

**PEMODELAN PEMASANGAN PENYANGGA SEMENTARA MENGGUNAKAN
PERANGKAT LUNAK PHASE 2 PADA HEADRACE TUNNEL CHAINAGE 45 M – 155 M
DIPLTA TULIS KABUPATEN BANJARNEGARA, JAWA TENGAH**

Oleh : Ghozali Mahmud

ABSTRACT

In the process of tunnel construction, the support design process is a very important thing to do. This process must be done carefully and thoroughly in order to obtain cost efficiencies expenditure on the tunnel project. Because the total expenditure in the construction of a tunnel is not cheap. This support planning process itself is divided into two namely the planning of temporary and permanent support. The support planning usually is done before and the time of tunnel construction. This research aims to model the geological conditions around the tunnel, the tunnel pit conditions before supporting system installed, and the temporary support design of the headrace tunnel of Tulis Hydropower Banjarnegara Residence, Central Java Province. So we will know types of the most appropriate support based on physical properties, rock mechanics and rock mass behavior along the tunnel. The research method used is descriptive and experimental methods. By way of temporary support modelling in headrace tunnel with Phase2 software. In this research will analyze and make temporary support models of 45 m – 155 m chainage the headrace tunnel. In the chainage will be made 3 models (II b, III a, and III b) based on rock mass rating value. Based on the modelling results it is known that for class II b has a total displacement of < 5 mm. So the installation of supports on class II b is relatively stable and secure there will be no collapse of the tunnel. As well as combinations obtained temporary support is most effective with a total value that is the smallest displacementnya shotcrete 1 variations is 50 mm; 3 m long of rock bolts with spaced 2 m and 10 of its number ; shotcrete 2 variations 100 mm. Whereass the rock mass class III A and III B have > 5 mm in the result of total displacement. So the tunnel is will not stable and secure with a variety of shotcrete and rock bolts that has been done. It would require the addition of another temporary support variant form of steel set as installation instructions and supporting the tunnel excavation (After Bieniawski, 1989).

Keywords: Tunnel, planning of temporary support, simulation of support system, stability of support system

I. PENDAHULUAN

Terowongan adalah sebuah tembusan di bawah permukaan tanah atau gunung. Terowongan umumnya tertutup di seluruh sisi kecuali di kedua ujungnya yang terbuka pada lingkungan luar. Beberapa ahli teknik sipil mendefinisikan terowongan sebagai sebuah tembusan di bawah permukaan yang memiliki panjang minimal 0.1 mil (0,1609 km), dan yang lebih pendek dari itu lebih pantas disebut *underpass*. Terowongan memiliki fungsi dan tujuan masing-masing yaitu sebagai jalan, pertambangan, pengelak aliran air dan penyedia air baku pada bendungan.

Pada pembangunan terowongan sering dijumpai masalah yang tidak biasa terjadi pada rancangan bangunan biasa. 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 tidak jauh berkaitan dengan sifat fisik batuan dan struktur geologi yang berkaitan langsung dengan gaya-gaya yang dihasilkan dari redistribusi tegangan awal.

Dalam perancangan sebuah galian bawah tanah diharapkan mampu memberikan penilaian massa batuan secara cermat. Tujuan dasar setiap rancangan untuk galian di bawah tanah harus menggunakan massa batuan itu sendiri sebagai material struktur utamanya. Selama penggalian terowongan diharapkan menghasilkan gangguan kemantapan pada dinding terowongan sekecil mungkin dan sedikit dalam penambahan beton atau penyangga. Dalam keadaan asli, batuan keras yang memiliki tegangan tekan akan lebih kuat daripada beton mungkin dalam beberapa kasus kekuatannya sama

dengan baja (Hoek dan Brown, 1980 dalam Koesnaryo, 1994)

Pada proses pembangunan terowongan, proses perancangan penyangga merupakan suatu hal yang sangat penting untuk dilakukan. Proses ini harus dilakukan dengan cermat dan teliti agar didapatkan efisiensi biaya pengeluaran pada proyek pembangunan terowongan tersebut. Karena jumlah pengeluaran total dalam pembangunan suatu terowongan membutuhkan biaya yang tidak murah. Proses perencanaan penyangga ini sendiri terbagi menjadi 2 yakni perencanaan penyangga sementara dan juga permanen. Perencanaan penyangga sementara biasanya dilakukan sebelum dan saat dilakukan konstruksi terowongan.

Proses perencanaan penyangga sementara inilah yang dijadikan pokok permasalahan dalam penulisan Tugas Akhir ini, dalam hal ini pada proses pembangunan *headrace tunnel* PLTA Tulis di Banjarnegara

II. KAJIAN PUSTAKA

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

Berdasarkan fungsinya, penyanggaan pada terowongan dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu :

- 1) penyangga sementara (temporer)
- 2) penyangga permanen.

Penyangga sementara biasanya digunakan pada saat berlangsungnya konstruksi terowongan, sebelum dipasang penyangga yang permanen. Di samping itu, penggalian suatu terowong-uji (test adit) biasanya juga memerlukan penyangga sementara (Dwiyanto, 1994).

Jika ditinjau dari segi bahannya, penyangga dapat menggunakan salah satu atau gabungan dari bahan (Dwiyanto, 1994) :

- 1) kayu
- 2) baja
- 3) beton monolit
- 4) beton tembak (shotcrete) dan jaring kawat (wire mesh)

Sedangkan *rockbolts* tidak termasuk jenis penyangga struktural melainkan sebagai bahan perkuatan

(Dwiyanto, 1994).

Penyangga jenis kayu lebih umum digunakan di tambang bawah tanah, sebab biasanya umur terowongan relatif singkat dan biaya harus ditekan serendah mungkin. Jenis penyangga yang lain digunakan pada terowongan sipil (Dwiyanto, 1994).

Dalam pelaksanaan pemasangan penyangga sementara di terowongan PLTA Tulis dipasang kombinasi (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). Hal ini sesuai tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Klasifikasi Massa batuan di Terowongan PLTA Tulis (Dwiyanto, 1994)

Menurut Bieniawski	Modifikasi PLN	Nilai Pembobotan (RMR)
I	I	81 - 100
II	IIa	61 - 80
III	IIb	41 - 60
IV	IIIa	21 - 40
V	IIIb	< 20

III. METODOLOGI

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. Air dari terowongan ini masuk di bagian hulu rencana bendungan Maung. Sebelum air sampai di Kali Merawu, dimanfaatkan dulu sebagai penggerak turbin pembangkit listrik. Sehingga terowongan disini berfungsi sebagai

headrace tunnel. Penggalan terowongan tersebut sampai selesai membutuhkan waktu cukup lama,. Sehingga untuk mengetahui kemantapan 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*).

Dalam penelitian ini untuk dapat melakukan pemodelan penyangga sementara pada *headrace tunnel* dengan perangkat lunak *Phase 2* maka dibutuhkan data terowongan yang meliputi peta struktur geologi sepanjang terowongan, peta geologi daerah setempat, data uji laboratorium dan lapangan, serta data rancangan terowongan. Berdasarkan data tersebut kemudian dianalisis dan dievaluasi dengan menggunakan perangkat lunak *Phase2* sehingga dihasilkan pemodelan penyangga sementara yang tepat dan efektif sesuai berdasarkan sifat fisik, mekanika batuan serta perilaku massa batuan sepanjang terowongan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam pelaksanaan pemasangan penyangga sementara di terowongan PLTA Tulis dipasang kombinasi (Dwiyanto, 1994) antara lain 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). Klasifikasi massa batuan tersebut terdiri atas 5 kelas yang merupakan modifikasi dari klasifikasi geomekanik dari Z.T Bieniawski. Kelas massa batuan tersebut yakni Kelas I, II a, II b, III a, dan III b.

Headrace Tunnel sendiri jika ditinjau secara mekanika termasuk ke dalam *pressure tunnel* dimana seluruh penampangnya terisi oleh air. Hal yang perlu diperhatikan pada perancangan terowongan tekan ialah kemantapan pada saat kosong maupun pada saat terisi air. Terowongan tekan menderita tekanan air dari dalam dan tekanan luar akibat massa batuan dan air tanah. Untuk menahan resultan tegangan tarik, bentuk penampang yang paling menguntungkan

dan ekonomis ialah bentuk bulat, dengan perkuatan beton. Akan tetapi agar lebih mudah dalam penggalian terowongannya maka dipilihlah bentuk tapal kuda pada *Headrace Tunnel* di PLTA Tulis ini.

Dari total panjang penyangga sementara *headrace tunnel* PLTA Tulis yakni 2860 m, pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis dan pemodelan penyangga sementara pada chainage 45 m – 155 m. Selanjutnya chainage tersebut akan dimodelkan menjadi 3 buah model penyangga sementara dengan menggunakan program *Phase2*. Program *Phase2* merupakan program element hingga elasto-plastic 2 dimensi untuk memperhitungkan tegangan dan *displacement* lubang bukaan di bawah tanah. Pembuatan 3 model tersebut didasarkan pada variasi klasifikasi massa batuan yang terdapat pada chainage 45 m – 155 m yang terdiri atas 3 kelas yakni kelas II b, III a, dan III b. Tiap-tiap model tersebut terdiri atas 4 stage/tahapan.

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.

Tahapan dalam pembuatan model penyangga sementara pada *headrace tunnel* PLTA Tulis dengan menggunakan program *Phase2* ini adalah

- Pertama-tama kita membuat penampang terowongannya, bentuk penampang terowongan *headrace tunnel* ini adalah tapal kuda dengan diameter terowongan 8 m.

- Kemudian kita tentukan batas model untuk penampang terowongan tersebut. Untuk model penyangga sementara pada *headrace tunnel* ini memakai batas model yang tidak dipengaruhi oleh penggalian bukaan/eskavasi sebesar 20 kali diameter terowongan lubang bukaan itu sendiri. Batas model tersebut bisa berbentuk kotak, lingkaran, dsb. (seperti pada gambar 1.2 pada lampiran 1, gambar 2.2 pada lampiran 2, dan gambar 3.2 pada lampiran 3)
- Langkah ketiga adalah melakukan sayatan horisontal melintang pada peta struktur geologi *headrace tunnel* untuk mendapatkan gambaran litologi yang terdapat di dalam dan di luar penampang terowongan. Sehingga pada tahap ketiga ini kita akan mendapatkan gambaran bagaimana persebaran jurus dan kemiringan litologi jika kita melihat dari arah depan penampang terowongan. (seperti pada gambar 1.1 pada lampiran 1, gambar 2.1 pada lampiran 2 dan gambar 3.1 pada lampiran 3)
- Langkah keempat adalah menentukan besar tegangan yang terjadi pada penampang terowongan. Nilai-nilai yang harus ditentukan adalah nilai tegangan vertikal (σ_v / σ_1), tegangan horisontal (σ_h / σ_3), dan σ_z (dimana pada model *headrace tunnel* ini nilai $\sigma_z = \sigma_3$. Misal pada chainage 45 dengan nilai tegangan vertikal (σ_v) = 0,645 dan tegangan horisontal (σ_h) = 0,143835.
- Langkah kelima adalah *discretize and mesh*, membagi media kontinu menjadi beberapa elemen hingga. Elemen hingga dapat berbentuk segitiga ataupun segiempat. Sehingga pada tahapan ini seolah-olah kita seperti membuat jaring-jaring elemen, dimana semakin kecil elemen yang kita buat maka hasil permodelan yang akan didapatkan akan semakin baik. Untuk model *headrace tunnel* ini memakai *radiation factor* 0,1, dimana semakin besar *radiation factor* semakin kecil pula elemen yang dihasilkan.
- Langkah keenam adalah *define material properties*, menentukan sifat-sifat material/litologi berdasarkan tipe material, kriteria keruntuhan, serta sifat-sifat fisik dan mekanik material berdasarkan uji laboratorium.
- Langkah ketujuh adalah membuat model *headrace tunnel* ini menjadi 4 tahapan/stage (lihat gambar 1.3 pada lampiran 1, gambar 2.3 pada lampiran 2, dan gambar 3.3 pada lampiran 3) yakni
 - Stage 1 penampang terowongan sebelum penggalian (prosesnya dari langkah 1 sampai 6 di atas)
 - Stage 2 penampang terowongan setelah penggalian
 - Stage 3 penampang terowongan dengan variasi tipe penyangga sementara 1 (baut batuan + beton tembak I)
 - Stage 4 penampang terowongan dengan variasi tipe penyangga sementara 2 (ditambahkan beton tembak II).
- Langkah kedelapan adalah *compute and interpret*, pada tahap ini model yang telah kita buat tadi akan diproses dan dianalisis oleh program Phase2 yang nantinya akan dihasilkan output berupa gambar dan grafik dimana nantinya kita bisa menganalisis dan menyimpulkan kombinasi penyangga sementara mana yang paling sesuai berdasarkan sifat fisik, mekanika batuan serta perilaku massa batuan sepanjang terowongan. Hasil *interpret* misal seperti gambar 4.1 yang merupakan hasil interpretasi total *displacement* pada model 1.

4.1 Model 1

Model 1 merupakan pemodelan penyangga sementara pada terowongan pada kelas massa batuan II b yang terletak pada chainage 45. Massa batuan ini mempunyai nilai RMR 47, berdasarkan (Bieniawski, 1989) massa batuan ini termasuk kelas III (*fair rock*). Dimana massa batuan ini hanya memiliki *stand-up time* 1 minggu untuk span 5 m, sehingga diperlukanlah pemasangan penyangga sementara pada chainage 45 agar terowongan tidak mengalami keruntuhan. Pada model ini tersusun atas litologi berupa batupasir dan berada pada kedalaman 25 m. Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan

nilai tegangan vertikal (σ_v) = 0,645 dan tegangan horisontal (σ_h) = 0,143835. Setelah dimodelkan dengan *software* Phase2 maka dihasilkan model 1 seperti gambar berikut ini (lihat lampiran 1)

4.2 Model 2

Model 2 merupakan pemodelan penyangga sementara pada terowongan pada kelas massa batuan III b yang terletak pada *chainage* 108 (105 - 110). Massa batuan ini mempunyai nilai RMR 16, berdasarkan (Bieniawski, 1989) massa batuan ini termasuk kelas V (*very poor rock*). Dimana massa batuan ini hanya memiliki *stand-up time* 30 menit untuk span 1 m, sehingga diperlukanlah pemasangan penyangga sementara pada *chainage* 108 agar terowongan tidak mengalami keruntuhan. Pada model ini tersusun atas litologi berupa batulempung dengan perselingan batupasir dengan kemiringan lapisan batuan 58^0 dan berada pada kedalaman 50 m. Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan nilai tegangan vertikal (σ_v) = 1,174 dan tegangan horisontal (σ_h) = 0,319328. Setelah dimodelkan dengan *software* Phase2 maka dihasilkan model 2 seperti gambar berikut ini. (lihat lampiran 2)

4.3 Model 3

Model 3 merupakan pemodelan penyangga sementara pada terowongan pada kelas massa batuan III a yang terletak pada *chainage* 125. Massa batuan ini mempunyai nilai RMR 28, berdasarkan (Bieniawski, 1989) massa batuan ini termasuk kelas IV (*poor rock*). Dimana massa batuan ini hanya memiliki *stand-up time* 10 jam untuk span 2,5 m, sehingga diperlukanlah pemasangan penyangga sementara pada *chainage* 125 agar terowongan tidak mengalami keruntuhan. Pada model ini tersusun atas litologi berupa batulempung perselingan batupasir dan batupasir dengan kemiringan lapisan batuan 58^0 serta terowongan berada pada kedalaman 66,7 m. Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan nilai tegangan vertikal (σ_v) = 1,6427488 dan tegangan horisontal (σ_h) = 0,4468276736. Setelah dimodelkan dengan *software* Phase2 maka dihasilkan model 3 seperti gambar berikut ini. (lihat lampiran 3)

4.4 Total Displacement

Pada ketiga model tersebut dilakukan variasi penyangga sementara dengan menambahkan beton tembak dan baut batuan setelah dilakukan eskavasi/penggalian. Variasi tersebut didasarkan dari petunjuk penggalian dan pemasangan penyangga terowongan (After Bieniawski, 1989) serta variasi yang telah dilakukan pada terowongan tersebut (Dwiyanto, 1994). Dan setelah diproses dengan menggunakan paket program Phase2 dihasilkan nilai total *displacement* pada model 1 seperti pada tabel 1 (lihat lampiran 4), model 2 seperti pada tabel 2 (lihat lampiran 5), model 3 seperti pada tabel 3 (lihat lampiran 6). Untuk tiap tabel tersebut 1 model diproses dalam 1 stage (stage 1 sebelum eskavasi; stage 2 setelah eskavasi; stage 3 setelah eskavasi dan dipasang beton tembak 1 + baut batuan; stage 4 baut batuan + beton tembak 2; stage 5 beton tembak 1 + baut batuan + beton tembak 2)

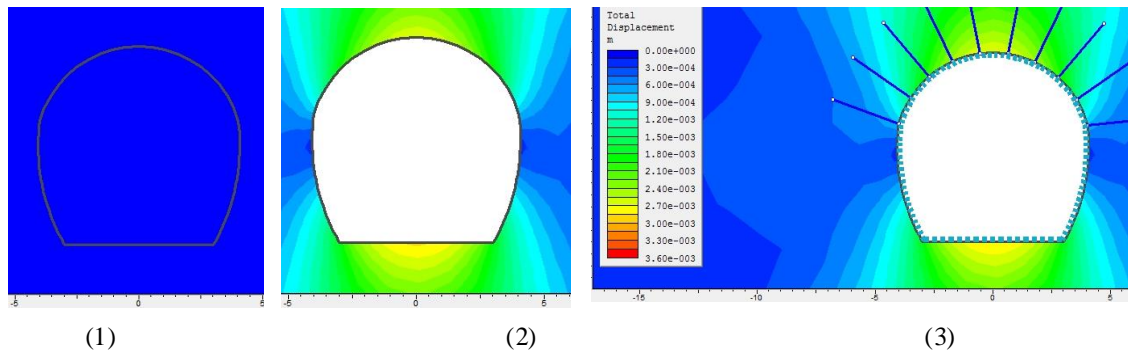
Berdasarkan tabel-tabel tersebut terlihat bahwa

- Untuk semua variasi penyangga sementara yang dilakukan pada kelas massa batuan II b memiliki nilai total *displacement* < 5 mm. Sehingga pemasangan penyangga pada kelas II b tersebut relatif stabil dan aman tidak akan terjadi keruntuhan pada terowongan. Serta didapatkan kombinasi penyangga sementara yang paling efektif dengan nilai total *displacement* yang paling kecil yakni variasi beton tembak 1 50 mm, baut batuan panjang 3 m spasi 2 m jumlah 10, dan beton tembak 2 100 mm. Dan apabila nantinya tebal beton tembak akan ditambah serta, baut batuan dipasang dengan spasi dan jumlah yang lebih besar maka akan dihasilkan nilai total *displacement* yang lebih kecil.
- Untuk semua variasi penyangga sementara yang dilakukan pada kelas massa batuan III b dan III a memiliki nilai total *displacement* > 5 mm, sehingga terowongan tersebut masih belum stabil dan aman dengan variasi beton tembak dan baut beton yang telah dilakukan. Maka diperlukan variasi penambahan penyangga sementara lagi berupa *steel set* seperti petunjuk penggalian dan pemasangan penyangga terowongan (After Bieniawski, 1989). Apabila penambahan *steel sets* tidak dilakukan kemungkinan keruntuhan

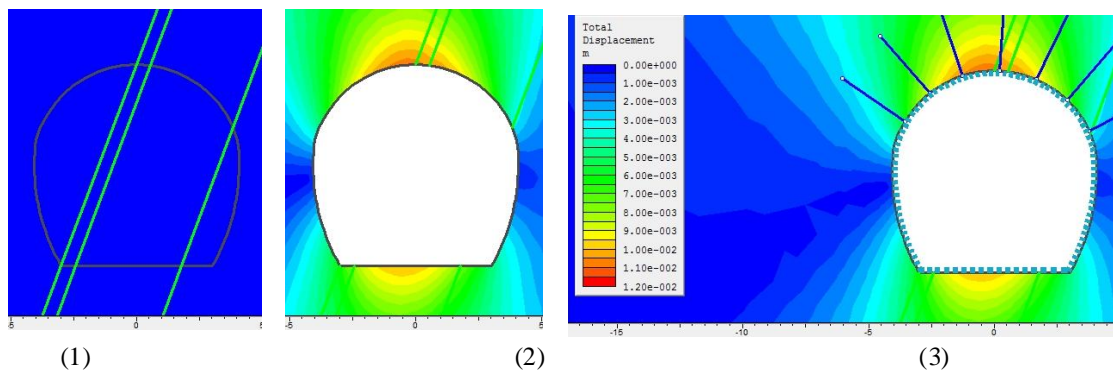
pada terowongan tersebut sangatlah besar.

- Nilai total displacement bukan dipengaruhi dari nilai RMR-nya tetapi dari kedalaman terowongan/overburden terowongan semakin besar

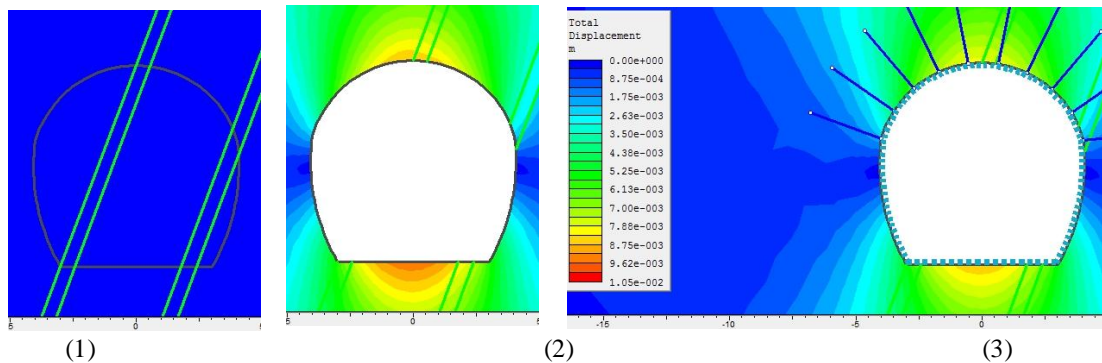
kedalamannya maka makin besar nilai total displacementnya.



Gambar 4.1 Total Displacement pada Model 1 Kelas II b



Gambar 4.2 Total Displacement pada Model 3 Kelas III a



Gambar 4.3 Total Displacement pada Model 2 Kelas III b

Berdasarkan gambar-gambar di atas terlihat bagaimana nilai total displacement pada tiap tahapan stage dari stage 1 sampai 3. Terlihat bahwa pada kelas massa batuan III a (lihat gambar 4.2) dan III b (lihat gambar 4.3) masih ditemukan warna coklat-oranye sebaliknya pada kelas massa batuan II b (lihat gambar 4.1) tidak ditemukan warna tersebut. Warna coklat-oranye pada gambar tersebut menunjukkan nilai total displacement yang cukup tinggi yang berarti

terowongan tersebut belum stabil sehingga memungkinkan terjadi keruntuhan pada daerah berwarna coklat-oranye tersebut. Dari gambar terlihat pula pada kelas III a dan III b yang mengalami pengurangan nilai total displacement pada model (dapat dilihat dari berkurangnya warna coklat-oranye pada stage 2 dan 3 pada kelas III a serta III b).

Pada model-model tersebut data berupa kenampakan struktur geologi berupa kekar pada penyangga sementara belum

dapat dimasukkan karena keterbatasan data laboratorium yang tersedia, akan tetapi setidaknya dari model tersebut sudah dapat menggambarkan kondisi lapangan yang sebenarnya. Dan apabila nantinya ingin didapatkan hasil analisis penyanggaan yang lebih lengkap lagi, sebaiknya dilakukan analisis tidak hanya dengan *software* Phase2 tetapi dengan *software-software* lain juga seperti Dips untuk analisis kekar dan discontinuities lainnya yang terdapat di dalam terowongan. Seperti Unwedge, Examine 2D, Examine 3D, Roc Support, Roclab, dan Rocdata.

Berikut ini merupakan contoh analisis tambahan dengan menggunakan *software* Roclab. Nilai m_b , s , a , *cohesion*, dan *friction angle* merupakan nilai yang diperoleh dari hasil analisis menggunakan Perangkat Lunak RocLab. Berdasarkan tabel 4 (lihat lampiran 7) terlihat perbedaan nilai yang cukup signifikan hasil perbandingan dari data laboratorium dengan hasil dari Roclab. Misal pada kelas massa batuan II b berdasarkan data laboratorium memiliki nilai *cohesion* 3,4 Mpa dan *friction angle* 53 sedangkan dari data Roclab memiliki nilai *cohesion* 0,135 Mpa dan *friction angle* 47,6. Hal ini berpengaruh juga dengan hasil analisis data-data tersebut setelah diproses pada *software* Phase2. Seperti terlihat pada tabel 5 dan 6 (lihat lampiran 8) didapatkan nilai total *displacement* hasil dari data Roclab memiliki nilai yang relatif lebih besar dari data laboratorium hal ini dikarenakan pada *software* Roclab ini karena pada Roclab ini terdapat parameter tambahan berupa nilai σ_{ci} , nilai GSI (*Geological Strength Index*), jenis litologi (mi), faktor gangguan (D) yang lebih mempresentasikan kondisi sebenarnya dari lapangan. Sehingga data yang didapatkan pun lebih akurat dibanding dengan tidak menggunakan *software* Roclab.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari hasil pembahasan tersebut dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan simulasi *software* Phase2 menunjukkan :
 - a. Pada kelas massa batuan II b memiliki nilai total *displacement* 0.0028327 m berdasarkan kriteria keruntuhan Mohr Coloumb, dan 0.0028408 m berdasarkan

criteria keruntuhan Generalized Hoek-Brown.

- b. Pada kelas massa batuan III a memiliki nilai total *displacement* 0.0109638 m berdasarkan kriteria keruntuhan Mohr Coloumb, dan 0.0417228 m berdasarkan kriteria keruntuhan Generalized Hoek-Brown.
- c. Pada kelas massa batuan III b memiliki nilai total *displacement* 0.00855922 m berdasarkan kriteria keruntuhan Mohr Coloumb, dan 0.0181428 m berdasarkan kriteria keruntuhan Generalized Hoek-Brown.
- d. Karena nilai total *displacement* pada kelas massa batuan II b < 5 mm maka pemasangan penyangga pada kelas II b tersebut relatif stabil dan aman tidak akan terjadi keruntuhan pada terowongan. Dengan variasi kombinasi penyangga sementara yang paling efektif dengan nilai total *displacement*nya yang paling kecil yakni variasi beton tembak I 50 mm, baut batuan panjang 3 m spasi 2 m jumlah 10, dan beton tembak II 100 mm.
- e. Sedangkan untuk kelas massa batuan III a dan III b karena total *displacement* yang dihasilkan masih > 5 mm maka terowongan tersebut masih belum stabil dan aman. Kemungkinan terjadi keruntuhan pada kelas massa batuan tersebut sangat besar.
- f. Nilai total *displacement* pada suatu kelas massa batuan bukan hanya dipengaruhi dari nilai RMR-nya tetapi dari kedalaman terowongan/overburden terowongan semakin besar kedalamannya maka makin besar nilai total *displacement*nya.

Saran

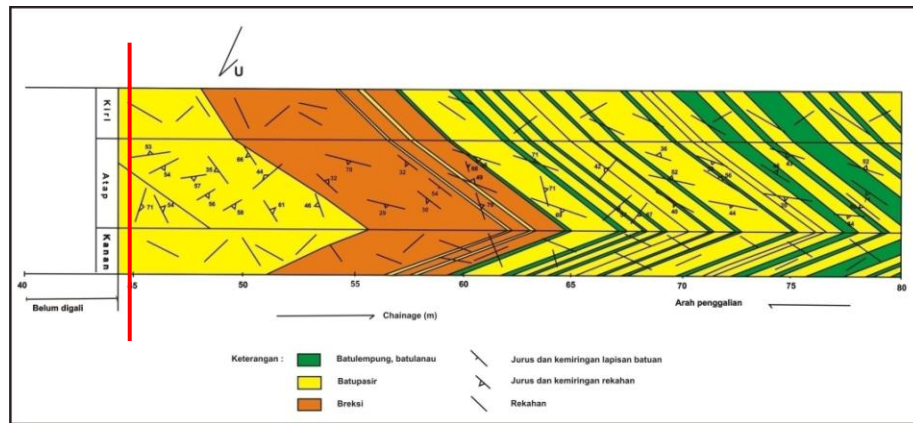
- Pada kelas massa batuan III a dan III b diperlukan variasi jenis penyangga lain berupa *steel set* agar terowongan pada kelas massa

batuan tersebut dapat stabil dan aman tidak mengalami keruntuhan.

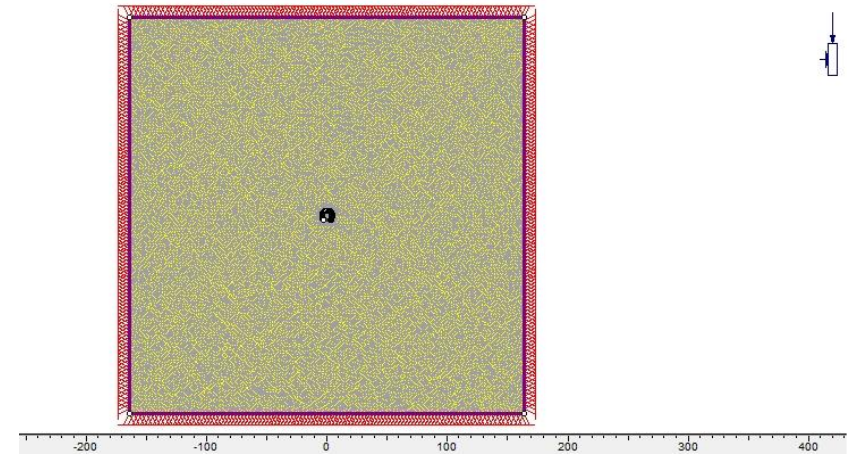
VI. DAFTAR PUSTAKA

- Bieniawski, Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. New York : John Wiley & Sons.
- Brady, B. G. H dan Brown, E. T. 1985. *Rock Mechanics for Underground Mining*. George Allen & Unwin.
- Condon, W.H, dkk, 1996., Peta Geologi Lembar Banjarnegara dan Pekalongan, Jawa, Edisi ke dua, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung
- Dwiyanto J. S. 1994. *Tesis "Pemantauan Pembangunan Terowongan Menggunakan Konvergenmeter Kaitannya dengan Pemasangan Penyangga di PLTA Tulis Jawa Tengah*. Bandung : Bidang Khusus Geomekanika Program Studi Rekayasa Pertambangan Program Pascasarjana ITB.
- _____. 2005. *Hand out Geoteknik D4 Sungai dan Pantai*. Bandung : Departemen Pekerjaan Umum.
- Eldebro, Catrin. 2003. *Technical Report : Rock Mass Strength*. Lulea University of Technology.
- Goodman, Richard. E. 1989. *Introduction to Rock Mechanics*. Edisi Kedua. John Wiley and Sons. New York
- Hoek, E., Kaiser, P.K. dan Bawden, W.F. 1995. *Support of underground excavations in hard rock*. A.A Balkema/Rotterdam/Brookfield
- Hoek, E. 2002. A brief history of the Hoek-Brown criterion, Program : "Roclab", URL : <http://www.rockscience.com>, 10 Juni 2012.
- Koesnaryo, S. 1994. *Diktat Kuliah Teknik Terowongan "Buku 1 Teknik Penyelidikan untuk Rancangan Terowongan"*. Yogyakarta : Jurusan Teknik Pertambangan UPN Yogyakarta.
- _____. 1994. *Diktat Kuliah Teknik Terowongan "Buku 2 Rancangan Terowongan"*. Yogyakarta : Jurusan Teknik Pertambangan UPN Yogyakarta.
- Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan. 1971. *Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971 NI-2*. Bandung.
- Lucio, Canonica. 1991. *Memahami Beton Bertulang*. Bandung : Penerbit Angkasa.
- 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
- PT Terra Buana Manggala Jaya. 1984. *Pekerjaan Geologi Teknik dan Seismik Rencana Terowongan PLTA Tulis*.
- _____. 1988. *Pekerjaan Penyelidikan Geologi Tambahan untuk Waterways PLTA Tulis*.
- Rai, Made. A dan Kramadibrata, Suseno. 1999. *Mekanika Batuan*. Laboratorium Geomekanika Jurusan Teknik Pertambangan ITB. Bandung
- Waltham, Tony. 2009. *Foundations of Engineering Geology*. Edisi Ketiga. Spon Press. New York

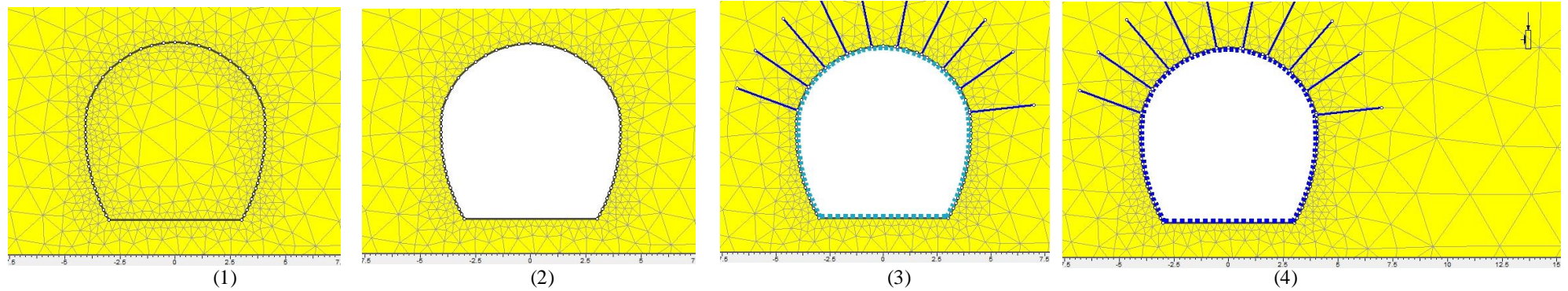
VII LAMPIRAN
Lampiran 1



Gambar 1.1 Headrace Tunnel Chainage 45-80 m

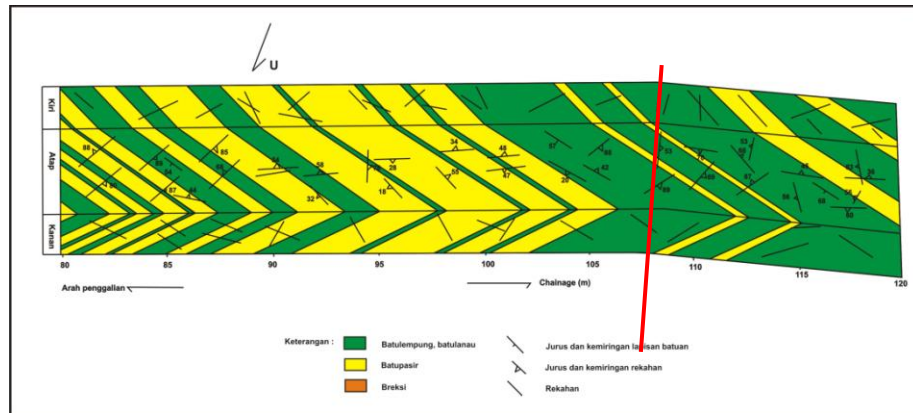


Gambar 1.2 Model 1 Kelas II b

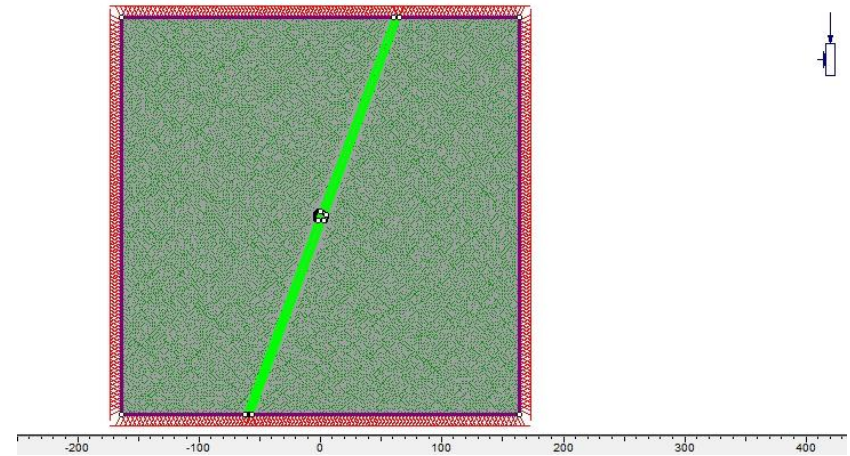


Gambar 1.3 Stage 1-4 Model 1 Kelas II b

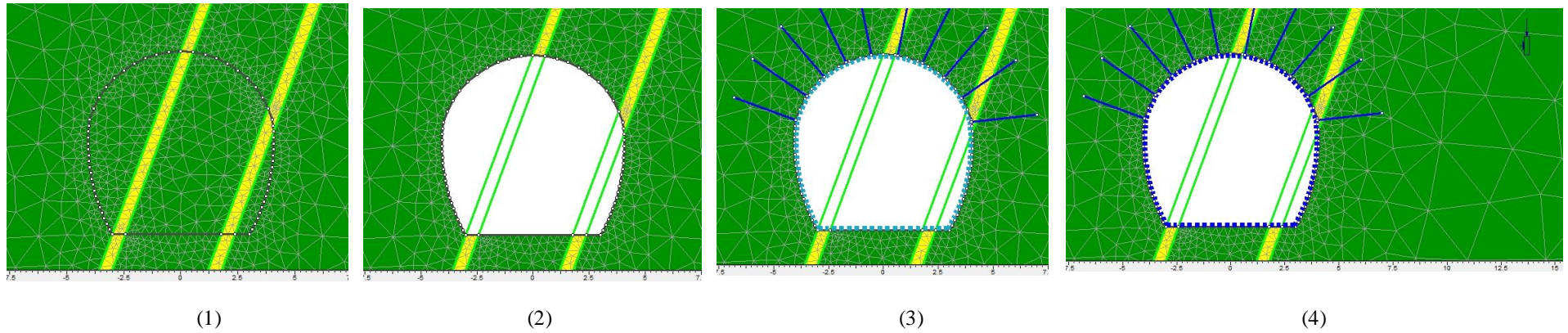
Lampiran 2



Gambar 2.1 Headrace Tunnel Chainage 80-120 m

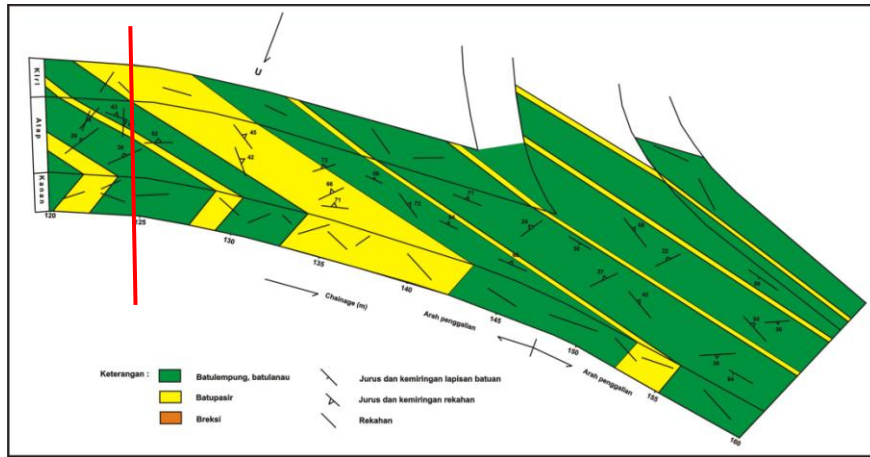


Gambar 2.2 Model 2 Kelas III b

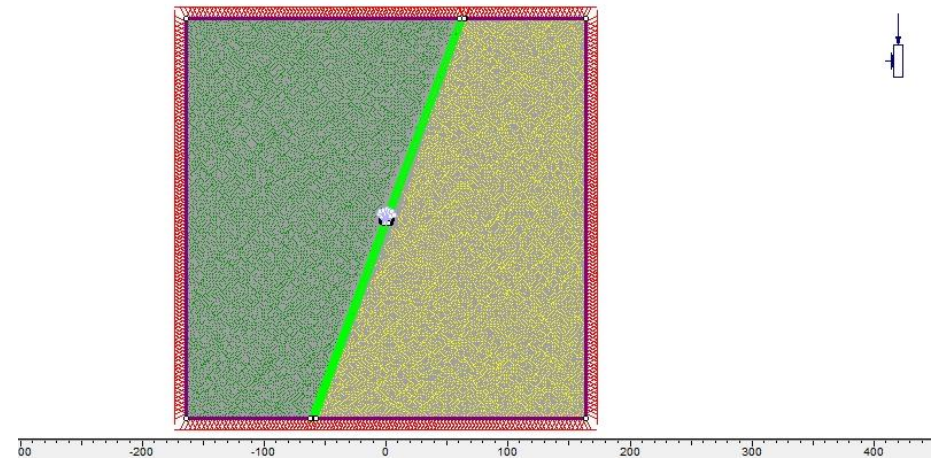


Gambar 2.3 Stage 1-4 Model 2 Kelas III b

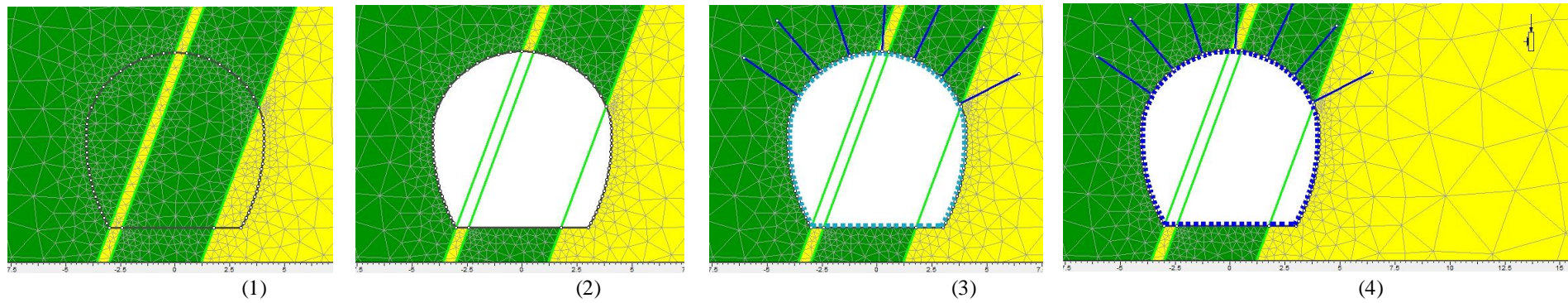
Lampiran 3



Gambar 3.1 Headrace Tunnel Chainage 120-160 m



Gambar 3.2 Model 3 Kelas III a



Gambar 3.3 Stage 1-4 Model 3 Kelas III a

Lampiran 4

Tabel 1 Variasi Tipe Penyangga dan Total *Displacements* pada Kelas Massa Batuan II b

No	Tipe Penyangga					Failure Criteration	Jenis Material	Total Displacements				
	Beton tembak I (mm)	Baut Batuan			Beton Tembak II (mm)			Stages				
		Panjang (m)	Spasi (m)	Jumlah				1	2	3	4	5
1	50	3	1.2	8	100	Mohr Coulomb	Elastic	3.93879e-018 m	0.0028778 m	0.00266825 m	0.00252003 m	0.00240962 m
2	50	3	1.2	10	100	Mohr Coulomb	Elastic	3.93879e-018 m	0.0028778 m	0.00266825 m	0.00252003 m	0.00240952 m
3	50	3	1.5	8	100	Mohr Coulomb	Elastic	3.93879e-018 m	0.0028778 m	0.00266815 m	0.00251993 m	0.00240942 m
4	50	3	1.5	10	100	Mohr Coulomb	Elastic	3.93879e-018 m	0.0028778 m	0.00266795 m	0.00251983 m	0.00240932 m
5	50	3	1.7	10	100	Mohr Coulomb	Elastic	3.93879e-018 m	0.0028778 m	0.00266795 m	0.00251983 m	0.00240942 m
6	50	3	2	10	100	Mohr Coulomb	Elastic	3.93879e-018 m	0.0028778 m	0.00266775 m	0.00251963 m	0.00240922 m
7	50	4	1.2	8	100	Mohr Coulomb	Elastic	3.93879e-018 m	0.0028778 m	0.00266845 m	0.00252033 m	0.00240992 m
8	50	4	1.2	10	100	Mohr Coulomb	Elastic	3.93879e-018 m	0.0028778 m	0.00266845 m	0.00252033 m	0.00240982 m
9	50	4	1.5	8	100	Mohr Coulomb	Elastic	3.93879e-018 m	0.0028778 m	0.00266835 m	0.00252013 m	0.00240962 m
10	50	4	1.5	10	100	Mohr Coulomb	Elastic	3.93879e-018 m	0.0028778 m	0.00266815 m	0.00252003 m	0.00240952 m
11	50	4	1.7	10	100	Mohr Coulomb	Elastic	3.93879e-018 m	0.0028778 m	0.00266815 m	0.00252003 m	0.00240962 m
12	50	4	2	10	100	Mohr Coulomb	Elastic	3.93879e-018 m	0.0028778 m	0.00266785 m	0.00251973 m	0.00240932 m
13	50	3	1.2	8	100	Generalized Hoek-Brown	Plastic	3.81008e-018 m	0.0028858 m	0.00267065 m	0.00252343 m	0.00241802 m
14	50	3	1.2	10	100	Generalized Hoek-Brown	Plastic	3.81008e-018 m	0.0028858 m	0.00267065 m	0.00252343 m	0.00241792 m
15	50	3	1.5	8	100	Generalized Hoek-Brown	Plastic	3.81008e-018 m	0.0028858 m	0.00267055 m	0.00252333 m	0.00241772 m
16	50	3	1.5	10	100	Generalized Hoek-Brown	Plastic	3.81008e-018 m	0.0028858 m	0.00267045 m	0.00252323 m	0.00241772 m
17	50	3	1.7	10	100	Generalized Hoek-Brown	Plastic	3.81008e-018 m	0.0028858 m	0.00267045 m	0.00252323 m	0.00241782 m
18	50	3	2	10	100	Generalized Hoek-Brown	Plastic	3.81008e-018 m	0.0028858 m	0.00267025 m	0.00252303 m	0.00241752 m
19	50	4	1.2	8	100	Generalized Hoek-Brown	Plastic	3.81008e-018 m	0.0028858 m	0.00267095 m	0.00252373 m	0.00241832 m
20	50	4	1.2	10	100	Generalized Hoek-Brown	Plastic	3.81008e-018 m	0.0028858 m	0.00267095 m	0.00252373 m	0.00241822 m
21	50	4	1.5	8	100	Generalized Hoek-Brown	Plastic	3.81008e-018 m	0.0028858 m	0.00267075 m	0.00252343 m	0.00241792 m
22	50	4	1.5	10	100	Generalized Hoek-Brown	Plastic	3.81008e-018 m	0.0028858 m	0.00267065 m	0.00252343 m	0.00241792 m
23	50	4	1.7	10	100	Generalized Hoek-Brown	Plastic	3.81008e-018 m	0.0028858 m	0.00267065 m	0.00252343 m	0.00241802 m
24	50	4	2	10	100	Generalized Hoek-Brown	Plastic	3.81008e-018 m	0.0028858 m	0.00267035 m	0.00252313 m	0.00241772 m

Lampiran 5

Tabel 2 Variasi Tipe Penyangga dan Total *Displacements* pada Kelas Massa Batuan III b

No	Tipe Penyangga					Failure Criterion	Jenis Material	Total Displacements				
	Beton tembak I (mm)	Baut Batuan			Beton Tembak II (mm)			Stages				
		Panjang (m)	Spasi (m)	Jumlah				1	2	3	4	5
1	120	3	1.2	10	200	Mohr Coulomb	Elastic	1.45317e-017 m	0.00872122 m	0.00716311 m	0.00667132 m	0.00625041 m
2	120	3	1.5	10	200	Mohr Coulomb	Elastic	1.45317e-017 m	0.00872122 m	0.00716211 m	0.00667032 m	0.00624932 m
3	120	3	2	10	200	Mohr Coulomb	Elastic	1.45317e-017 m	0.00872122 m	0.00716111 m	0.00666962 m	0.00624892 m
4	120	4	1.5	10	200	Mohr Coulomb	Elastic	1.45317e-017 m	0.00872122 m	0.00716331 m	0.00667132 m	0.00625032 m
5	120	5	1.5	10	200	Mohr Coulomb	Elastic	1.45317e-017 m	0.00872122 m	0.00716431 m	0.00667232 m	0.00625112 m
6	120	6	1.5	10	200	Mohr Coulomb	Elastic	1.45317e-017 m	0.00872122 m	0.00716521 m	0.00667312 m	0.00625182 m
7	120	3	1.2	10	200	Generalized Hoek-Brown	Plastic	0.00497639 m	0.022262 m	0.0113384 m	0.010706 m	0.0102835 m
8	120	3	1.5	10	200	Generalized Hoek-Brown	Plastic	0.00497639 m	0.022262 m	0.0113325 m	0.0105006 m	0.0102396 m
9	120	3	2	10	200	Generalized Hoek-Brown	Plastic	0.00497639 m	0.022262 m	0.0112794 m	0.0107504 m	0.0104945 m
10	120	4	1.5	10	200	Generalized Hoek-Brown	Plastic	0.00497639 m	0.022262 m	0.0111804 m	0.0106719 m	0.0102 m
11	120	5	1.5	10	200	Generalized Hoek-Brown	Plastic	0.00497639 m	0.022262 m	0.0113055 m	0.0107613 m	0.0106109 m
12	120	6	1.5	10	200	Generalized Hoek-Brown	Plastic	0.00497639 m	0.022262 m	0.0115111 m	0.0104156 m	0.010425 m

Lampiran 6

Tabel 3 Variasi Tipe Penyangga dan Total *Displacements* pada Kelas Massa Batuan III a

No	Tipe Penyangga					Failure Criterion	Jenis Material	Total Displacements				
	Beton tembak I (mm)	Baut Batuan			Beton Tembak II (mm)			Stages				
		Panjang (m)	Spasi (m)	Jumlah				1	2	3	4	5
1	150	3	1.5	7	200	Mohr Coulomb	Elastic	1.26587e-017 m	0.0108222 m	0.00829211 m	0.00800747 m	0.00748321 m
2	150	3	1.5	10	200	Mohr Coulomb	Elastic	1.26587e-017 m	0.0108222 m	0.00829129 m	0.00800654 m	0.00748176 m
3	150	3	2	10	200	Mohr Coulomb	Elastic	1.26587e-017 m	0.0108222 m	0.00829016 m	0.00800562 m	0.00748108 m
4	150	4	1.5	10	200	Mohr Coulomb	Elastic	1.26587e-017 m	0.0108222 m	0.00829259 m	0.00800774 m	0.00748286 m
5	150	5	1.5	10	200	Mohr Coulomb	Elastic	1.26587e-017 m	0.0108222 m	0.00829369 m	0.00800884 m	0.00748376 m
6	150	3	1.5	7	200	Generalized Hoek-Brown	Plastic	0.0328014 m	0.0691253 m	0.042177 m	0.0412034 m	0.0409282 m
7	150	3	1.5	10	200	Generalized Hoek-Brown	Plastic	0.0328014 m	0.0691253 m	0.0421902 m	0.0411194 m	0.0409678 m
8	150	3	2	10	200	Generalized Hoek-Brown	Plastic	0.0328014 m	0.0691253 m	0.0423253 m	0.0413519 m	0.0409662 m
9	150	4	1.5	10	200	Generalized Hoek-Brown	Plastic	0.0328014 m	0.0691253 m	0.042209 m	0.0411297 m	0.0409396 m
10	150	5	1.5	10	200	Generalized Hoek-Brown	Plastic	0.0328014 m	0.0691253 m	0.04224 m	0.0411573 m	0.0409971 m

Lampiran 7

Tabel 4 Perbandingan Data Lab dan RocLab

No	Kelas Massa Batuan	Litologi	RocLab				Data Lab				
			Failure Criteration				Failure Criteration				
			Hoek-Brown		Mohr-Coulomb		Hoek-Brown		Mohr-Coulomb		
1	II b	Batupasir	mb	0.867	cohesion	0.135 Mpa	mb	0.17	cohesion	3.4 Mpa	
			s	0.0005	friction angle	47.6 deg	s	0.004	friction angle	53 deg	
			a	0.506			a	0.5			
2	III b	Batupasir	mb	0.478	cohesion	0.122 Mpa	mb	0.12	cohesion	2.2 Mpa	
			s	0.0001	friction angle	33.33	s	0.001	friction angle	52.5 deg	
			a	0.511			a	0.5			
			Batulempung	mb	0.112	cohesion	0.043 Mpa	mb	0.12	cohesion	0.64 Mpa
				s	0.0001	friction angle	14.97 deg	s	0.001	friction angle	52 deg
				a	0.511			a	0.5		
3	III a	Batupasir1	mb	0.478	cohesion	0.147 Mpa	mb	0.12	cohesion	2.2 Mpa	
			s	0.0001	friction angle	31.11 deg	s	0.001	friction angle	52.5 deg	
			a	0.511			a	0.5			
			Batupasir2	mb	0.867	cohesion	0.24 Mpa	mb	0.17	cohesion	3.4 Mpa
				s	0.0005	friction angle	40.09 deg	s	0.004	friction angle	53 deg
				a	0.506			a	0.5		
			Batulempung	mb	0.112	cohesion	0.05 Mpa	mb	0.12	cohesion	0.64 Mpa
				s	0.0001	friction angle	13.53 deg	s	0.001	friction angle	52 deg
				a	0.511			a	0.5		

Lampiran 8

Tabel 5 Variasi Tipe Penyangga dan Total Displacements pada Kelas Massa Batuan

No	Kelas Massa Batuan	Tipe Penyangga					Failure Criteration	Jenis Material	Total Displacements				
		Beton tembak I (mm)	Baut Batuan			Beton tembak II (mm)			Stages				
			Panjang (m)	Spasi (m)	Jumlah				1	2	3	4	5
1	II b	50	3	1.2	10	100	Mohr Coulomb	Elastic	3.93879e-018 m	0.0028778 m	0.00266825 m	0.00252003 m	0.00240952 m
2	II b	50	3	1.2	10	100	Generalized Hoek-Brown	Plastic	3.81008e-018 m	0.0028858 m	0.00267065 m	0.00252343 m	0.00241792 m
3	III a	150	3	1.5	7	200	Mohr Coulomb	Elastic	1.26587e-017 m	0.0108222 m	0.00829211 m	0.00800747 m	0.00748321 m
4	III a	150	3	1.5	7	200	Generalized Hoek-Brown	Plastic	0.0328014 m	0.0691253 m	0.042177 m	0.0412034 m	0.0409282 m
5	III b	120	3	1.2	10	200	Mohr Coulomb	Elastic	1.45317e-017 m	0.00872122 m	0.00716311 m	0.00667132 m	0.00625041 m
6	III b	120	3	1.2	10	200	Generalized Hoek-Brown	Plastic	0.00497639 m	0.022262 m	0.0113384 m	0.010706 m	0.0102835 m

Tabel 6 Variasi Tipe Penyangga dan Total Displacements pada Kelas Massa Batuan berdasarkan Roclab

No	Kelas Massa Batuan	Tipe Penyangga					Failure Criteration	Jenis Material	Total Displacements				
		Beton tembak I (mm)	Baut Batuan			Beton tembak II (mm)			Stages				
			Panjang (m)	Spasi (m)	Jumlah				1	2	3	4	5
1	II b	50	3	1.2	10	100	Mohr Coulomb	Elastic	3.93879e-018 m	0.0028778 m	0.00266825 m	0.00252003 m	0.00240952 m
2	II b	50	3	1.2	10	100	Generalized Hoek-Brown	Plastic	3.81008e-018 m	0.00317122 m	0.00287763 m	0.0027338 m	0.0026297 m
3	III a	150	3	1.5	7	200	Mohr Coulomb	Elastic	1.26587e-017 m	0.0108222 m	0.00829211 m	0.00800747 m	0.00748321 m
4	III a	150	3	1.5	7	200	Generalized Hoek-Brown	Plastic	0.0363881 m	0.112795 m	0.0474096 m	0.0455838 m	0.0450024 m
5	III b	120	3	1.2	10	200	Mohr Coulomb	Elastic	1.45317e-017 m	0.00872122 m	0.00716311 m	0.00667132 m	0.00625041 m
6	III b	120	3	1.2	10	200	Generalized Hoek-Brown	Plastic	0.00662543 m	0.040068 m	0.0126241 m	0.0118771 m	0.0108771 m