

# Tinjauan Kekuatan Sistem Penyangga Terowongan dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga

## *A Review of Tunnel Supporting Systems Using Finite Element Method*

Arwan Apriyono dan Sumiyanto  
#Prodi Teknik Unsoed

*Abstract— In the developing countries like Indonesia, especially in the big cities like Jakarta, tunnel constructions should be considered to solve traffic problems. Besides, geological and topographical condition in Indonesia that is rich of mine materials making tunnel construction will be developed in the future. But then, to the present time, there are too many cases of failure of tunnel construction in several countries. This failure caused by supporting system of tunnel doesn't capable to support the construction. Based on this phenomenon, it was necessary to research about review of supporting system strength of tunnel construction.*

*Stability analysis of mine tunnel that belongs to P.T. Aneka Tambang Tbk, located in Pongkor Mountain, Bogor, West Java, would be done in this research. This analysis was conducted with numerical method using plaxis 3D tunnel software. Slice of tunnel along 15 meters of length will be analyzed in this research. This slice would be divided into three step of excavation. Mohr Coloumb material model were used in soil material. Whereas linear elastic model were used in other materials likes shotcrete, rock bolt and steel sets. Three variation conditions of tunnels would be considered in this research namely tunnel without supporting system, tunnel with original supporting system (same as in the research location), and tunnel with Q system supporting system. In this research, examination would be done for the change of displacement of the tunnel construction in consequence of the three conditions above.*

*The results of this research show that the installation of supporting system reduced displacement of the tunnel significantly. Average decreasing of displacement value as a result of the original supporting system is 12.5 cm (46.30 %). Whereas, average decreasing of displacement as a result of the Q system supporting system is 9.25 cm (34.26%). Although not as strength as original supporting system, the Q system supporting system deserves to be considered in supporting system analysis.*

*Keywords— tunnel, stability analysis, supporting system, numerical simulation, finite element method, displacement.*

### PENDAHULUAN

#### A. Latar Belakang

Pembuatan terowongan untuk konstruksi jalan raya bawah tanah, bangunan tambang ataupun saluran air, telah banyak dikembangkan di negara-negara maju. Terowongan jalan raya sangat efektif digunakan untuk mengatasi masalah kemacetan lalu lintas dan mengurangi alinemen vertikal (Pakbaz & Yareevand, 2005). Di negara-negara berkembang seperti Indonesia, khususnya di kota besar seperti Jakarta, pembuatan terowongan jalan raya sudah selayaknya dipertimbangkan untuk mengatasi masalah kemacetan lalu lintas. Selain itu, kondisi topografi Indonesia yang memiliki banyak kontur pegunungan dan kondisi geologi yang kaya mineral tambang akan membuat teknologi terowongan semakin berkembang di Indonesia (Munawar, 2007 dan Bronto, 2006).

Salah satu hal yang harus diperhatikan dalam konstruksi terowongan adalah sistem penyangga. Sistem penyangga merupakan kekuatan utama terowongan dalam menahan beban terowongan. Kasus keruntuhan terowongan akibat kegagalan sistem penyangga telah banyak terjadi di beberapa negara. Diantaranya adalah

kerusakan terowongan jalan raya yang terjadi di London, Inggris pada tahun 2005. Keruntuhan disebabkan karena sistem penyangga terowongan tidak kuat untuk menahan beban yang diberikan kepadanya (Woolcock, 2005).

Dengan melihat fenomena-fenomena bahwa teknologi terowongan akan semakin berkembang di Indonesia dan mempertimbangkan pentingnya analisis sistem penyangga terowongan, penulis memandang perlu dilakukan penelitian tentang tinjauan kekuatan penyangga pada konstruksi terowongan. Apabila kekuatan penyangga suatu terowongan dapat dianalisis dengan baik, hal tersebut akan memberikan kontribusi terhadap perkembangan teknologi terowongan di Indonesia, sehingga kerusakan konstruksi terowongan dapat dihindari. Selain itu, pemilihan sistem penyangga dapat dilakukan seefisien mungkin, sehingga lebih ekonomis.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari metode elemen hingga menggunakan software plaxis untuk simulasi analisis stabilitas terowongan dengan menggunakan metode elemen hingga, dan menentukan desain metode perkuatan terowongan yang tepat untukantisipasi keruntuhan terowongan.

**B. Kriteria Keruntuhan Batuan**

Kriteria keruntuhan massa batuan mulai dikembangkan oleh Hoek & Brown pada tahun 1980. Revisi terakhir dipublikasikan pada tahun 2002 dengan memberikan beberapa modifikasi dari edisi-edisi sebelumnya. Hubungan antar tegangan pada batuan, berdasarkan kriteria keruntuhan Hoek & Brown dinyatakan dalam persamaan berikut ini (Hoek & Brown, 2002).

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad \dots\dots\dots(1)$$

dengan :

- $\sigma'_1$  : tegangan efektif mayor (kN/m<sup>2</sup>),
- $\sigma'_2$  : tegangan efektif minor (kN/m<sup>2</sup>),
- $m_b, \sigma$  dan  $a$  : konstanta reduksi massa batuan, yang dihitung dengan persamaan:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad \dots\dots\dots(4)$$

- dengan,
- D : derajat ketergangguan dari massa batuan,
- GSI : konstanta kondisi permukaan batuan.

Hoek & Brown (2002) juga mengemukakan persamaan, yang memberikan korelasi dengan kriteria keruntuhan Mohr-Coloumb. Nilai kohesi tanah dan sudut gesek dalam pada selubung keruntuhan Mohr-Coloumb diperoleh dengan persamaan berikut ini.

$$\varphi' = \sin^{-1} \left[ \frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}] (s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}}$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}] (s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

**C. Sistem Penyangga Terowongan**

Terdapat beberapa jenis sistem penyangga dalam pembuatan terowongan, seperti berikut ini.

**1) Shotcrete**

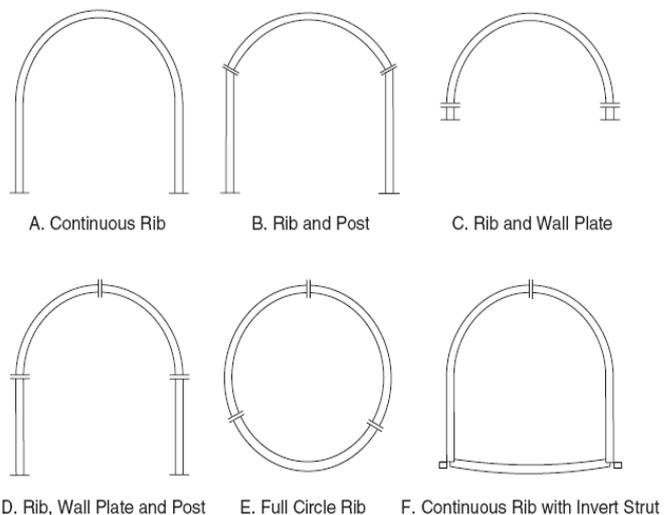
Menurut Kolymbas, 2005, shotcrete merupakan beton yang disemprotkan untuk menambah kekuatan suatu permukaan. Beton yang digunakan sebagai shotcrete, memiliki karakteristik yang hampir sama dengan beton biasa, hanya saja, modulus elastisitas beton yang digunakan sebagai shotcrete lebih rendah daripada beton biasa. Kekuatan shotcrete bertambah seiring dengan pertambahan umur shotcrete. Ketebalan shotcrete pada konstruksi terowongan, tergantung dari luas bukaan terowongan.

**2) Rockbolt**

Menurut Singh, 2006, rockbolt adalah bahan batang yang terbuat dari baja, berpenampang bulat yang digunakan untuk menyangga massa batuan. Kekuatan rockbolt, biasanya diukur dengan melaksanakan uji tarik (pull test) di lapangan. Berdasarkan Handbook of Road Power, 2006, kekuatan perkuatan ini ditentukan oleh beberapa parameter diantaranya diameter, panjang, dan jarak antar rockbolt.

**3) Steel Rib**

Steel rib merupakan salah satu jenis penyangga konstruksi terowongan yang terbuat dari baja. Tipe steel rib dapat dilihat dalam Gambar 1 (Singh dan Rajnish, 2006).



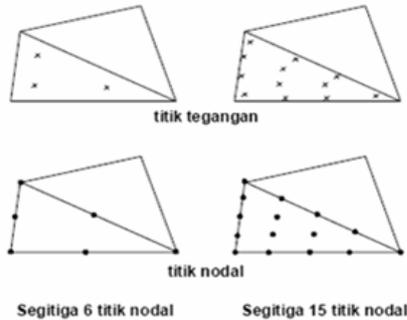
Gambar 1 Tipe steel rib (Singh dan Rajnish, 2006).

**D. Metode Elemen Hingga dalam Plaxis**

Pada metode elemen hingga, kontinum dibagi menjadi sejumlah elemen, dan setiap elemen memuat sejumlah titik nodal. Setiap titik nodal mempunyai

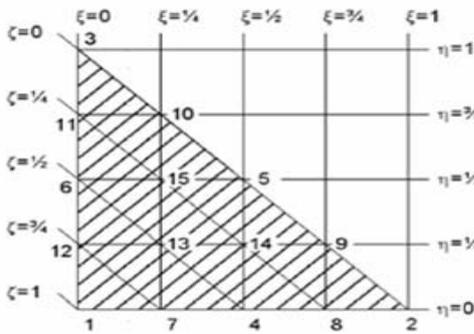
sejumlah derajat kebebasan yang terkait dengan nilai diskret dari parameter yang tidak diketahui.

Pada *software* plaxis, digunakan elemen segitiga dengan 6 titik atau 15 titik nodal untuk memodelkan



Gambar 2 Posisi titik nodal pada elemen segitiga (Brinkgreve, 2007).

Elemen segitiga dengan 15 titik nodal menggunakan interpolasi dengan orde empat untuk perpindahan dan integrasi numerik melibatkan 12 titik Gauss dan untuk elemen segitiga dengan 6 titik nodal, menggunakan interpolasi dengan orde dua dan integrasi numerik melibatkan 3 buah titik Gauss. Pada elemen segitiga, selain digunakan dua buah koordinat ( $\zeta$  dan  $\eta$ ), digunakan juga koordinat penolong ( $\xi = 1 - \zeta - \eta$ ) seperti terlihat pada Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3 Penempatan posisi titik nodal pada elemen segitiga (Brinkgreve, 2007).

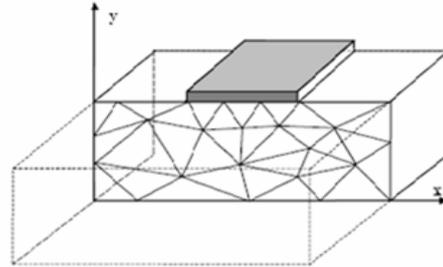
**E. Idealisasi *plane strain* dalam Plaxis**

Idealisasi *plane strain* merupakan permodelan struktur tiga dimensi menjadi bentuk dua dimensi. Idealisasi ini dapat dilakukan apabila struktur cukup panjang dengan penampang melintang seragam. Beban bekerja sepanjang struktur pada bidang x-y. *Displacement* dan regangan pada arah sumbu z sama dengan nol. Secara lebih jelas, idealisasi *plane strain* seperti dalam Gambar 4.

Pada masalah praktis, terdapat beberapa kasus dimana bagian suatu struktur tidak dapat dimodelkan dengan idealisasi *plane strain*. Salah satu contohnya

adalah *rockbolt* pada konstruksi terowongan yang dimodelkan sebagai *anchor*.

adalah *rockbolt* pada konstruksi terowongan yang dimodelkan sebagai *anchor*.



Gambar 4 Bentuk idealisasi *plane strain*. (Brinkgreve, 2007).

Pada *software* plaxis, masalah ini disederhanakan dengan menggunakan mengekuivalensi nilai EA (*axial stiffness*). Nilai EA ekuivalen dihitung dengan persamaan sebagai berikut ini.

$$EA_{eq} = \frac{EA_{real}}{L_z} \dots\dots\dots (7)$$

dengan

- $EA_{eq}$  : *axial stiffness* ekuivalen,
- $EA_{real}$  : *axial stiffness anchor*,
- $L_z L_x$  : jarak antar *anchor*.

**METODE PENELITIAN**

**A. Lokasi Penelitian**

Penelitian ini merupakan analisis stabilitas terowongan tambang, milik PT Aneka Tambang Tbk, yang berlokasi di Gunung Pongkor, Bogor, Jawa Barat, seperti dalam Gambar 5 di bawah ini.



Gambar 5 Lokasi penelitian (Antam, 2007).

## B. Bahan dan Alat

Alat yang digunakan untuk analisis terdiri dari,

- perangkat keras (*hard ware*), berupa komputer dengan spesifikasi *Processor Genuine Intel T1080 Core Duo @ 1.73 Ghz, memory 515 MB, VGA 128 MB*,
- perangkat lunak (*software*), berupa program *Plaxis 3D Tunnel* dengan *operating system windows XP profesional*.

## C. Tahapan

Penelitian ini terbagi dalam beberapa tahapan sebagai berikut ini.

### 1) Pengumpulan data sekunder

Data sekunder terowongan meliputi data lokasi, geometri terowongan, uji batuan dan tanah diambil dari terowongan tambang milik PT Aneka Tambang dengan lokasi di Gunung Pongkor Jawa Barat. Lokasi penelitian adalah terowongan tambang milik PT Aneka tambang UPBE Pongkor Jawa Barat. Posisi lokasi terletak pada jarak 40 km sebelah barat Kota Bogor. Untuk analisis dipilih terowongan di Blok Ciurug Level 600,

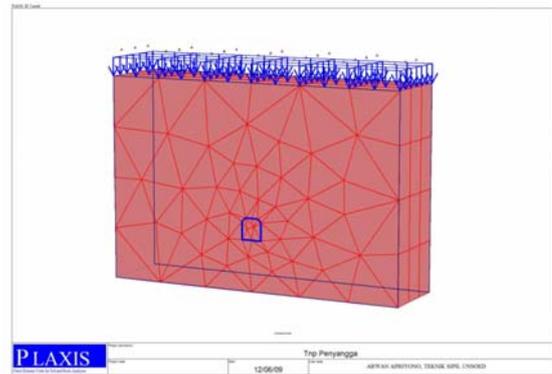
### 2) Analisis data lapangan

Analisis data lapangan digunakan untuk mengetahui geometri struktur dan parameter model, yang nantinya akan digunakan dalam simulasi analisis. Geometri model ditentukan dari *cross section* dan *long profil* terowongan serta peta topografi lapangan. Sifat mekanik tanah pada area tambang dibagi ke dalam tiga kategori yaitu material tanah asli, material tambang (hasil ledakan) dan material isian (sisa tambang).

### 3) Penentuan model numeris

Model numeris yang dipakai dalam analisis ditentukan berdasarkan data lapangan dengan penyederhanaan tertentu disesuaikan dengan keterbatasan program. Hal-hal yang terkait dengan pemodelan numeris adalah sebagai berikut ini.

- Potongan terowongan yang dianalisis sepanjang 15 m dibagi dalam 3 tahap penggalian terowongan.
- Sistem penyangga segera dipasang setelah penggalian terowongan sedalam 5 meter.



Gambar 6 Model terowongan dalam Plaxis 3D.

- Material tanah dianggap homogen, parameter massa tanah adalah hasil analisis program *Rock Lab v.1.0* dengan input data dari uji *intack rock* di laboratorium.
  - Model material yang digunakan dalam simulasi numeris adalah model material Mohr-Coloumb
- Model numeris terowongan pada software plaxis dapat dilihat pada Gambar 6.

### 4) Hitungan model dengan software Plaxis

Simulasi perhitungan dilakukan terhadap tiga variasi kondisi terowongan yaitu, kondisi terowongan tanpa sistem penyangga, kondisi terowongan dengan penyangga sesuai di lokasi penelitian dan kondisi terowongan dengan penyangga sesuai *Q system*.

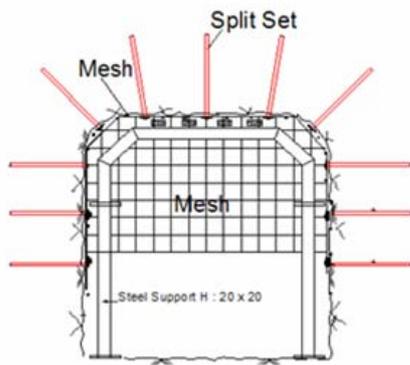
### 5) Analisis Hasil dan Pembahasan

Analisis dengan menggunakan *software plaxis* akan menghasilkan nilai *displacement* di sekitar dinding terowongan. Perbedaan kekuatan masing-masing kondisi terowongan dapat diamati dari nilai-nilai *displacement* yang dihasilkan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### A. Umum

Terowongan tambang Ciurug L 600, yang terletak di Gunung Pongkor, Jawa Barat, mempunyai bentuk topografi berupa pegunungan, dengan elevasi muka tanah 600 m - 775 m. Terowongan ini memiliki panjang  $\pm 1,5$  km dengan lebar bukaan 4 m. *Cross section* terowongan adalah seperti dalam Gambar 7 di bawah ini.



Gambar 7 section terowongan (Antam, 2007).

Uji sifat mekanis tanah pada area tambang dilakukan terhadap material-material tanah asli, material tambang (ore) dan material isian (sisa tambang). Berdasarkan uji di laboratorium yang telah dilakukan oleh PT Aneka Tambang Tbk, diperoleh parameter untuk masing-masing jenis material beserta interfacenya, seperti dalam Tabel 1 di bawah ini.

TABEL 1 SIFAT MEKANIS TANAH CIURUG L600 (ANTAM, 2007)

Material	$\gamma$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\sigma_c$ (MPa)	E (GPa)	$\nu$	c (MPa)	$\phi$ ( $^\circ$ )
Breksi Tufa	25,6	62,62	6,45	0,26	8	60
Material Interface Breksi tufa vs ore	21	10	5,2	0,24	0,5	20
Vein (ore)	24,5	58,19	6,96	0,22	4	52
Filling Slurry	21,5	0,08	0,05	0,3	0,03	35
Material Interface Filling slurry vs Breksi tufa	17	0,05	0,001	0,3	0,001	10

Berdasarkan hasil uji yang telah dilakukan oleh PT Aneka Tambang Tbk., massa batuan yang terdapat pada lokasi penelitian secara umum masuk dalam kelas III, dengan nilai Rock Mass Rating (RMR) batuan berkisar 40 – 60. Nilai RMR untuk Blok IIIC sebesar 42. Kekuatan massa batuan dihitung berdasarkan klasifikasi Hoek-Brown (2002), dengan menggunakan program Rock Lab v 1.0. Material tanah yang dipakai dalam pemodelan numeris adalah tanah asli breksi tufa. Input data diambil dari hasil uji intack rock yang telah dilakukan di laboratorium dan hasil pengamatan kondisi batuan di lapangan. Dari hasil hitungan program Rock Lab v 1.0, dapat diperoleh parameter massa batuan yang akan digunakan dalam simulasi numeris. Rekapitulasi parameter massa batuan seperti dalam Tabel 2 di bawah ini.

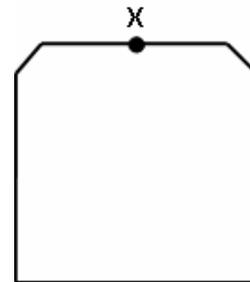
TABEL 2 PARAMETER MASSA BATUAN (ANTAM, 2007)

Parameter	Nilai	Satuan
c	0.364	Mpa
$\phi$	53.24	$^\circ$
E	691.07	MPa

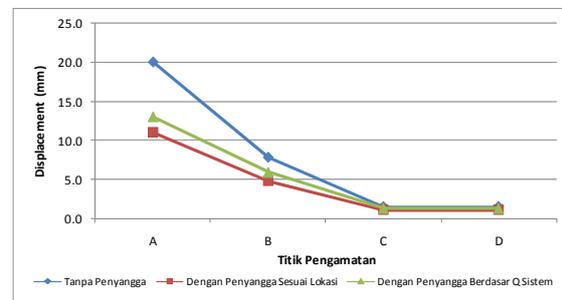
## B. Hasil Simulasi Numeris

Untuk mendapatkan hasil yang lebih jelas dari nilai displacement terowongan, nilai displacement diamati pada titik tertentu pada terowongan. Titik pengamatan displacement berada pada bagian atas terowongan seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Titik tersebut merupakan bagian terowongan yang terjadi displacement terbesar. Titik pengamatan diletakkan pada bagian muka (Titik A), kedalaman 5 m (Titik B), kedalaman 10 m (Titik C) dan kedalaman 15 m (Titik D).

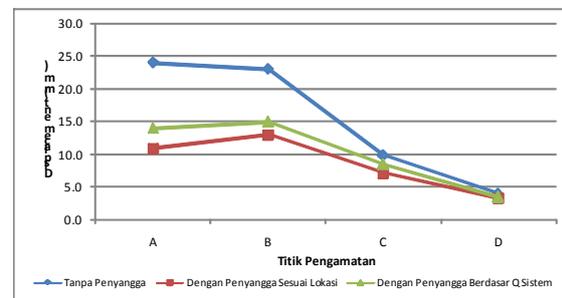
Berdasarkan hasil simulasi numeris diperoleh nilai displacement untuk ketiga kondisi terowongan. Pengamatan displacement dilakukan pada setiap titik pengamatan pada daerah atap terowongan. Nilai displacement ketiga kondisi terowongan di titik-titik pengamatan, untuk masing-masing tahap penggalian terowongan, secara lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 9, Gambar 10 dan Gambar 11.



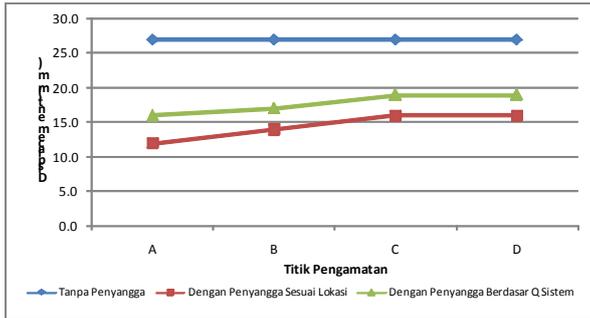
Gambar 8 Titik pengamatan displacement terowongan.



Gambar 9 Displacement pada titik-titik pengamatan untuk ketiga kondisi terowongan pada penggalian tahap 1 (5m).



Gambar 10 Displacement pada titik-titik pengamatan untuk ketiga kondisi terowongan pada penggalian tahap 2 (10m).



Gambar 11 Displacement pada titik-titik pengamatan untuk ketiga kondisi terowongan pada penggalian tahap 3 (15m).

Dari gambar diatas, dapat dilihat bahwa pemasangan sistem penyangga mengakibatkan penurunan nilai displacement di sekitar dinding terowongan. Hal ini disebabkan karena sistem penyangga memberikan kekuatan dan kekakuan di sekitar dinding terowongan. Displacement terbesar terowongan terjadi pada tahap akhir penggalian untuk semua kondisi terowongan. Apabila diamati nilai displacement terbesar, maka perbedaan nilai displacement, antara terowongan tanpa sistem penyangga dengan terowongan menggunakan sitem penyangga adalah sebagai berikut.

TABEL 3 PERBANDINGAN DISPLACEMENT TEROWONGAN TANPA SISTEM PENYANGGA DENGAN TEROWONGAN DENGAN PENYANGGA SESUAI LOKASI PENELITIAN

No	Titik	Displacement (mm)		Penurunan	
		Non Penyangga	Dengan Penyangga	(mm)	(%)
1	A	27	12	15	55.56
2	B	27	14	13	48.15
3	C	27	16	11	40.74
4	D	27	16	11	40.74
Rerata		27	14.50	12.50	46.30

TABEL 4 PERBANDINGAN DISPLACEMENT TEROWONGAN TANPA SISTEM PENYANGGA DENGAN TEROWONGAN DENGAN PENYANGGA BERDASAR Q SISTEM

No	Titik	Displacement (mm)		Penurunan	
		Non Penyangga	Dengan Penyangga	(mm)	(%)
1	A	27	16	11	40.74
2	B	27	17	10	37.04
3	C	27	19	8	29.63
4	D	27	19	8	29.63
Rerata		27	17.75	9.25	34.26

Dari Tabel 3 dan Tabel 4, dapat dilihat bahwa sistem penyangga mengurangi nilai displacement pada terowongan secara signifikan. Sistem penyangga sesuai lokasi penelitian mengurangi nilai displacement rerata sebesar 12,5mm (46.30%), sedangkan sistem penyangga berdasarkan Q sistem mengurangi nilai displacement rerata sebesar 9.25mm (34.26%). Sistem penyangga sesuai lokasi penelitian lebih kuat apabila

dibandingkan dengan sistem penyangga berdasarkan Q sistem. Walaupun demikian, analisis penyangga berdasarkan Q sistem layak dipertimbangkan dalam perencanaan.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### A. Kesimpulan

Dari hasil dan pembahasan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut ini.

- Software Plaxis 3D Tunnel dapat memodelkan perilaku deformasi terowongan dengan cukup baik, walaupun harus dilakukan beberapa penyederhanaan model untuk menyesuaikan dengan keterbatasan program.
- Pemasangan sistem penyangga mengakibatkan penurunan nilai displacement di sekitar dinding terowongan. Sistem penyangga di lokasi penelitian, menyebabkan penurunan nilai displacement rerata sebesar 12,5 mm (46.30 %), sedangkan sistem penyangga berdasarkan Q sistem menyebabkan penurunan nilai displacement rerata sebesar 9.25 cm (34,26 %).
- Walaupun tidak sekuat sistem penyangga sesuai di lokasi penelitian, sistem penyangga berdasarkan Q sistem mengurangi nilai displacement terowongan secara signifikan, sehingga pantas untuk dipertimbangkan dalam perencanaan.

### B. Saran

Saran yang dapat diberikan penulis untuk pengembangan penelitian ini adalah sebagai berikut ini.

- Diperlukan penelitian lebih lanjut dengan memperhitungkan faktor diskontinuitas batuan pada permodelan numeris.
- Dikembangkan untuk perencanaan terowongan transportasi dengan data yang lebih lengkap.

## DAFTAR PUSTAKA

- Antam, 2007, Data-data Pekerjaan Terowongan Ciurug Level 600, Tidak dipublikasikan, Bogor.
- Bronto S., 2006, Fasies Gunung Api dan Aplikasinya, Jurnal Geologi Indonesia, Vol. 1 No. 2 Juni 2006: 59-71.
- Department of Empyoeyment and Industrial Relation, 2007, Tunnelling Code of Practice 2007, Queensland, Australia.
- Fauzi, 2007, Daerah Rawan Gempa Bumi Tektonis di Indonesia, Pusat Gempa Nasional Badan Meteorologi dan Geofisika, Jakarta.
- Hoek E., 2002, A Brief History of The Development of The Hoek-Brown Failure Criterion, <http://www.rockscience.com>.
- Hoek E., 2002, Hoek-Brown Failure Criterion 2002 Edition, <http://www.rockscience.com>.
- Hoek, 2006, Practical Rock Engineering, tidak diterbitkan, Canada.
- Kolymbas, D, 2005, Tunneling and Tunnel Mechanic, Spinger, Berlin.
- Singh, B, 2006, Tunneling in weak rock, Elsevier Ltd, London, England.
- Suhendro B, 2000, Metode Elemen Hingga dan Aplikasinya, Laboratorium Struktur Universitas Jenderal Soedirman, Yogyakarta.
- Woolcock N, 2005, National Union of Rail, Maritime & Transport Workers (RMT) <http://www.rmtbristolrail.org.uk/archives/tunnel>.