grouting* menjadi lebih besar dan penyesuaian panjang *steel pipe grouting* menjadi lebih panjang dari dimensi desain sebelumnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Satuan Kerja Pelaksanaan Jalan Bebas Hambatan Cisumdawu dan Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional VI Jakarta, Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat atas izin penelitian. Penulis pertama mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat atas beasiswa Pendidikan Karyasiswa S2.

DAFTAR PUSTAKA

- CV. Geocipta Bangun Optima. 2014. Laporan Hasil Pengujian Tanah. Bandung: [s.n].
- CV. Geocipta Bangun Optima. 2016. Laporan Penyelidikan Tanah Jalan Tol Cisumdawu Fase II. Bandung: [s.n].
- Das, Braja M. 1988. *Mekanika Tanah Jilid 1 (Prinsip – Prinsip Rekayasa Geoteknis) – Terjemahan Noor Endah dan Indrasurya B. Mochtar*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2017. *Informasi Pelaksanaan Jalan Bebas Hambatan Cisumdawu Tunnel Section*. Jakarta: [s.n].
- Djaja dan Hermawan. 1996. *Peta Geologi Teknik Lembar Bandung, Jawa Barat, Skala 1:100.000*. Bandung: Direktorat Geologi Tata Lingkungan.
- Hefny, A. M., Tan, W. L., Ranjith, P., Sharma, J., and Zhao, J. 2004. Numerical Analysis for Umbrella Arch Method in Shallow Large Scale Excavation in Weak Rock. *Tunnelling and Underground Space Technology Vol.19*.
- Halomoan, Robin P. 2018. *Analisis Metode Penggalian dan Kestabilan Terowongan Jalan Tol Cisumdawu (Cileunyi-Sumedang-Dawuan)*. Tesis. Universitas Gajah Mada.
- Indonesia, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2015. *Surat Edaran Menteri Nomor: 23/SE/M/2015 Tentang Pedoman Metode Perencanaan Penggalian dan Sistem Perkuatan Terowongan Jalan pada Media Campuran Tanah – Batuan*. Jakarta: Kementerian PUPR.
- Ira, Nurmaya P., Saptono, S., MCC. 2017. Analisis Pengaruh Penyanggaan pada Deformasi Terowongan di Batuan Lemah pada Pembangunan Double Terowongan Jalur Tol Cisumdawu (Cileunyi – Sumedang – Dawuan) Jawa Barat. *Prosiding Seminar Nasional XII STNAS*.
- JSCE Japan Society of Civil Engineers. 2007. *Standard Specifications for Tunneling-2006: Mountain Tunnels*. Japan: [s.n].
- Michalowski, R. P. 2005. Coefficient of Earth Pressure at Rest. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- PT. Hi Way Indotek dan PT. Wahana Mitra Amerta. 2014. *Perencanaan Teknik Terowongan Cisumdawu (Final Desain)*. Jakarta: [s.n].
- PT. Perentjana Djaja. 2014. *Laporan Hasil Pengujian Tanah*. Jakarta: [s.n].
- Silitonga, P. H. 1973. *Peta Geologi Lembar Bandung, Djawa skala 1 : 100.000*. Bandung: Direktorat Geologi.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). 2017. *SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: BSN.