

**PEMODELAN PEMASANGAN PENYANGGA SEMENTARA MENGGUNAKAN PERANGKAT  
LUNAK PHASE 2 PADA HEADRACE TUNNEL CHAINAGE 155 M – 265 M DI PLTA TULIS  
KABUPATEN BANJARNEGARA, JAWA TENGAH**

Oleh : M. Rais Fathoni

**ABSTRACT**

*The tunnel is a copy below the ground or mountains. The tunnel was built aims to ensure a continuity of a system in the form of the transfer or objects from one place to another. Tulis Hydro Power Station is located in the Village Sokaraja, District Pagentan, Banjarnegara regency, Central Java. In the construction of Tulis Hydropower, made headrace tunnel that serves as a time tunnel leading Merawu upstream dam plan Maung.*

*In the construction of the tunnel, it is necessary as an alternative modeling in analysis and evaluation. Finite element method is a numerical solution method, which in geomechanics used to determine the stress field and the displacement of rock mass modulus of elasticity or deformation if known by the behavior of the rock mass deformation is applied. Phase software program is a program designed for the purpose 2D finite element analysis of the process of excavation. Rock mass displacement in the tunnel was calculated using a software program Phase2. Meanwhile, as a supporter of the parameter values used to obtain the required form Roclab software. The parameters used in the calculation include the tunnel geometry, boundary conditions, the main stress on the tunnel, geological conditions, the material around the tunnel, physical and mechanical properties of rocks, rock strength parameters that include the type material and the failure criteria, the installation of a tunnel support along the physical and mechanical properties of the tunnel support .*

*Tunnel support systems were installed in the tunnel includes rockbolt, wire mesh and steel support. While the installation of a tunnel support modeling used in the form rockbolt, shotcrete and liner. Determination of a tunnel support combinations based on the values and classes that are the result RMR rock mass classification.*

*Simulation results show the total displacement of the excavation to be done after the installation of the a tunnel support is as follows:*

- 1. Simulation results chainage 198 m to the rock mass class IIIb, elastic material types for m 0.0117161 - 0.0113736 m*
- 2. Simulation results chainage 205 m to the rock mass class IIIa, elastic material types for m 0.0122892 - 0.0119034 m*
- 3. Simulation results chainage 230 m to the rock mass class IIa, elastic material types for m 0.0119481 - 0.0116411 m*
- 4. Simulation results chainage 250 m to the rock mass class IIb, elastic material types for m 0.0103595 - 0.0100815 m*

*Based on the fourth simulation results show the number of damaged elements ranging from 8 to 23 damaged elements. The simulation results based on the finite element indicates stability can be said to be stable tunnel.*

*Keywords: Tunnel, Simulation Installation Tunnel Support, Tunnel Support System Stability.*

**I. Pendahuluan**

Masalah yang sering dijumpai pada pembangunan terowongan meliputi massa batuan yang memiliki sifat heterogen, anisotrop dan diskontinyu. Faktor-faktor geologi menjadi hal yang sangat penting dalam perancangan suatu galian bawah tanah atau terowongan karena berkaitan dengan kekuatan batuan. Penentuan kekuatan batuan berkaitan dengan sifat fisik batuan, struktur geologi yang berkaitan langsung dengan gaya-gaya yang dihasilkan dari redistribusi tegangan awal.

Lokasi penelitian merupakan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Tulis yang terletak di Desa Sokaraja, Kecamatan Pagentan, Kabupaten Banjarnegara, Jawa Tengah. Dalam pelaksanaan pembangunan PLTA Tulis akan dibangun bendungan tipe beton yang membendung Kali Tulis di Kabupaten Banjarnegara. Air dari bendungan Tulis direncanakan untuk suplesi rencana bendungan Maung, dengan cara membuat terowongan dari bendungan Tulis menuju Kali Merawu. Terowongan disini berfungsi sebagai

*headrace tunnel*. Penggalian terowongan tersebut sampai selesai membutuhkan waktu cukup lama. Sehingga untuk mengetahui kemandirian terowongan dengan menggunakan penyangga sementara perlu dilakukan analisis pemodelan penyangga sementara agar tidak terjadi keruntuhan pada dinding-dinding terowongan, sebelum nantinya setelah penggalian selesai seluruhnya dibuat dinding beton (*concrete lining*).

Berdasarkan perkembangan kondisi dan penggunaan fungsinya, pada saat ini Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Tulis di Banjarnegara, Jawa Tengah, yang baru selesai dibangun pertengahan tahun lalu (tahun 2003) mengalami kerusakan berat. Saat ini pembangkit berkapasitas 12,4 megawatt (MW) tidak bisa dioperasikan untuk memenuhi kebutuhan listrik di Jawa Tengah (Koran Tempo, 2004). Dari hasil kondisi PLTA Tulis saat ini, terdapat beberapa permasalahan dari berbagai macam aspek dalam proses perencanaan, sehingga perlu adanya evaluasi khusus masing-masing dari aspek tersebut. Salah satu aspek yang perlu dikaji ulang adalah masalah perencanaan pembangunan terowongan pada PLTA Tulis karena terowongan merupakan aspek yang sangat penting dan pokok dalam keberlangsungan fungsi berjalannya PLTA yaitu sebagai distribusi atau angkutan aliran air.

Proses perencanaan dan analisis pemasangan penyangga sementara menjadi pokok permasalahan dalam penulisan Tugas Akhir ini, dalam hal ini pada proses pembangunan *headrace tunnel* Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Tulis di Banjarnegara.

Masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah mengetahui kestabilan penyangga sementara berdasarkan kondisi *finite element* dan nilai *total displacement*. Proses perencanaan dan analisis pemasangan penyangga sementara menjadi pokok permasalahan dalam penulisan Tugas Akhir ini, dalam hal ini pada proses pembangunan *headrace tunnel* Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Tulis di Banjarnegara.

## II. Tinjauan Lokasi Penelitian

PLTA Tulis berlokasi di Desa Sokaraja, Kecamatan Pagentan, Kabupaten Banjarnegara, Jawa Tengah. Pencapaian lokasi dapat dicapai dari kota Semarang ke arah selatan menuju Kota Banjarnegara. Lokasi Terowongan dapat ditempuh dari Kota Banjarnegara ke arah timur ± 10 km, tepatnya dari jalan Raya Banjarnegara-Wonosobo km.5, terdapat pertigaan Singomerto, dari pertigaan Singomerto ke arah utara ± 15 km dengan kondisi jalan menanjak, berkelok, serta beraspal cukup baik selebar 4 – 5 m.

## III. Dasar Pembuatan Model Terowongan

Dasar pertimbangan dan pembuatan model terowongan (Koesnaryo, 1994) adalah :

### 1. Geometri terowongan

Hal yang perlu diperhatikan dalam geometri terowongan adalah:

1. Geometri model
2. Geometri daerah penyelidikan
3. Batas model
4. Kesimetrian
5. Jaringan elemen model

### 2. Karakteristik geomekanik dari batuan

Dalam mensimulasikan kondisi terowongan dan memperoleh hasil yang benar, sangat diperlukan pengetahuan mengenai kondisi geologi dari daerah yang bersangkutan, seperti litologi, stratigrafi dan struktur geologi.

Data yang diperlukan untuk menganalisis terdiri dari dua macam yaitu sifat fisik material dan sifat mekanis material. Sifat fisik material berupa nilai bobot isi batuan ( $\gamma$ ), sedangkan sifat mekanis batuan mencakup : Modulus Young (E), *Poisson's Ratio* ( $\nu$ ), kuat tarik, kuat tekan dan sudut geser dalam. Setiap batuan harus diketahui parameter-parameter tersebut.

### 3. Kondisi pembebanan

Dalam melakukan perhitungan pembebanan biasanya digunakan tegangan awal ( $\sigma_0$ ) sebagai tegangan vertikal, yaitu :

$$\sigma_0 = \sigma_v = \gamma \cdot H$$

$$\sigma_h = \frac{1-\nu}{\nu} \sigma_v$$

H adalah jarak terowongan dari permukaan tanah.

## IV. Stratigrafi Sekitar Terowongan PLTA Tulis

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Banjarnegara dan Pekalongan, yang disusun oleh W. H Condon, dkk. (1996) pada gambar 2.3, tatanan stratigrafi daerah ini dapat dikelompokkan menjadi beberapa formasi, yang secara umum berupa kelompok batuan vulkanik dan sedimen.

Formasi batuan tertua yang tersingkap di daerah penyelidikan adalah Formasi Rambatan (Tmr), berumur Miosen Awal sampai Tengah terdiri dari satuan batuan serpih, napal dan batupasir gampingan terdapat foraminifera kecil.

Formasi Tapak Anggota Breksi (Tptb) yang terdiri dari breksi gunung api yang bersusunan andesit dan batupasir tuffaan yang sebagian terdapat sisa tumbuhan.

## V. Geologi Sekitar Terowongan PLTA Tulis

Batuan yang dijumpai sepanjang terowongan terdiri dari

- o Batuserpih : berwarna abu-abu sampai abu-abu kehitaman, bersifat kompak, cukup kuat

sampai kuat. Jika terkena udara akan mudah hancur dan tingkat *swelling* tinggi.

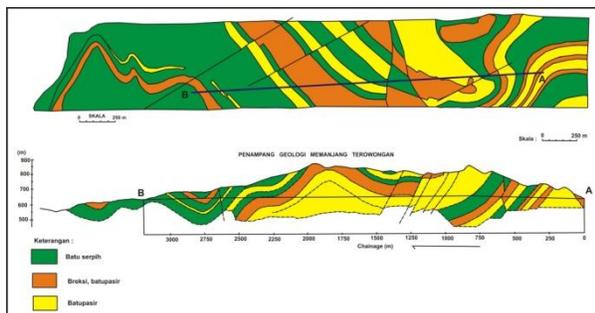
- Batupasir : berwarna abu-abu kehitaman, sebagian berwarna hijau, bila lapuk berwarna coklat. Berwarna hijau dikarenakan terdapat komposisi mineral-mineral berwarna hitam kehijauan yang berasal dari kegiatan gunung berapi. Dapat diklasifikasikan sebagai batupasir tuffan. Struktur lapisan yang tidak tertaur menunjukkan nendatan selama proses oengendapan. Batupasir berukuran butir halus hingga kasar. Sisipan batuserpih dan perubahan ukuran butir memperlihatkan batuan berlapis.
- Batu breksi : berwarna abu-abu kecoklatan, fragmen terdiri dari andesit dan matrik terdiri dari pasir tuffan. Ukuran butirnya bervariasi dari 20 mm hingga 30 cm.

Sedangkan Stuktur Geologi yang dijumpai di sepanjang terowongan terdiri dari :

- Perlipatan : Di sepanjang terowongan terdapat sebuah antiklin dan sinklin utama yang miring kearah utara, serta beberapa sinklin kecil. Sinklin utama diberi nama sinklin kayuares.
- Sesar : terdapat sesar utama dan sesar minor di sepanjang terowongan. Berdasarkan data-data pemboran pemboran inti dan data permukaan maka dihasilkan dua pola sesar utama, yaitu :
  - Sesar normal, mempunyai jurus timur-barat, dengan sedikit variasi
  - Sesar naik mempunyai jurus utara-selatan

Zona sesar disini merupakan suatu zona rekahan dengan spasi rapat dan sering dijumpai milonit dan cermin sesar. Dengan adanya sesar-sesar ini maka terowongan akan mudah runtuh.

Berdasarkan literatur menunjukkan bahwa sepanjang terowongan menunjukkan bahwa adanya zona-zona rekahan dan zona-zona sesar terpotong oleh jalur terowongan.



Gambar 5.1 Peta Geologi Sekitar Terowongan (Dwiyanto, 1994 dimodifikasi)

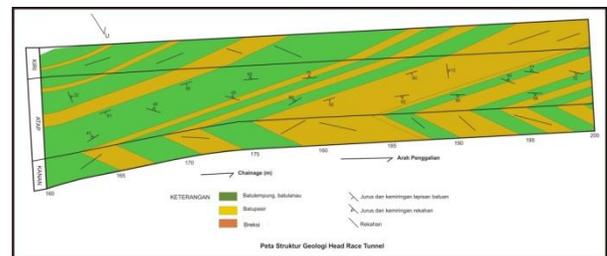
## VI. Geologi Teknik Dalam Terowongan PLTA Tulis

Berdasarkan literatur, kondisi di dalam terowongan yang telah tergalai dihasilkan penampang struktur geologi sepanjang terowongan yang dapat dilihat pada gambar 2.2.

Batuan di sepanjang terowongan dapat dikelompokkan menjadi 3 yaitu :

- Batu breksi dan batupasir  
Berwarna abu-abu kecoklatan, bersifat massif dan kompak. Cukup kuat sampai kuat, spasi rekahan 10 cm hingga 1 m. Penggalan pada batuan ini memperlihatkan terowongan mantap. Rembesan air dijumpai lewat rekahan.
- Selang-seling antara batuserpih dan batupasir  
Batuan ini berwarna abu-abu kecoklatan sampai abu-abu gelap. Berlapis baik, tebal perlapisan berkisar 10 cm hingga 1 m. Lemah sampai cukup kuat, spasi rekahan 5 cm hingga 50 cm. Adanya perlapisan dan rekahan mengurangi kemantapan terowongan. Rembesan air dijumpai lewat bidang perlapisan dan rekahan. Kadang-kadang dijumpai sisipan tipis lempung lunak.
- Batupasir  
Berwarna abu-abu kecoklatan sampai abu-abu gelap. Kompak, lemah sampai cukup kuat. Berlapis jelek, spasi rekahan 10 cm hingga 1 m. rembesan air sering dijumpai lewat rekahan.

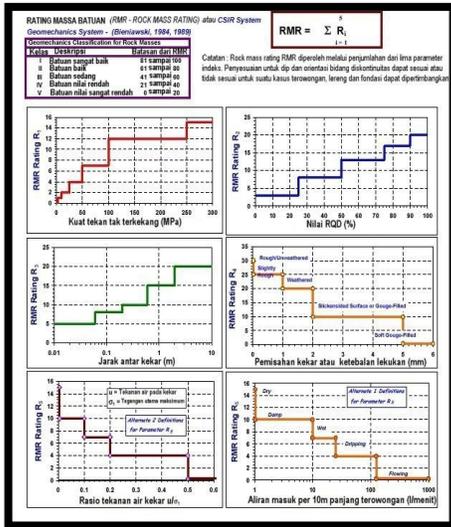
Batuan di dalam terowongan dari chainage 0 sampai 377 m mempunyai kemiringan berkisar  $N280^{\circ}E/55^{\circ}$  dan  $N295^{\circ}E/56^{\circ}$ . Pada awal terowongan terdiri dari batu breksi, kemudian terdiri dari selang-seling antara batupasir dan batuserpih. Rekahan didapatkan tidak merata. Zona-zona rekahan dalam lubang galian dijumpai sesuai dengan data seismik, hanya berbeda dalam lebar zonanya saja. Sehingga penampang seismik sepanjang terowongan yang ada sangat berguna dalam pelaksanaan penggalian. Arah rekahan berkisar  $N255^{\circ}E/70^{\circ}$ ,  $N205E/72^{\circ}$ ,  $N115E/61^{\circ}$ .



Gambar 6.1 Penampang Peta Struktur Geologi Headrace Tunnel (Dwiyanto, 1994 dimodifikasi)

## VII. Klasifikasi Massa batuan Dengan Metode Rock Mass Rating (RMR)

*Bienawski's Geomechanic Classification* memberikan tingkatan massa batuan (*Rock Mass Rating*) berdasarkan kualitasnya. Klasifikasi geomekanik berdasarkan pada lima parameter yaitu kekuatan batuan, kualitas inti batuan, kondisi airtanah, spasi kekar dan karakteristik kekar.



Gambar 7.1 Sistem Klasifikasi Geomekanik untuk rating massa batuan (*RMR*) (Bienawski, 1989 dalam Dinas PU, 2005)

Parameter sistem klasifikasi massa batuan *RMR* terdiri dari :

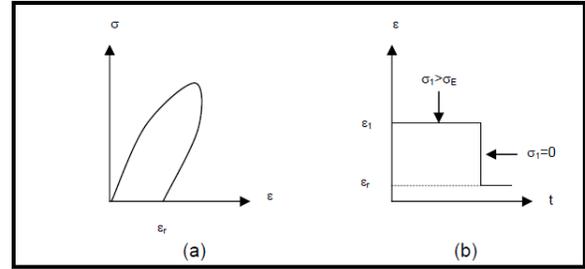
1. Kekuatan batuan
2. *Rock Quality Designation* (Penentuan kualitas batuan)
3. Spasi (jarak antar diskontinuitas)
4. Kondisi Diskontinuitas
5. Kondisi air tanah pada batuan
6. Orientasi dari diskontinuitas

## VIII. Perilaku Batuan

Batuan mempunyai perilaku yang berbeda-beda pada saat menerima beban. Perilaku ini dapat ditentukan dengan pengujian di laboratorium yaitu dengan pengujian kuat tekan.

### a. Elastik

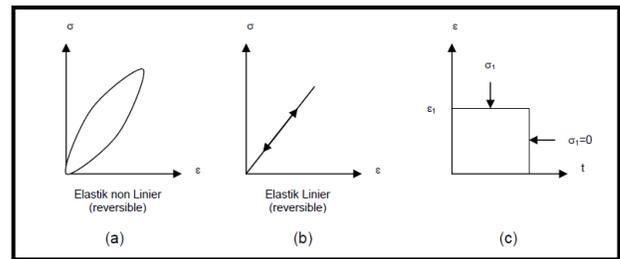
Batuan dikatakan berperilaku elastik apabila tidak ada deformasi permanen pada saat tegangan dihilangkan (dibuat nol). Dari kurva tegangan-regangan hasil pengujian kuat tekan terdapat dua macam sifat elastik, yaitu elastik linier dan elastik non linier.



Gambar 2.8 (a,b) Kurva tegangan-regangan. (c) Kurva regangan-waktu untuk perilaku elastik linier dan elastik non linier (Kuswanto dan Wacono, 2006)

### b. Elasto Plastik

Perilaku plastik batuan dapat dicirikan dengan adanya deformasi (regangan) permanen yang besar sebelum batuan runtuh atau hancur (*failure*).



Gambar 2.9 (a) Kurva tegangan-regangan dan (b) Kurva regangan-waktu untuk perilaku batuan elasto plastik (Kuswanto dan Wacono, 2006)

## IX. Kriteria Keruntuhan dari Hoek dan Brown

Pada dasarnya sistem *RMR* dan *Q* dikembangkan untuk aplikasi penambangan dan terowongan, sedangkan indeks kekuatan geologi (*GSI*) menghasilkan uji mutu massa batuan untuk perkiraan langsung kekuatan dan kekakuan batuan utuh dan rekahan. Perkiraan cepat dengan *GSI* dapat dilakukan dengan menggunakan bagan grafik yang diberikan dalam gambar tabel 9.1 dan membantu prosedur penggunaan di lapangan.

Dalam metode ini, tegangan utama maksimum ( $\sigma_1$ ) sesuai dengan tegangan utama minimum ( $\sigma_3$ ) pada keadaan runtuh melalui rumus empiris yang bergantung pada faktor-faktor (Dinas PU, 2005) berikut :

- a) kuat tekan uniaksial batuan ( $\sigma$ ),
- b) konstanta material jenis batuan ( $m$ ),
- c) tiga buah parameter empiris yang menggambarkan tingkat patahan massa batuan ( $m_b$ ,  $s$ , dan  $a$ ).

Kriteria keruntuhan dari Hoek-Brown yang asli setelah setelah mengalami modifikasi menjadi kriteria yang ter-generalisasi menjadi bentuk umum yang diterbitkan dalam bukunya

(Hoek, Kaiser dan Bawden tahun 1995 dalam Soetojo, 2009) sebagai berikut:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a$$

Harga  $\sigma_1$  dan  $\sigma_3$  adalah harga maksimum dan minimum tegangan efektif prinsipal pada saat mengalami keruntuhan,  $m_b$  adalah nilai konstan dari Hoek-Brown untuk massa batuan, harga  $s$  dan  $a$  adalah konstanta yang tergantung pada karakteristik massa batuan,  $\sigma_c$  adalah harga *Uniaxial Compressive Strength* (UCS) pada batuan utuh (*intact*) (Soetojo, 2009).

Untuk batuan utuh (*intact rock*) harga " $s$ " = 1 dan  $m_b = m_i$ , sehingga persamaan dapat ditulis sebagai berikut :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left( m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{1/2}$$

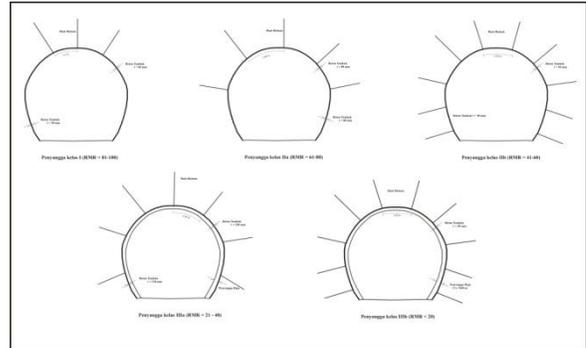
Massa batuan dengan kualitas yang bagus dan dapat diterima dimana kondisi antar butirnya relatif terikat kuat (*tight interlocking*), harga konstanta " $a$ " nya adalah sama dengan 0.5. Untuk kualitas massa batuan yang jelek, modifikasi kriteria dari Hoek-Brown ini lebih dapat digunakan yaitu dengan mengambil harga  $s = 0$ .

Tabel 9.1 Perhitungan Konstan pada Massa Batuan *Undisturbed* (Hoek, Kaiser dan Bawden, 1995)

GENERALISED HOEK-BROWN CRITERION		SURFACE CONDITION		STRUCTURE		
$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a$ <p><math>\sigma_1'</math> = major principal effective stress at failure  <math>\sigma_3'</math> = minor principal effective stress at failure  <math>\sigma_c</math> = uniaxial compressive strength of <i>intact</i> pieces of rock  <math>m_b</math>, <math>s</math> and <math>a</math> are constants which depend on the composition, structure and surface conditions of the rock mass</p>		VERY GOOD Very rough, unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR Slack-sided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings containing angular rock fragments	VERY POOR Slack-sided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
	BLOCKY -very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	$m_b/m_s$ 0.60 $s$ 0.190 $a$ 0.5 $E_v$ 75,000 $v$ 0.2 GSI 85	0.40 0.062 0.5 40,000 0.2 75	0.26 0.015 0.5 20,000 0.25 62	0.16 0.003 0.5 9,000 0.25 48	0.08 0.0004 0.5 3,000 0.25 34
	VERY BLOCKY-interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	$m_b/m_s$ 0.40 $s$ 0.062 $a$ 0.5 $E_v$ 40,000 $v$ 0.2 GSI 75	0.29 0.021 0.5 24,000 0.25 65	0.16 0.003 0.5 9,000 0.25 48	0.11 0.001 0.5 5,000 0.25 38	0.07 0 0.53 2,500 0.3 25
	BLOCKY/SEAMY-folded and faulted with many intersecting discontinuities forming angular blocks	$m_b/m_s$ 0.24 $s$ 0.012 $a$ 0.5 $E_v$ 18,000 $v$ 0.25 GSI 60	0.17 0.004 0.5 10,000 0.25 50	0.12 0.001 0.5 6,000 0.25 40	0.08 0 0.5 3,000 0.3 30	0.06 0 0.55 2,000 0.3 20
	CRUSHED-poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded blocks	$m_b/m_s$ 0.17 $s$ 0.004 $a$ 0.5 $E_v$ 10,000 $v$ 0.25 GSI 50	0.12 0.001 0.5 6,000 0.25 40	0.08 0 0.5 3,000 0.3 30	0.06 0 0.55 2,000 0.3 20	0.04 0 0.60 1,000 0.3 10

## X. Rancangan Penyangga

Penyanggaan bertujuan membantu dinding terowongan menyangga beban massa batuan dari atas dan dan samping terowongan, sehingga terowongan tetap stabil (Dwiyanto, 1994).



Gambar 10.1 Penyangga Sementara Terowongan PLTA Tulis (Dwiyanto, 1994 dimodifikasi)

Dalam pelaksanaan pemasangan penyangga sementara di terowongan PLTA Tulis dipasang kombinasi dapat dilihat pada gambar 2.5 (Dwiyanto, 1994) antara :

- Baut batuan dan beton tembak
- Baut batuan, beton tembak, dan penyangga besi baja

Untuk menentukan kombinasi mana yang akan dipasang, telah dibuat rancangan tipe penyangga berdasarkan harga klasifikasi massa batuan (*rock mass rating = RMR*) (Dwiyanto, 1994).

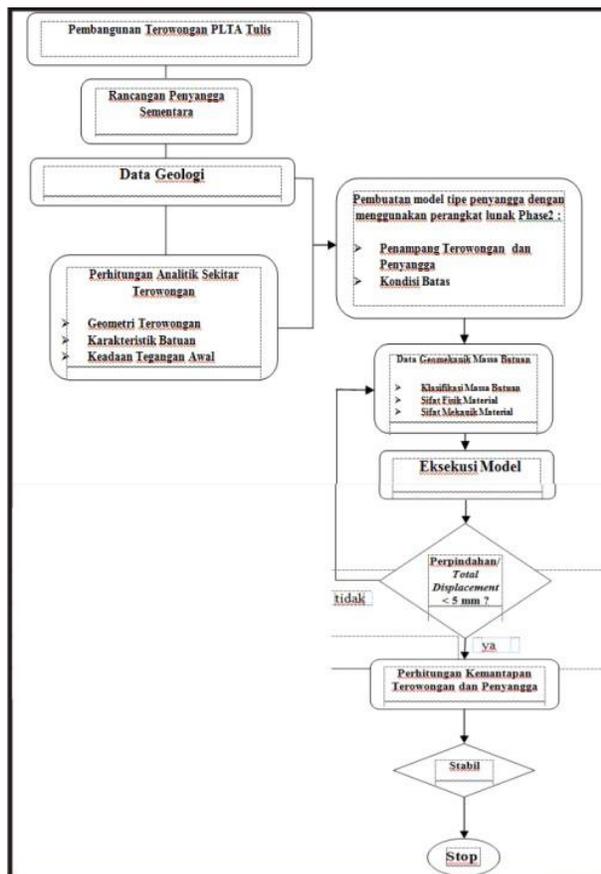
## XI. Metodologi

Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah metode pemodelan dan analisis hasil pemodelan.

- Dalam melakukan pemodelan penyangga sementara pada *headrace tunnel* dengan perangkat lunak *Phase2*
- Data yang digunakan meliputi peta struktur geologi sepanjang terowongan, peta geologi daerah setempat, data uji laboratorium dan lapangan, serta data rancangan terowongan, sifat fisik, mekanika batuan serta perilaku massa batuan sepanjang terowongan.
- Metode yang digunakan dalam pemodelan ini secara umum meliputi persiapan data, pengolahan dan perhitungan data, pembuatan model dan pemasukan parameter yang digunakan, eksekusi simulasi dan kestabilan terowongan.
- Persiapan data meliputi pengumpulan data-data yang berupa rancangan penyangga, data geologi dan perhitungan analitik sekitar terowongan

- Berdasarkan beberapa data tersebut maka kemudian dapat dilakukan pembuatan penampang dan penyangga terowongan serta kondisi batasnya.
- Setelah pembuatan penampang dan kondisi batas terowongan selesai, kemudian memasukkan parameter nilai yang digunakan yang meliputi sifat fisik batuan, sifat mekanik batuan dan klasifikasi massa batuan.
- Langkah selanjutnya adalah perhitungan kemandapan terowongan dan penyangga dengan cara eksekusi model. Eksekusi model meliputi pembuatan jaring-jaring (*mesh*), komputasi dan interpretasi.
- Hasil analisis dari eksekusi menunjukkan kondisi elemen yang rusak. Kondisi elemen yang rusak yang berjumlah lebih dari 25 elemen rusak maka terowongan dianggap belum stabil dan begitu pula sebaliknya. Setelah kondisi terowongan stabil maka simulasi dihentikan.

## XII. Flow Chart



Gambar 3.1 Bagan Alir Pemodelan Terowongan dan Penyangga

## XIII. Hasil dan Pembahasan

### 13.1 Hasil Simulasi Menggunakan Program Phase

Metode elemen hingga (*Finite Element Method*) merupakan metode solusi numerik, yang dalam geomekanika dipakai untuk menentukan medan tegangan dan perpindahan jika diketahui modulus elastisitas atau deformasi berdasarkan perilaku massa batuan yang diterapkan. Dan telah terbukti bahwa metode ini dapat menghitung secara lebih konsisten terhadap distribusi tegangan, regangan, dan perpindahan akibat pembuatan lubang bukaan bawah tanah, dibandingkan dengan metode analitik konvensional. Dalam metode elemen hingga, media dianggap sebagai gabungan dari elemen-elemen, berdasarkan prinsip keseimbangan. Ide logikanya adalah dengan mengetahui besar perpindahan dari tiap titik simpul pada tiap elemen, maka perpindahan tersebut diekstensikan pada seluruh elemen dalam media.

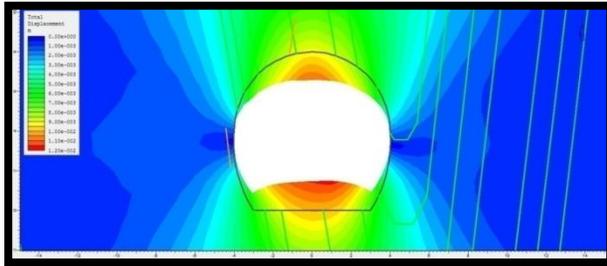
Hasil simulasi menunjukkan nilai perpindahan yang berbeda-beda. Nilai perpindahan sangat dipengaruhi oleh nilai modulus deformasi ( $E$ ). Semakin tinggi nilai modulus deformasi semakin rendah nilai perpindahan. Selain itu faktor yang sangat berpengaruh terhadap nilai perpindahan adalah parameter kekuatan material yang terdiri dari kriteria keruntuhan dan tipe material. Hasil simulasi pemodelan menunjukkan bahwa jika tipe material berupa material elastis maka parameter kriteria keruntuhan tidak berpengaruh terhadap nilai perpindahan, sedangkan parameter yang sangat berpengaruh adalah nilai modulus deformasi. Sedangkan jika menggunakan tipe material plastis, parameter kriteria keruntuhan yang digunakan cukup berpengaruh terhadap nilai perpindahan. Kriteria keruntuhan menggunakan dua jenis kriteria yaitu Mohr Coulomb dan *Generalised Hoek-Brown*.

Simulasi pemodelan tidak menunjukkan adanya hubungan dengan klasifikasi massa batuan *Rock Mass Rating* (RMR). Berdasarkan simulasi pemodelan terdapat kelas massa batuan RMR yang paling tinggi namun nilai perpindahan yang dihasilkan cukup besar. Hal tersebut terjadi pada beberapa dan kebanyakan hasil simulasi. Contoh terdapat beberapa hasil simulasi pada kelas massa batuan IIa yang memiliki nilai perpindahan lebih besar dibandingkan kelas massa batuan IIb.

### 13.2 Kemandapan Terowongan *Chainage* 198 m

Pada pemodelan terowongan di *chainage* 198 m, material yang ada pada *chainage* ini terdiri

dari batulempung dengan kuat tekan batuan utuh 3.566 MPa. Kelas massa batuan di chainage ini mempunyai bobot 8 dengan kualitas batuan sangat rendah atau *very poor rock* (Bieniawski, 1989 ). Berdasarkan tabel di bawah ini dapat dilihat nilai *total displacement* dari kelas massa batuan IIIb. Nilai *total displacement* dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti dapat dilihat pada tabel 13.1 :



Gambar 13.1 Nilai *total displacement* beserta penyebarannya dalam terowongan dan bentuk perpindahan yang terjadi sebelum dilakukan pemasangan penyangga

Tabel 13.1 Parameter yang digunakan dan nilai *total displacement* dari sebelum dilakukan ekskavasi hingga pemasangan *liner* (tipe material elastis)

Failure Criteria	Type Material	Modulus Young's (Mpa)	Total Displacement sebelum Ekskavasi (m)	Total Displacement setelah Ekskavasi (m)	Total Displacement setelah dipasang penyangga rockbolt (m)	Total Displacement setelah dipasang penyangga rockbolt dan shotcrete (m)	Total Displacement setelah dipasang penyangga rockbolt, shotcrete dan liner (m)
Mohr Coulomb	Elastis	996.6	1.27E-05	0.0117161	0.0117161	0.0116651	0.0113971
Generalized Hoek-Brown	Elastis	2014.85	4.00E-18	0.00489594	0.00489594	0.00487444	0.00481942
Generalized Hoek-Brown	Elastis	996.6	9.10E-18	0.0117161	0.0117161	0.0116651	0.0113971
Mohr Coulomb*	Elastis	2014.85	4.00E-18	0.00489594	0.00489594	0.00487444	0.00481942
Mohr Coulomb*	Elastis	996.6	9.10E-18	0.0117161	0.0117161	0.0116651	0.0113971

\*nilai yang digunakan berasal dari perhitungan menggunakan program RocLab

\*nilai yang digunakan berasal dari perhitungan menggunakan program RocLab

Penyangga *rockbolt* yang digunakan berjumlah 17 buah dan panjang 3 m dengan spasi pemasangan 1.2 m. Sedangkan penyangga yang digunakan berupa *shotcrete* memiliki tebal 0.12 m dan *liner* memiliki tebal 0.75 m. Berdasarkan tabel di atas dapat dilihat bahwasanya faktor yang sangat berpengaruh adalah modulus deformasi. Dengan memasukkan kriteria keruntuhan yang berbeda namun nilai *total displacement* tetap sama dengan catatan nilai modulus deformasi yang digunakan adalah sama. Hal ini dikarenakan karena tipe material yang digunakan merupakan elastis lain halnya dengan tipe material plastis. Tipe material elastis memiliki grafik perbandingan antara regangan (x) dan tegangan (y) yang berbanding lurus. Nilai *total displacement* yang dihasilkan dari simulasi dan mendekati sesuai dengan kondisi lapangan adalah

nilai *total displacement* yang dihasilkan dengan menggunakan parameter modulus deformasi massa batuan ( $E_{rm}$ ) yang bernilai 996.6 MPa atau modulus deformasi hasil perhitungan menggunakan program Rheo-Staub.

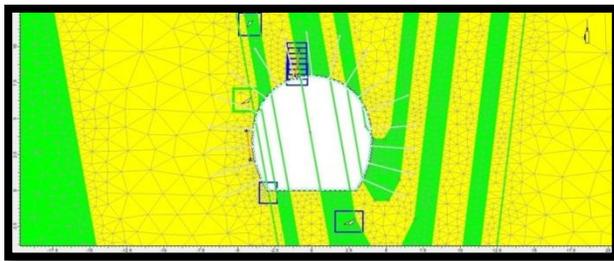
Tabel 13.2 Parameter yang digunakan dan nilai *total displacement* dari sebelum dilakukan ekskavasi hingga pemasangan *liner* (tipe material plastis)

Failure Criteria	Type Material	Modulus Young's (Mpa)	Total Displacement sebelum Ekskavasi (m)	Total Displacement setelah Ekskavasi (m)	Total Displacement setelah dipasang penyangga rockbolt dan shotcrete (m)	Total Displacement setelah dipasang penyangga rockbolt, shotcrete dan liner (m)
Mohr Coulomb	Plastis	996.6	1.27282e-005	0.0122751	0.0122401	0.0119221
Generalized Hoek-Brown	Plastis	996.6	0.0103358	0.0328336	0.032924	0.0331277
Generalized Hoek-Brown	Plastis	2014.85	0.00472411	0.0125982	0.0126511	0.0127491
Generalized Hoek-Brown	Plastis	170.29	0.0606358	0.192238	0.192578	0.193616

Berdasarkan tabel diatas, tipe material plastis mempunyai kelebihan yaitu tidak hanya modulus deformasi yang sangat berpengaruh terhadap nilai *total displacement*. Dengan menggunakan tipe material plastis, faktor yang sangat berpengaruh terhadap nilai *total displacement* tidak hanya modulus deformasi saja namun kriteria keruntuhan juga sangat besar pengaruhnya.

Pada gambar 13.2 terdiri dari penampang terowongan, litologi sekitar terowongan dan kondisi elemen pada kelas IIIb chainage 198 m. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat elemen yang pecah. Elemen pecah berjumlah 8 jenis. Elemen pecah paling banyak berada di bagian atap terowongan dan terjadi pada kekar. Selain itu elemen pecah terjadi pada bidang perlapisan.

Berdasarkan kondisi *finite element*, terdapat 8 elemen yang rusak. Kondisi elemen tersebut dapat menunjukkan kondisi kestabilan terowongan. Hasil kondisi elemen pada chainage 198 m kelas massa batuan IIIb menunjukkan terowongan dapat dikatakan stabil. Dalam simulasi yang dilakukan tidak memasukkan parameter pemasangan penyangga berupa anyaman kawat dan penyangga besi baja, padahal dalam pelaksanaan pekerjaan di lapangan pemasangan kedua penyangga tersebut dilakukan sebagai *support* pada terowongan. Selain itu dalam simulasi pemodelan ini tidak memasukkan parameter kondisi air tanah dan sifat mekanik dari kekar karena keterbatasan data yang digunakan.



Gambar 13.2 Kondisi elemen pada massa batuan kelas IIIb

### 13.3 Kemantapan Terowongan *Chainage* 205 m

Pada pemodelan terowongan di *chainage* 205 m, material yang ada pada *chainage* ini terdiri dari batupasir dan batulempung dengan kuat tekan batuan utuh 11.9505 MPa. Kelas massa batuan di *chainage* ini mempunyai bobot 25 dengan kualitas batuan rendah atau *poor rock* (Bieniawski, 1989). Berdasarkan tabel di bawah ini dapat dilihat nilai *total displacement* dari kelas massa batuan IIIa. Nilai *total displacement* dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti dapat dilihat pada tabel 13.3:

Tabel 13.3 Parameter yang digunakan dan nilai *total displacement* dari sebelum dilakukan ekskavasi hingga pemasangan *liner* (tipe material elastis)

Failure Criteria	Type Material	Modulus Young's (MPa)	Total Displacement sebelum Ekskavasi (m)	Total Displacement setelah Ekskavasi (m)	Total Displacement setelah dipasang penyangga rockbolt	Total Displacement setelah dipasang penyangga rockbolt dan shotcrete (m)	Total Displacement setelah dipasang penyangga rockbolt, shotcrete dan liner (m)
Mula-Cadamb	Elastis	1345.9	2.13E-17	0.0122892	0.0122892	0.0122242	0.0119684
Generasi-1 Hoki-Brown	Elastis	2765.95	1.17E-17	0.00667931	0.00667931	0.00664413	0.00650389
Generasi-1 Hoki-Brown	Elastis	1345.9	2.31E-17	0.0122892	0.0122892	0.0122242	0.0119684
Mula-Cadamb*	Elastis	2765.95	1.17E-17	0.00667931	0.00667931	0.00664413	0.00650389
Mula-Cadamb*	Elastis	1345.9	2.13E-17	0.0122892	0.0122892	0.0122242	0.0119684

\*nilai yang digunakan berasal dari perhitungan menggunakan program RocLab  
 \*nilai yang digunakan berasal dari perhitungan menggunakan program RocLab

Penyangga *rockbolt* yang digunakan berjumlah 13 buah dan panjang 3 m dengan spasi pemasangan 1.5 m. Sedangkan penyangga yang digunakan berupa *shotcrete* memiliki tebal 0.15 m dan *liner* memiliki tebal 0.75 m. Berdasarkan tabel di atas dapat dilihat bahwasanya faktor yang sangat berpengaruh adalah modulus deformasi.

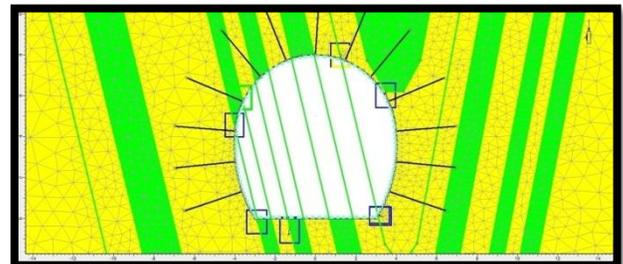
Nilai *total displacement* yang dihasilkan dari simulasi dan mendekati sesuai dengan kondisi lapangan adalah nilai *total displacement* yang dihasilkan dengan menggunakan parameter modulus deformasi massa batuan ( $E_{rm}$ ) yang bernilai 1345.9 MPa atau modulus deformasi hasil perhitungan menggunakan program Rheo-Staub.

Tabel 13.4 Parameter yang digunakan dan nilai *total displacement* dari sebelum dilakukan ekskavasi hingga pemasangan *liner* (tipe material plastis)

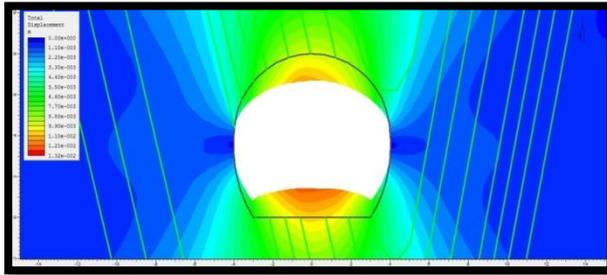
Failure Criteria	Type Material	Modulus Young's (MPa)	Total Displacement sebelum Ekskavasi (m)	Total Displacement setelah Ekskavasi (m)	Total Displacement setelah dipasang penyangga rockbolt dan shotcrete (m)	Total Displacement setelah dipasang penyangga rockbolt, shotcrete dan liner (m)
Mula-Cadamb	Plastis	1345.9	2.19E-17	0.0130027	0.0129667	0.0126469
Generasi-1 Hoki-Brown	Plastis	1345.9	0.0220316	0.060153	0.0602437	0.060613
Generasi-1 Hoki-Brown	Plastis	2765.95	0.0128279	0.0291013	0.0291559	0.0293641
Generasi-1 Hoki-Brown	Plastis	168.84	0.175371	0.450293	0.450916	0.453644

Berdasarkan tabel diatas, tidak jauh berbeda dengan simulasi di *chainage* 198 m, tipe material plastis mempunyai kelebihan yaitu tidak hanya modulus deformasi yang sangat berpengaruh terhadap nilai *total displacement*. Dengan menggunakan tipe material plastis, faktor yang sangat berpengaruh terhadap nilai *total displacement* tidak hanya modulus deformasi saja namun kriteria keruntuhan juga sangat besar pengaruhnya. Hal ini disebabkan faktor tipe material plastis, sesuai dengan grafik hubungan antara tegangan dan regangan maka dapat dilihat jika tegangan berkurang maka regangan belum tentu akan berkurang juga, mungkin bisa tetap atau sedikit bertambah.

Pada gambar 13.3 terdiri dari penampang terowongan, litologi sekitar terowongan dan kondisi elemen pada kelas IIIa *chainage* 205 m. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat elemen yang pecah. Elemen pecah berjumlah 9 jenis Elemen pecah paling banyak berada di hampir seluruh bagian terowongan dan terjadi pada bidang perlapisan atau bidang diskontinuitas. Kondisi elemen tersebut dapat menunjukkan kondisi kestabilan terowongan. Hasil kondisi elemen pada *chainage* 205 m kelas massa batuan IIIa menunjukkan terowongan dapat dikatakan stabil.



Gambar 13.3 Kondisi elemen pada massa batuan kelas IIIa



Gambar 13.4 Nilai *total displacement* beserta penyebarannya dalam terowongan dan bentuk perpindahan yang terjadi sebelum dilakukan pemasangan penyangga

### 13.4 Kemantapan Terowongan *Chainage* 230 m

Pada pemodelan terowongan di *chainage* 230 m, material yang ada pada *chainage* ini terdiri dari breksi dan batupasir dengan kuat tekan batuan breksi utuh 27.115 MPa. Kelas massa batuan di *chainage* ini mempunyai bobot 63 dengan kualitas batuan baik atau *good rock* (Bieniawski, 1989). Berdasarkan tabel di bawah ini dapat dilihat nilai *total displacement* dari kelas massa batuan IIa. Nilai *total displacement* dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 13.5 Parameter yang digunakan dan nilai *total displacement* dari sebelum dilakukan ekskavasi hingga pemasangan *liner* (tipe material elastis)

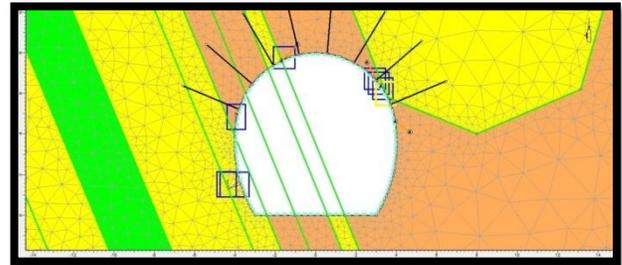
Failure Criteria	Type Material	Modulus Young's (MPa)	Total Displacement sebelum Ekskavasi (m)	Total Displacement setelah Ekskavasi (m)	Total Displacement setelah dipasang penyangga rockbolt (m)	Total Displacement setelah dipasang penyangga rockbolt dan shotcrete (m)	Total Displacement setelah dipasang penyangga rockbolt dan liner (m)
None Condition	Elastis	1222.22	1.18E-17	0.0119481	0.0119481	0.0119181	0.0116711
Unconsolidated Rock-Block	Elastis	1222.22	1.18E-17	0.0119481	0.0119481	0.0119181	0.0116711
Unconsolidated Rock-Block	Elastis	4166.35	5.96E-18	0.00451967	0.00451967	0.00450668	0.00439762

Penyangga *rockbolt* yang digunakan berjumlah 8 buah dan panjang 3 m dengan spasi pemasangan 1.4 m. Sedangkan penyangga yang digunakan berupa *shotcrete* memiliki tebal 0.08 m dan *liner* memiliki tebal 0.75 m. Berdasarkan tabel di atas dapat dilihat bahwasanya faktor yang sangat berpengaruh adalah modulus deformasi. Nilai *total displacement* yang dihasilkan dari simulasi dan mendekati sesuai dengan kondisi lapangan adalah nilai *total displacement* yang dihasilkan dengan menggunakan parameter modulus deformasi massa batuan ( $E_m$ ) yang bernilai 1222.22 MPa atau modulus deformasi hasil perhitungan menggunakan program Rheo-Staub.

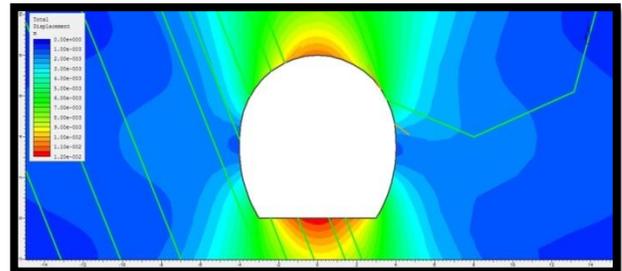
Pada gambar 13.5 terdiri dari penampang terowongan, litologi sekitar terowongan dan kondisi elemen pada kelas IIa *chainage* 230 m. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat elemen yang pecah. Elemen pecah berjumlah 8 jenis Elemen pecah terjadi pada dinding kiri bagian bawah dan atap

bagian kanan. Elemen pecah terdapat pada atap bagian kanan disebabkan karena terdapat diskontinuitas berupa bidang perlapisan. Sedangkan di bagian atap terowongan elemen pecah terjadi karena terdapat kekar.

Berdasarkan kondisi *finite element*, terdapat 8 elemen yang rusak. Kondisi elemen tersebut dapat menunjukkan kondisi kestabilan terowongan. Hasil kondisi elemen pada *chainage* 230 m kelas massa batuan IIa menunjukkan terowongan dapat dikatakan stabil.



Gambar 13.5 Kondisi elemen pada massa batuan kelas IIa



Gambar 13.6 Nilai *total displacement* beserta penyebarannya dalam terowongan sebelum dilakukan pemasangan penyangga

### 13.5 Kemantapan Terowongan *Chainage* 250 m

Pada pemodelan terowongan di *chainage* 250 m, material yang ada pada *chainage* ini terdiri dari batupasir dengan kuat tekan batuan utuh 20.335 MPa. Kelas massa batuan di *chainage* ini mempunyai bobot 45 dengan kualitas batuan sedang atau *fair good rock* (Bieniawski, 1989). Berdasarkan tabel di bawah ini dapat dilihat nilai *total displacement* dari kelas massa batuan IIb. Nilai *total displacement* dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti dapat dilihat pada tabel 13.6:

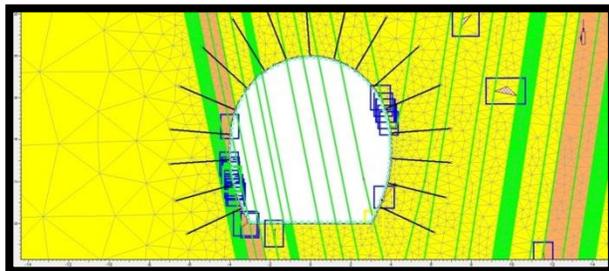
Tabel 13.6 Parameter yang digunakan dan nilai *total displacement* dari sebelum dilakukan ekskavasi hingga pemasangan *liner* (tipe material elastis)

Failure Criteria	Type Material	Modulus Young's (MPa)	Total Displacement sebelum Ekskavasi (m)	Total Displacement setelah Ekskavasi (m)	Total Displacement setelah dipasang penyangga <i>rockbolt</i> (m)	Total Displacement setelah dipasang penyangga <i>rockbolt</i> dan <i>shotcrete</i> (m)	Total Displacement setelah dipasang penyangga <i>rockbolt</i> dan <i>liner</i> (m)	Total Displacement setelah dipasang penyangga <i>rockbolt</i> , <i>shotcrete</i> dan <i>liner</i> (m)
Maka Cokelat	Elasm	1693.26	1.16E-17	0.0103593	0.0103593	0.0101413	0.0100933	0.0100813
Generasil/ Hook-Brown	Elasm	1693.26	1.16E-17	0.0103593	0.0103593	0.0101413	0.0100933	0.0100763
Generasil/ Hook-Brown	Elasm	3608.06	5.08E-18	0.00483633	0.00483633	0.00482863	0.00471774	0.00470974

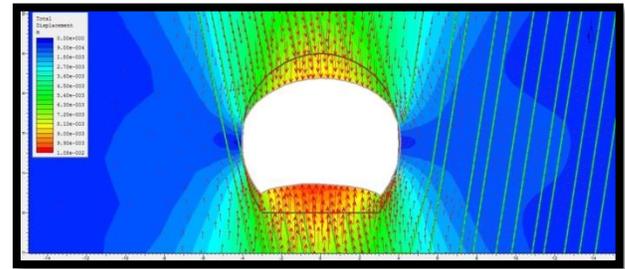
Penyangga *rockbolt* yang digunakan berjumlah 17 buah dan panjang 3 m dengan spasi pemasangan 1.2 m. Sedangkan penyangga yang digunakan berupa *shotcrete* memiliki tebal 0.05 m dan *liner* memiliki tebal 0.75 m. Berdasarkan tabel di atas dapat dilihat bahwasanya faktor yang sangat berpengaruh adalah modulus deformasi. Nilai *total displacement* yang dihasilkan dari simulasi dan mendekati sesuai dengan kondisi lapangan adalah nilai *total displacement* yang dihasilkan dengan menggunakan parameter modulus deformasi massa batuan ( $E_m$ ) yang bernilai 1693.26 MPa atau modulus deformasi hasil perhitungan menggunakan program Rheo-Staub.

Pada gambar 13.7 terdiri dari penampang terowongan, litologi sekitar terowongan dan kondisi elemen pada kelas IIB chainage 250 m. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat elemen yang pecah. Elemen pecah berjumlah 23 jenis Elemen pecah paling banyak terjadi pada dinding kiri bawah dan dinding kanan bagian atas. Elemen pecah cenderung terdapat pada bidang diskontinuitas berupa bidang pelapisan.

Berdasarkan kondisi *finite element*, terdapat 23 elemen yang rusak. Kondisi elemen tersebut dapat menunjukkan kondisi kestabilan terowongan. Hasil kondisi elemen pada chainage 250 m kelas massa batuan IIB menunjukkan terowongan dapat dikatakan stabil. Kondisi elemen pada chainage ini merupakan kondisi elemen terjelek diantara yang lain. Pada chainage ini kondisi terowongan mendekati tidak stabil.



Gambar 13.7 Kondisi elemen pada massa batuan kelas IIB



Gambar 13.8 Nilai *total displacement* beserta penyebarannya dalam terowongan dan arah perpindahan yang terjadi sebelum dilakukan pemasangan penyangga

#### XIV. Kesimpulan

1. Dalam pembuatan simulasi penyangga terowongan menggunakan program Phase2 parameter yang digunakan meliputi geometri terowongan, data geologi, sifat fisik batuan, sifat mekanik batuan, klasifikasi massa batuan, kondisi pembebanan dan sifat fisik maupun sifat mekanik penyangga.
2. Berdasarkan hasil simulasi, dihasilkan nilai *total displacement*.
3. Pada tipe material elastis, modulus deformasi merupakan parameter yang sangat berpengaruh terhadap nilai *total displacement*.
4. Sedangkan pada tipe material plastis, faktor yang berpengaruh terhadap nilai *total displacement* bukan hanya berdasarkan modulus deformasi tetapi parameter kekuatan batuan juga berpengaruh termasuk di dalamnya berupa kriteria keruntuhan yang digunakan.
5. Hasil simulasi chainage 198 m dengan kelas massa batuan IIIb menunjukkan nilai *total displacement* dari setelah dilakukan ekskavasi hingga pemasangan penyangga berupa *rockbolt*, *shotcrete* dan *liner* adalah sebagai berikut :
  - Tipe material elastis: 0.0117161 m - 0.0113736 m
  - Tipe material plastis : 0.0122751 m - 0.0119221 m
6. Hasil simulasi chainage 205 m dengan kelas massa batuan IIIa menunjukkan nilai *total displacement* dari setelah dilakukan ekskavasi hingga pemasangan penyangga berupa *rockbolt*, *shotcrete* dan *liner* adalah sebagai berikut :
  - Tipe material elastis: 0.0122892 m - 0.0119034 m
  - Tipe material plastis : 0.0130027 m - 0.0126469 m
7. Hasil simulasi chainage 230 m dengan kelas massa batuan IIa menunjukkan nilai *total displacement* dari setelah dilakukan ekskavasi

- hingga pemasangan penyangga berupa *rockbolt*, *shotcrete* dan *liner* adalah sebagai berikut :
- Tipe material elastis: 0.0119481 m - 0.0116411 m
  - Tipe material plastis : 0.0128013 m - 0.0125508 m
8. Hasil simulasi chainage 250 m dengan kelas massa batuan IIB menunjukkan nilai *total displacement* dari setelah dilakukan ekskavasi hingga pemasangan penyangga berupa *rockbolt*, *shotcrete* dan *liner* adalah sebagai berikut :
- Tipe material elastis: 0.0103595 m - 0.0100815 m
  - Tipe material plastis : 0.0114762 m - 0.0112959 m
9. Hasil simulasi menunjukkan kondisi *mesh finite element*. Berikut hasil kondisi elemen yang rusak beserta kestabilan terowongan pada masing-masing chainage:
- Chainage 198 m terdapat 8 elemen rusak, kondisi terowongan stabil
  - Chainage 205 m terdapat 9 elemen rusak, kondisi terowongan stabil
  - Chainage 230 m terdapat 8 elemen rusak, kondisi terowongan stabil
  - Chainage 250 m terdapat 23 elemen rusak, kondisi terowongan stabil

## XV. Daftar Pustaka

- Anonim. 2011. *Tunnel*. Sumber : <http://en.wikipedia.org/wiki/Tunnel> (Semarang, 12 November 2011 ; 10.03)
- Anonim. 2002. *Rock Mass Strength Analysis Using the Hoek Brown Failure Criteria*. Rocscience Inc. Kanada
- Anonim. t.th. *Phase2 Tutorial*. Rocscience Inc. Kanada
- Anonim. 2004. *Setelah Selesai Dibangun PLTA Tulis Gagal Dioperasikan*. Sumber : <http://arsip.net/id/link.php?lh=VVcDBg0GWfS>
- KoranTempo. (Semarang, 6 Januari 2013 ; 20.00)
- Bieniawski, Z.T . 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley and Sons. New York
- BNPB. 2009. *Pulau Jawa Peta Wilayah Administrasi*. Sumber : BNPB.go.id (Semarang, 05-12-2012)

Condon, W.H, dkk. 1996. *Peta Geologi Lembar Banjarnegara dan Pekalongan, Jawa*. Edisi Kedua. Bandung : Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Dwiyanto. 1994. *Pemantauan Pembangunan Terowongan Menggunakan Konvergenmeter Kaitannya dengan Pemasangan Penyangga Di PLTA Tulis Jawa Tengah*. Bidang Khusus Geomekanika Program Studi Rekayasa Pertambangan Program Pascasarjana ITB. Bandung

..... 2005. *Hand out Geoteknik D4 Sungai dan Pantai*. Bandung : Departemen Pekerjaan Umum.

Edelbro, Catrin. 2003. *Rock Mass Strength*. Departement Civil Engineering Division Rock Mechanics Lulea University of Technology. Lulea

Goodman, Richard. E. 1989. *Introduction to Rock Mechanics*. Edisi Kedua. John Wiley and Sons. New York

Hoek, E dan Diederichs, M. S. t.th. *Empirical Estimation of Rock Modulus*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. Taiwan

Koesnaryo. S. 1994. *Rancangan Terowongan*. Jurusan Teknik Pertambangan Fakultas Teknologi Mineral UPN. Yogyakarta

..... 1994. *Teknik Penyelidikan untuk Rancangan Terowongan*. Jurusan Teknik Pertambangan Fakultas Teknologi Mineral UPN. Yogyakarta

Lunardi, Pietro.t. th. *Design and Construction of Tunnels*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin

Menteri Pekerjaan Umum. 2005. *Penyelidikan Geoteknik untuk Fondasi Bangunan Air*. Keputusan Menteri Pekerjaan Umum. Nomor 498/KPTS/M/2005.t. t.

Price, D. G. 2009. *Engineering Geology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin

Priyono dan Ricky Indrasyahputra. 2007. *Laporan Tugas Akhir "Perencanaan Sistem Dewatering pada Rencana Pelaksanaan Pembangunan Bendung Gerak Tulis Banjarnegara-JawaTengah"*. Sumber : [eprints.undip.ac.id/33846/5/1796\\_CHAPTER\\_1.pdf](http://eprints.undip.ac.id/33846/5/1796_CHAPTER_1.pdf) (Semarang, 3 Agustus 2012 ; 14.40)

Rai, Made. A dan Kramadibrata, Suseno.1999. *Mekanika Batuan*. Laboratorium Geomekanika Jurusan Teknik Pertambangan ITB. Bandung

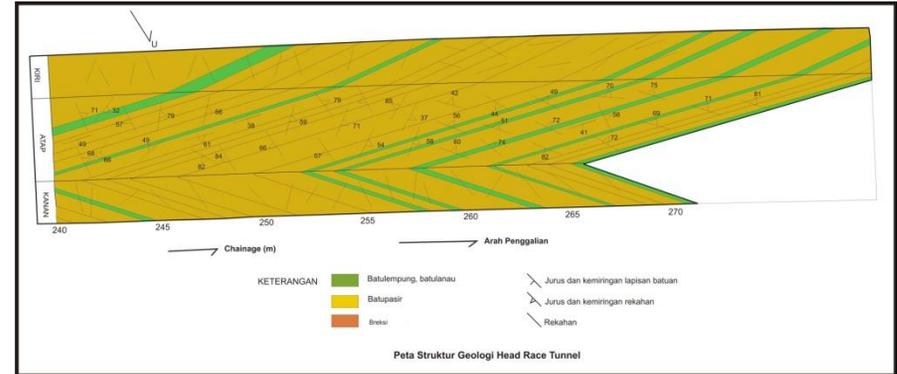
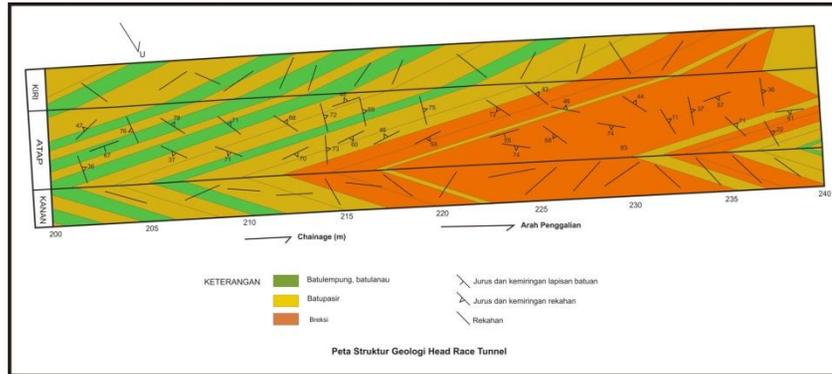
Soetojo, Moesdarjono. 2009. *Teknik Pondasi Pada Lapisan Batuan*. ITS Press. Surabaya

Verhoef, P.N.W. 1994. *Geologi untuk Teknik Sipil*. Jakarta : Erlangga.

Waltham, Tony. 2009. *Foundations of Engineering Geology*. Edisi Ketiga. Spon Press. New York

## XVI. Lampiran

### Lampiran 1. Peta Struktur Geologi Headrace Tunnel Chainage 200 m – 265 m



### Lampiran 2. Hasil Pengujian di Laboratorium

No	Nama Batuan	Kondisi	No. Lubang Bor	Kedalaman (m)	$\gamma$ (MN/m <sup>3</sup> )	Kuat Tekan (MPa)	Modulus Elastis E (MPa)	Poisson Ratio
1	Batulempung	Basah	BH - 5	100.05 - 100.20	0.02256	2.092	$0.72727 \times 10^3$	0.28
2	Batulempung	Basah	BH - 1	129.00 - 129.25	0.02440	5.04	$1.25000 \times 10^3$	0.20
3	Batupasir	Basah	BH - 2	130.50 - 131.00	0.02563	12.25	$0.98652 \times 10^3$	0.20
4	Batupasir	Basah	BH - 2	138.00 - 138.38	0.02597	28.42	$2.40000 \times 10^3$	0.21
5	Breksi	Basah	BH - 3	114.00 - 114.27	0.02660	27.54	$1.85185 \times 10^3$	0.15
6	Breksi	Basah	BH - 2	99.30 - 99.63	0.02536	26.69	$0.59259 \times 10^3$	0.17

**Lampiran 3. Parameter yang dipakai dalam perhitungan**

Kelas Massa Batuan	Batuan	$\gamma$ MN/m <sup>3</sup>	Kuat Tekan $\sigma_c$ MPa	E MPa	V	C MPa	$\Phi$ (..... <sup>o</sup> )	Beton Tembok					Baut Batuan	
								$\gamma$ MN/m <sup>3</sup>	E MPa	V	C MPa	$\Phi$ (..... <sup>o</sup> )	k (MN/m)	Gaya Tarik Maksimum (MN)
II a	Breksi	0.02596	27.115	1222.22	0.16	4.40	54	0.02	14400.0	0.3	3.75	54	34.611	0.25
II b	Batupasir	0.0258	20.335	1693.26	0.205	3.40	53							0.25
III a	Batupasir Batulempung	0.02464	11.9505	1345.9	0.2225	2.20	52.5							0.15
III b	Batulempung	0.02348	3.566	996.6	0.24	0.64	52							0.10

Kelas Massa Batuan	Batuan	Penyangga Besi Baja U32		Koefisien Tegangan Lateral $= \frac{V}{1 - V}$
		k (MN/m)	Gaya Tarik Maksimum (MN)	
II a	Breksi	65.2391	0.83297	0.223
II b	Batupasir			0.223
III a	Batupasir Batulempung			0.272
III b	Batulempung			0.272

Lampiran 4. Harga RMR Terhadap Jarak Lubang Galian di *Headrace Tunnel* chainage 155 m – 265 m

