**PEMODELAN TEROWONGAN PADA BATUAN DENGAN**

**METODE FINITE ELEMENT : Studi Kasus Terowongan Diversion Tunnel Rencana Bendungan Jambu Aye, Nangro Aceh Darusalam**

**Junaida Wally1), Muhammad Riza2), Y. Djoko Setiyarto 3)**

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Komputer Indonesia

Jl. Dipatiukur No. 112-116, Bandung, 40132, Indonesia

E-mail: [junaidawally@yahoo.com1](mailto:junaidawally@yahoo.com1))

diterima: 9 Februari 2020

dipublikasi: 6 April 2020

**ABSTRAK**

*Dalam pemodelan suatu terowongan pada batuan sangat penting untuk memperhatikan kondisi geologi dari lokasi terowongan tersebut. Sebab pada batuan terdapat bidang diskontinu yang akan mempengaruhi model suatu terowongan. Dimana salah satunya berupa joint. Joint merupakan bagian lemah dari batuan. Dengan adanya joint maka displacement yang terjadi di sekitar terowongan menjadi lebih besar.*

*Pada studi ini analisis dilakukan menggunakan metode empirik, dari metode empirik akan diperoleh rekomendasi penggalian dan penyangga yang sesuai dengan kondisi geologi. Kemudian hasil tersebut akan diverifikasi dengan menggunakan metode finite element PHASE2 dan Plaxis 3D Tunnel. Pemodelan tanah/batuan yang digunakan untuk PHASE2 adalah Mohr Coulumb dan Hoek and Brown dengan mempertimbangkan joint maupun tidak ada joint. Pemodelan tanah/batuan untuk Plaxis 3D Tunnel adalah Mohr Coulumb. Pada Metode finite element terowongan akan ditinjau untuk kondisi unsupport dan support.*

*Nilai yang akan dianalisis pada metode numerik adalah besarnya deformasi yang terjadi di sekitar terowongan, tegangan yang bekerja di sekitar terowongan, bending moment dan shear force yang bekerja pada shotcrete.*

***Kata kunci****: Terowongan pada batuan, joint, metode empirik, metode finite element, shotcrete.*

# 1. Pendahuluan

Terowongan adalah salah satu infrastruktur yang penting bagi peradaban modern. Pada umumnya bangunan terowongan dibuat untuk keperluan transportasi yang terhalang oleh kondisi alam yang ada, misalnya batuan yang berlapis dan bersendi yang merupakan titik lemah dalam mendesain suatu terowongan.

Studi tentang terowongan juga terus berkembang dari waktu ke waktu sehingga melahirkan teori serta metode untuk merencanakan dan mengkonstruksi terowongan. Namun demikian, masih sering dijumpai kegagalan pada terowongan dan gangguan pada lingkungan di sekitarnya. Sehingga masih dibutuhkan pemahaman yang lebih mendalam akan kondisi batuan/tanah, kondisi geologi, dan aspek-aspek perpindahan gaya yang terjadi di dalam batuan/tanah akibat penggalian atau pembuatan terowongan. Desian terowongan yang sering digunakan adalah desain terowongan dengan metode empirik. Namun seiring perkembangan zaman terciptalah program komputer finite element yang dapat digunakan untuk melakukan pengecekan ulang berdasarkan hasil metode empirik.

Maksud penelitian ini adalah untuk memodelkan terowongan pada batuan dengan beberapa metode analisis antara lain metode empiris dan metode numerik sehingga mencapai sasaran dan tujuan dari pembuatan terowongan tersebut. Tujuan dari pemodelan terowongan ini adalah untuk membuat suatu model terowongan yang sesuai dengan kondisi geologi batuan serta tegangan yang terjadi pada batuan. Sistematika pembahasaa:

* Dasar teori Mengumpulkan berbagai teori mengenai mekanika batuan, struktur geologi, terowongan serta metode analisis dan desain terowongan.
* Pengumpulan data batuan Data ini berupa parameter dari batuan yang digunakan untuk mendesain terowongan. Nilai-nilai tersebut didapat dari tes di lapangan dan di laboratorium. Dari lapangan pengujian pada batuan yang umumnya dilakukan adalah pengujian RQD dan *Insitu Permeability Test*. Sedangkan pengujian yang dilakukan di laboratorium adalah uji Kuat Tekan Bebas (*Unconfined Compressive Strength*), uji Triaxial, uji Kuat Tarik-uji Brazilia (*Indirect Tensile Strength Test*). Dari berbagai macam pengujian tersebut akan dihasilkan berbagai paremeter tanah. Terakhir adalah pengumpulan korelasi–korelasi parameter batuan.
* Penentuan parameter desain Setelah dihasilkan berbagai macam parameter batuan, selanjutnya dilakukan penentuan parameter batuan desain yang berguna dalam melakukan input parameter pada program komputer PHASE2 dan Plaxis 3D Tunnel untuk model Morh-Coulumb dan Hoek and Brown. Paremeter yang akan diinput untuk model Morh-Coulumb adalah berat isi bataun , berat isi jenuh batuan , kohesi (c), sudut geser , sudut dilatansi , modulus young (E), angka poisson , Sedangkan parameter yang akan diinput untuk model Hoek adn Brown adalah *geological stength index* (GSI), konstanta m untuk potongan batuan utuh , konstanta m untuk massa batuan , *uniaxial compressive strength* , berat isi batuan , berat isi jenuh batuan , faktor *disturbance* (D), sudut dilatansi , modulus young (E). Pada studi ini parameter batuan desain diperoleh dari data studi terdahulu.

# 2. Dasar Teori

## 2.1 Analisis desain terowongan pada bataun menggunakan metode empiric

### 2.1.1 Terzaghi‟s Rock Mass Classification.

Klasifikasi Rock Load Terzaghi dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 1** Klasifikasi Rock Load Terzaghi (1970)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| No | Rock Condition | RQD | Rock Load  Hp (ft) | Remarks |
| 1 | Hard and Intact | 95-100 | Zero | Same as Terzhagi  (1946) |
| 2 | Hard stratified or | 90-99 | 0 - 0.5 B | Same as Terzhag i  (1946) |
| 3 | tvlass we,  modcratclly joined | 8395 | U-ñ25B | SamcasTczhagi  (1946) |
| 4 | Moderatelly  blocky and searny | 75-85 | 0.25 B - 0.20  (B \* Ht) |  |
| 5 | Very blocky and | 30-75 | (0.2—0 0.60) | Types 4,5 and 6 reduced |
|  | searny |  | (B +Ht) | by about 50% from |
|  |  |  |  | Terzhagi value because |
| 6 | Completely | 3-30 | (0.6—0 1.10) |  |
|  | crushed but |  | (B +Ht) |  |
|  | Sand and gravel |  | (g p )  t | (Tcrzha gi, 1946; |
|  |  |  |  |  |
|  | Squeez Ing rock,  moderate depth | NA | ( 1 . 10— 2. 10)  (B +Ht) | Same as Terzhag i  (1946) |
|  | greath depth | C  NA | (2.10 4.50)  (B +Ht) | Same as Tcrxhag i  (1946) |
| 9 | Swcl ling rock | C;  NA | Up to 250 It  irrespective    (B +Ht) | Samc as Tcrzhag i  (1946) |
| As modified by Deere (1 970)  b  Rock load Hp in feet of rock on roof of support in tunnel with widht B (ft) and height Ht (s) at depth »f more than 1.5 (B+ Ht) | | | | |

Tekanan penyangga dapat dihitung dengan persamaan berikut:

(pers.1)

Dimana:

* : unit weight (kN/m³)

Hp : rock load (m)

### 2.1.2 Klasifikasi Stand-Up Time.

Klasifikasi yang diperkenalkan oleh Laufer pada tahun 1958 ini digunakan untuk mengetahui stand up time yang dibutuhkan untuk suatu konstruksi terowongan maka diperlukan klasifikasi Rock Mass Rating (RMR).

### 2.1.3 Rock Quality Designing Index (RQD)

Pada tahun 1967 D.U. Deere memperkenalkan Rock Quality Designation (RQD) sebagai sebuah petunjuk untuk memperkirakan kualitas dari massa batuan secara kuantitatif.

(pers.2)

Hubungan antara nilai RQD dan kualitas dari suatu massa batuan diperkenalkan oleh Deere (1967) seperti tabel berikut ini:

**Tabel 2** Hubungan RQD dan kualitas massa batuan (Deere, 1967)

|  |  |
| --- | --- |
| RQD (%) | Klasifikasi Batuan |
| < 25 | Sangat Jelek (very poor) |
| 25 — 50 | Jelek (poor) |
| 50 — 75 | Sedang (fair) |
| 75 — 90 | Baik (good) |
| 9—0 100 | Sangat Baik (excellent) |

### 2.1.4 Structure Rating (RSR).

Ada 2 faktor pada konsep RSR yang harus diperhatikan sehubungan dengan perilaku massa batuan di dalam terowonganyaitu Parameter geologi dan Parameter konstruksi. Parameter tersebut dikelompokan atas 3 parameter dasar yaitu A B dan C. Nilai RSR untuk tiap seksi terowongan diperoleh dengan menjumlahkan bobot nilai angka untuk tiap parameter. RSR mencerminkan kualitas massa batuan dengan kebutuhan akan penyangga

(pers.3)

Dengan nilai maksimum 100. Klasifikasi Rock Mass Rating (RMR) hanya dapat digunakan untuk terowongan berbentuk lingkaran dengan diameter maksimal 7.3 m.

### 2.1.5 Rock Mass Rating System (RMR).

Sistem klasifikasi massa batuan RMR menggunakan enam parameter berikut ini dimana rating setiap parameter dijumlahkan untuk memperoleh nilai total dari RMR

* Kuat tekan batuan utuh (Strength of intact rock material)
* Rock Quality Designation (RQD).
* Jarak antar (spasi) kekar (Spacing of discontinuities)
* Kondisi kekar (Condition of discontinuities)
* Kondisi air tanah (Groundwater conditions)
* Orientasi Kekar (Orientation of discontinuities)

**Tabel 3** Kekuatan material batuan utuh (Bieniawski, 1989)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | %s) | | .. (..a) | | Rating |
| Sangat kuat sekali (cxcoptionally  strong) | ›250 | | > 10 | | 15 |
| Sangat kuat (very strong) | I 00— 250  kg | gg | | —4 | IO | 12 |
| Kuat (strong) |  | | 2 —4 | |  |
| Sedang (average) | 2—5 | 50 | —1 | 2 | 4 |
| Lemah (weak) | —5 | 25 | Penggunaan  UCS lebih d ianjurkan | | 2 |
| Sangat lemah (very weak) | —i | 5 |  |
| Sangat Lemah Seka Ii (extremely  weak) | < i | |  |

**Tabel 4** Rock Quality Designation (RQD) (Bieniawski, 1989)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| RQD (%) | Kualitas Batuan | Rating |
| < 25 | Sangat jelek (very poor) | 3 |
| 25 — 50 | Jelek (poor) | 8 |
| 5—0 75 | Sedang (lair) | 13 |
| 75 90 | Baik (good) | 17 |
| 9—0 100 | Sangat baik (excellent) | 20 |

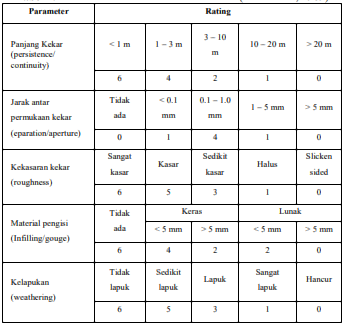
**Tabel 5** Jarak antar (spasi) kekar (Bieniawski, 1989)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Deskripsi | Spa K)ekar | Rating |
| Sangat lebar (very wide) |  | 20 |
| Lebar (wide) | 0.6 — 2 | 15 |
| Sedang (moderate) | 0.2 0.6 | 10 |
| Rapat (close) | 0.00—6 0.2 | 8 |
| Sangat rapat (very close) | < 0.006 | 5 |

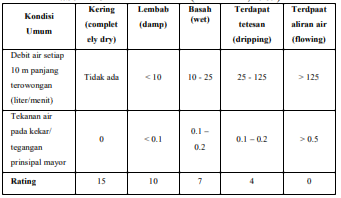
**Tabel 6** Penggolongan dan pembobotan kekasaran menurut Bienawski (1976)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Kekasaran Permukaan | Deskripsi | Pembobotan |
| Sangat kasar  (very rough) | Apabila diraba permukaan sangat tidak rata,  membentuk punggungan dengan sudut terhadap bidang datar mendekati vertikal, |  |
| Dasar *(rough)* | Bergelombang, permukaan tidak rata,  butiran pada permukaan terlihat jelas, permukaan kekar terasa kasar. | 5 |
| Sedikit kasar  *(.slightly rough)* | Butiran permukaan terlihat jelas, dapat  dibedakan, dan dapat dirasakan apabila  diraba. |  |
| Halus *(smoolh)* | Permukaan rata dan terasa halus bila d iraba | 1 |
| Licin berlapis  *(.s’liken.rided)* | Permukaan terlihat mengkilap | 0 |

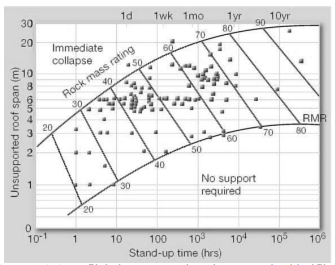
**Tabel 7** Panduan Klasifikasi Kondisi Kekar (Bieniawski, 1989)



**Tabel 8** Kondisi air tanah (Bieniawski, 1989)



Klasifikasi RMR dapat menentukan stand up time yang dibutuhkan, untuk mengetahui stand up time berikut adalah grafik hubungan stand up time, span dan klasifiksai RMR.



**Gambar 1** Grafik hubungan stand up time, span dan klasifiksai RMR (after Bieniawski 1989)

Untuk mengetahui besarnya tekanan penyangga berdasarkan metode RMR dapat dihitung degan menggunakan persamaan Beaniawski (1974) berikut ini.

(pers.4)

Dimana:

w = width of opening (m)

γ = unit weight of overbuden (kN/m³)

### 2.1.6 Rock Mass Quality (Q) System

*Rock Mass Quality (Q) System* atau disebut juga sebagai *Tunneling Quality Index* pertama kali diusulkan oleh Barton, Lien dan Lunde pada tahun 1974 di Norwegian Geotechnical Institute (NGI) sehingga disebut juga NGI Classification System. Qsystem merupakan fungsi dari enam parameter yang dinyatakan dengan persamaan berikut:

(pers.5)

Dimana:

*RQD = Rock Quality Designation*

*Jn = Joint set number*

*Jr = Joint roughness number*

*Ja = Joint alteration number*

*Jw = Joint water reduction factor*

*SRF = Stress Reduction Factor*

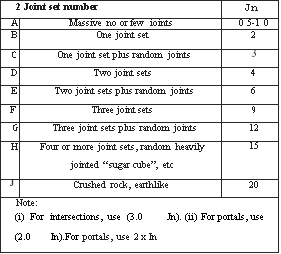
**Tabel 9** RQD-values and volumetric jointing (Barton et al. 1974)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **1 RQD (Rock Quality Designation)** | | | RQD |
| A | Very poor | (> 27 joints per m') | 0-25 |
| B | Poor | (20-27 joints per in’) | 25-50 |
| C | Fair | (13-19 joints per in’) | 50-75 |
| D | Good | (8-12 joints per m’) | 75-90 |
| E | Exccllcnt | (0-7 joints per m’) | 90-100 |

Note:

(i) Where RQD is reported or measured as < 10 (including 0), a nominal value of 10 is used to evaluate Q. (ii) RQD interval of 5, i.e., 100, 95, 90, etc., are sufficiently

**Tabel 10** Jn-values (Barton et al. 1974)



**Tabel 11** Jr – values (Barton et al. 1974)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 3 Joint Roughness Number | | Jr |
| 1. *Rock-w'all contac’t, ancl* 2. back-w'a// *contact* 6eJure / f7 cm o/ .clear inr›vemenf | | |
| A | Discontinuous joints | 4 |
| |3 | Roughorlnegular, unduaing | 3 |
| C | Smooth, undulating |  |
| D | Slickensided, undulating | 1.5 |
| E | Rough, irregular, planar | 1 .5 |
| F | Smooth, planar |  |
| G | Slickensided, planar | 0.5 |
| Note:  (i) Descriptions refer to small and intermediate scale features, in that order. | | |
| *e) No roc k-i+'all contac’t nhyn shyarecl* | | |
| H | Zone containing clay minerals thick enough to prevent  rock-wall contact when sheared |  |
|  | Sandy, gravelly or crushed zone thick enough to  prevent rock-wa II contact |  |
| Note:  (ii) Add 1.0 if the mean spacing of the relevant joint set > 3 in. (iii) Jr  0.5 can be used  for planar slickensided joints having lineations, provided the lineations are oriented for minimum strength. 4. Joint Alteration Numb | | |

**Tabel 12** Ja —values (Barton et al. 1974)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 4 Joint Alteration Number | | Qr  approx. | Ja |
| *a) Rock-wall ‹-ontoct (no rninc•ral filling.s, only coatings)* | | | |
| A | Tightly healed, hard, non-  softening, impermeable filling, i.e., quartz or epidote. |  | 0.75 |
| B | Unaltered joint walls, surface | 25°-35° | I |
|  | Slightly altered joint walls. Non-  softening mineral coatings; sandy particles,  clay-free disintegrated rock, etc. | 25°-30° |  |
| D | Silty or sandy clay coatings, small | 20°-25° |  |
| E | Softening or low friction clay  mineral coatings, i.e., kaolinite or mica. Also chlorite, tale gypsum, | 8°-16° | 4 |
| b | Rock-++all contact hc•foi-c• 1 II cm .shc•ar | Uhin mineral filling | .s) |
| F | Sandy particles, clay-free | 25°-30° | 4 |
| G | Strongly over-consolidated, non-  softening, clay mineral  fillings (continuous, but <5mm | 16°-24° | 6 |
| H | Medium or low over-  consolidation, softening, clay | 12°—16° |  |
| J | Swelling-clay fillings, i.e.,  montmorillonite (continuous, but  <5mm thickness).  Value of I depends on percent of | 6°-12° | S— 1 2 |
| c | No rork- vv’all contact when sheared (th | ick niineral fillings | ) |
| K | Zones or bands of disintegrated | I›°-24° |  |
| L | or crushed rock and clay | 6°-24° |  |
| M | (see G, H, I for description of clay | 6°-24° | 8-12 |
| N | Zones or bands of silty- or sandy-  clay, small clay fraction (non-softening) | 6°-24° | 5 |
| O | Thick, continuous zones or | 6°-24°° | 10-13 |
| P | bands of clay (see G, H, and | 6°-24° | 10-13 |
| R | I for clay condition description) | G°-24° | 13-20 |

**Tabel 13** Jw— values (Barton et al. 1974)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 5 **Joint** Water **Reduction** Factor | | **Water pressure** | | Jw |
| A | Dry excavation or minor inflow, i.e., < 5  1/min locally | < 1 (kg/cm’) | | 1.0 |
| B | Medium inflow or pressure, occasional  outwash ofjoint fi llings | —1 | 25 | 0.66 |
|  | Large inflow or high pressure in  competent rock with unfilled joints | 2—5 | 10 | 0.5 |
|  | Large inflow or high pressure,  considerable outwash ofjoint fillings | 2—5 | 10 |  |
| E | Exceptionally high inflow or water  pressure at blasting, decaying with time |  | | 0.2-0.1 |
|  | Exceptionally high inflow or water  pressure continuing without noticeable decay | > 10 | | 0.1-  0.05 |
| Note:   1. Factors C to F are crude estimates. Increase Jw if drainage measures are insta IIed. 2. Special problems caused by ice formation are not considered. | | | | |

Dimensi ekivalen merupakan fungsi dari ukuran dan kegunaan dari galian, didapat dengan membagi span, diameter atau tinggi dinding galian dengan harga yang disebut *Excavation Support Ratio* (ESR).

(pers.5)

Panjang L dari rockbolt ditentukan dari lebar penggalian (B) dan dari nilai ESR melalui persamaan:

(pers.6)

Grimstad dan Barton (1993) memberikan hubungan antara nilai Q dengan tekanan penyangga atap permanen Proofmelalui persamaan :

(pers.7)

Berikut adalah table Stress Reduction Factor

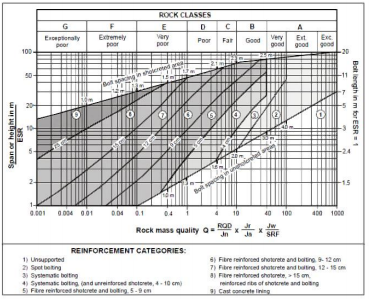
**Tabel 14** SRf-values (Barton et al. 1974)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 6. Stress **Reduction Factor** | | **SRF** |
| ***(a) Weakne.sS zones intersecting excavation, which may ca*u*se***  ***loosening of rock mass when tunnel is excavated*** | | |
| A | Multiple occurrences of weakness zones containing  clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock (any depth) | i o |
| B | Single weakness zone containing clay or chemically  disintegrated rock (depth of excavation < 50 m) | 5 |
|  | Single weakness zone containing clay or chemically  disintegrated rock (depth of excavation > 50 m) |  |
| D | Multiple shear zones in competent rock (clay-free)  (depth of excavation < 50 m) | 7.5 |
| E | Single shear zone in competent rock (clay-free) (depth  of excavation < 50 m) |  |
| F | Single shear zone in competent rock (clay-free) (depth  of excavation > 50 in) | 2 5 |
| G | Loose, open joint, heavily jointed (any depth) | 5 |
| Note: (i) Reduce SRI value by 25-50\*o if the relevant shear zones only  influence but not intersect the excavation. | | |

**Tabel 15** ESR-values (Barton et al. 1974)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 7 Type of excavation | | ESR |
| A | Temporary mine openings, etc. | ca. 3-5 |
| B | Vertical shafts\*: i) circular sections  ii) rectangular/square section  \* Dependant of purpose. May be lower than given  values. | *ca.* 2.5  *ca.* 2.0 |
| Permanent mine openings, water tunnels for hydro  power (exclude high pressure penstocks) water supply tunnels, pilot tunnels, drifts and headings for large openings. | |  |
| D | Minor road and railway tunnels, surge chambers,  access tunnels, sewage tunnels, etc. | 1.3 |
| E | Power houses, storage rooms, water treatment  plants, major road and railway tunnels, civil defence chambers, portals, intersections, etc. | 1.0 |
| Underground nuclear power stations, railways  stations, sports and public faci1itates,factories, etc. | |  |
| Very important caverns and underground openings  with a long lifetime, 100 years, or without access for maintenance. | | 0.5 |

Rekomendasi penyangga ditentukan melalui grafik yang di berikan oleh Grimstad dan Barton (1993) seperti yang ditunjukkan oleh gambar di bawah ini :



**Gambar 2** Grafik Penentuan Rekomendasi Penyangga Berdasarkan Q-System (After Grimstad & Barton, 1993)

## 2.2 Analisis desain terowongan pada bataun menggunakan metode enumerik:

Metode Elemen hingga adalah metode numerik untuk memperoleh pemecahan persoalan dengan cara pendekatan dengan menggunakan elemen diskrit. Metode elemen hingga memecahkan persoalan elastisitas dengan membagi kontinum menjadi elemen diskrit yang jumlahnya terhingga atau terbatas dan kemudian menyatakan besaran yang akan dicari pemecahannya dalam fungsi interpolasi.

Parameter desain yang di input pada kedua program komputer tersebut adalah sebagai berikut:

**Tabel 16** Parameter batuan PHASE2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Parameter | Nilai | | Satuan |
| Batu Lumpur | |
| Material model | Morh  Coulumb | Hoek Brown |
| Initial Element  Loading | Field Stress  Only | Field Stress  Only |  |
| Unit Weight | 0.01832 | 0.01832 | MN/m\* |
|  | Elastic Properti | es |  |
| Mater ia1 Type |  |  |  |
| Young's Modulus | 3990 | 3990 | TMpa |
| Poisson's Ratio | 0.15 | 0.15 |  |
|  | Strength Parame | ter |  |
| Material Type | Elastic | Elastic |  |
| Tensile Strenght | 5 |  | Mpa |
| Friction Angle | 39.5 |  |  |
| Cohesi | 0.343 |  | Mpa |
| Intac UCS |  | 1.61 | Mpa |
| m Parameter |  | 0.00 |  |
| s Parameter |  | 0.00001 |  |

**Tabel 17** Parameter batuan Plaxis 3D Tunnel

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Parameter | Nama | Batu  Lumpur | Satuan |
| Matcrial model | Modcl | Morh-  Coulumb |  |
| Type of material behaviour | Type | Drained |  |
| Soil weight above phr. level | ypp p/ | 18.32 | kN/m’ |
| Soil weight below phr. level |  | 19.9 | kN/m’ |
| Young's modulus (constant) | ypp$. | 3990000 | kN/m° |
| Poisson's ratio |  | 0.15 |  |
| Cohesion (constant) | ref | 342 | kN/m' |
| Friction angle | p | 39.5 |  |
| Dilatancy angle |  | 9.5 |  |
| Tensile strength (tension cut-  off) | TS | 5000 | kN/m° |

# 3. Hasil dan Pembahasan

Adapun data data teknis terowangan adalah Tipe penampang terowongan ialah lingkaran dengan diameter penampang dalam sebesar 8 m. Panjang total terowongan ialah 201.9 m. Elevasi dasar saluran berada dielevasi 22 m Kemiringan dasar saluran 1:200. Konstruksi beton menggunakan beton bertulang tipe K 225 dengan ketebalan lapisan terowongan adalah 1 m.

Data geologinya adalah sebagai berikut:

* Berdasarkan hasil uji penetrasi memberikan SPT N > 50, Hal ini menunjukkan batuan relatif kompak.
* Berdasarkan nilai Lu (Legeon) berkisar 2-15, batuannya bersifat semu lulus-kedap.
* Muka Air rata-rata berada di elevasi +3.12 m, sehingga posisi air tanah adalah terletak diatas sepanjang terowongan.
* Batu lumpur dan batu pasir termasuk dalam jenis batuan sedimen dan merupakan batuan lunak.
* Tingkat pelapukan batuan adalah highly weathered sampai slightly wearthered, umumnya batuan lunak.
* Nilai UCS yang diperoleh dari data studi terdahulu adalah untuk batu pasir dan batu lumpur adalah 37.12 kgf/cm² (3.712 Mpa) dan 16.12 kgf/cm² (1.612 Mpa). Namun setelah melakukan korelasi maka nilai UCS untuk batu pasir dan batu lumpur maka nilai UCS yan digunakan dalam perhitungan adalah sebesar 20 MPa dan 10 MPa.
* Struktur geologi yang dijumpai di daerah sekitar penyelidikan hanya berupa kekar-kekar minor. Sedangkan struktur lipatan yang dijumpai berupa homoklin yaitu kemiringan perlapisan batuan searah yang miring relative ke arah timur laut dengan sudut kemiringan 55° – 60° formasi baong dan formasi keutapang, sedangkan formasi diatasnya (bagian hilir) memiliki kemiringan lebih landai yaitu 35-40° (formasi Seurela). Struktur sesar/patahan yang membahayakan konstruksi tidak dijumpai pada lokasi penyelidikan.
* Pada studi ini tidak terdapat data RQD sehingga berdasarkan jenis batuan yang diketahui maka nilai RQD diasumsikan sebesar 20% - 40%.
* Nilai φr untuk batu lumpur dan batu pasir adalah sebesar 6° dan 12°.

Hasil analisis studi terdahulu:

**Tabel 18** Hasil metode empiris studi terdahulu

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Deskripsi | Hasil Studi Terdahulu | |
| RMR | |
| Kelas Batuan | Poor Rock | Very Poor Rock |
|  |  | Galian |
|  | Galian dilaksanakan | dilaksanakan |
|  | bertahap (top heading | bertahap (top |
| Excavation | dan bench), Panjang | heading dan |
|  | penggalian maksimum | bench), Panjang |
|  | 1.5 in | penggalian |
|  |  | maksimum I .5 m |
| Rock bolts (20 mm diameter, fully grouted): | rockbolt D25 mm L =  4.00 m 15' (transversal); 1.20 m (longitudinal) | rockbolt D25 mm L = 6.00 m 15°  (transversal); 0.60 m (longitudinal) |
| ShOtC£C tC | Penyangga yang digunakan adalah shOtc etel= l5cm dengan wiremesh, | Penyangga yang digunakan adalah shotcrete t = 15 cm dengan wiremesh |
| Steel sets | steel rib I 150.75.5.7 jarak 0.60 m | steel rib I  150.75.5.7 jarak 0.fi0 m |
| Stand Up Time | Stand up time sekitar 4  sampai 20 jam. | Stand up time  sekitar <1 jam  sampai 4 jam. |

Dari metode analisis empiris yang dilakukan diperoleh:

**Tabel 19** Hasil penelitian berdasarkan metode empiris

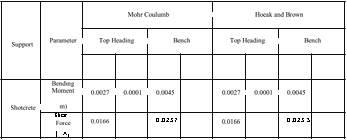
|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Klasifikasi | | | | Hasil | | |
| Terzaghi’s Rock Mass  Classification Batu Lumpur | | | | Kelas batuan adalah “Very fi/ecu *anJ*  *searny completely* dan *crushed but chemically* in/eel”.  Tekanan penyangga adalahh 5,862.4 kg/m' samapi 32,243.2 kg/m'. | | |
| Terzaghi’s Rock Mass  Classification Batu Pasir | | | | Kelas batuan adalah “ key f›/oc *and*  *searny completely* dan *crusheJ but chemically intacl”.*  Tekanan penyangga adalah 6,262.4 kg/m' samapi 34,443.2 kg/m'. | | |
| Klasifikasi Stund Up Time | | | | — Stand up time | 6 jam untuk span 1. 5 | |
| *Rock Mass Rating System (RMR)* Rekomendasi penyangga dan penggalian untuk batu lumpur dan batu pasir, yang membedakan adalah besarnya nilai tekanan penyangga. | | | | Kelas batuan “poor rock”  Excavation : Top heading and bench, 1.0 - 1.5 m maju kedalam top heading. Menginstal support bersamaan dengan excavation, 10 m dari depan.  Rock bolts (20 rum diameter, fully grouted): Systematic bolts 4— 5 m, panjang spasi 1-1,5 m di mahkota dan dinding dengan kawat di mahkota.  Shotcrete: Tebal shotcrete 100-150 mm di mahkota dan 100 mm di sisinya.  Steel sets: Light sampai medium ribs spasi 1,5 m.  Diperoleh besarnya tekanan penyangga untuk batu lumpur adalah 106,9888 kN/m'. | | |
|  | | | | Diperoleh besarnya tekanan penyangga untuk batu pasir adalah 114,2888 kN/m'. | | |
| Rock | Structure | Rating | | — Hanya dapat digunakan untuk  terowongan berbentuk lingkaran | | |
| (RSR) | | | | dengan diameter maksimal 7.3 m | | |
|  | | | | Batuan masuk dalam kelas “ Very | | |
| *R°ck M°ss 0••!•‘‹r t01*  ***System***  Batu Lumpur | | | | Poor Rock”.  Rekomendasi penyangga masuk dalam katagori 5 yaitu fiber  reinforced shotcrete dan bolting, 5-9 | | |
|  | | | | cm, jarak spasi bolt pada daerah | | |
|  | | | | shotcrete adalah 1.7 m dan spasi bolt | | |
|  | | | | pada daerah tanpa shotcrete adalah | | |
|  | | | | 1.3 m. | | |
|  | | | | Panjang rockbolt adalah sebesar 2 m, | | |
|  | | | | Span maksimum tanpa penyangga | | |
|  | | | | adalah sebesar 3.07 m | | |
|  | | | | Tekanan penyangga atap permanen | | |
|  | | | | adalah sebesar 48.29 kN/m' | | |
|  | | | | Kelas Batuan “Poor” | | |
| *Rock Mass Quality (Q)* | | | | Rekomendai penyangga masuk dalam | | |
| ***System***  Batu Pasir | | | | katagori 4, dimana jenis bolt adalah  systematic bolt dengan spasi spasi 2 m pada daerah shotcrete dan spasi 1.5 | | |
|  | | | | m pada derah tanpa shotcret | | |
|  | | | | (unreinforced shotcrete sebesar 4-5 | | |
|  | | | | cm). | | |
|  | | | | Panjang rockbolt adalah sebesar 2 m, | | |
|  | | | | Span maksimum tanpa penyangga | | |
|  | | | | adalah sebesar 3.87 m | | |
|  | | | | Tekanan penyangga atap permanen | | |
|  | | | | adalah sebesar 68.88 kN/m' | | |

Hasil studi terdahulu menggunakan perhitungan empirik yaitu metode Rock Mass Rating System (RMR), Galian dilaksanakan bertahap (top heading dan bench), Panjang penggalian maksimum 1.5 m. Dengan Rockbolt D25mm L = 4.00-6.00 m @ 150 (transversal); 0.60-1.20 m (longitudinal). Penyangga yang digunakan adalah shotcrete t = 15 cm dengan wiremesh. Steel rib I 150.75.5.7 jarak 0.60 m. Stand up time sekitar 1 jam sampai 20 jam.

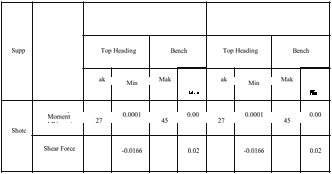
Hasil tugas akhir berdasarkan metode Rock Mass Rating System (RMR) diperoleh Top heading and bench, 1.0 - 1.5 m maju kedalam top heading. Menginstal support bersamaan dengan excavation, 10 m dari depan. Systematic bolts 4 — 5 m, panjang spasi l-1,5 m di mahkota dan dinding dengan kawat di mahkota. Tebal 100-150 mm di mahkota dan 100 mm di sisinya. Steel sets Light sampai medium ribs spasi 1,5 m. Stand up time 6 jam untuk span 1.5 m. Sedangkan berdasarkan metode Q-system rekomendasi penyangga yang diperoleh adalah fiber reinforced shotcrete 4-9 cm. Jenis bolt adalah systematic bolt dengan spasi 1.7-2 m pada daerah shotcrete dan spasi 1.3-1.5 m pada derah tanpa shotcrete. Panjang rockbolt adalah sebesar 2 m, Span maksimum tanpa penyangga adalah sebesar 3.07-3.87 m.

Setelah mengetahui rekomendasi penggalain dan penyangga maka langkah selanjutnya adalah melakukan analisis dengan metode numerik. Dimana rekomendasi penggalian dan penyangga yang akan diinput pada metode numerik adalah top heading and bench untuk metode penggalian dengan panjang penggalian 1 m masuk kedalam top heading. Support yang digunakan adalah shotcrete dengan tebal 15 cm. Selain merupakan input untuk metode numerik, metode empirik juga dapat dibandingkan dengan metode numerik, dimana nilai yang akan dibandingkan adalah nilai tegangan yang terjadi di atas terowongan. Berikut adalah hasil analisis untuk metode numerik.

**Tabel 20** Hasil analisis support PHASE2 dengan support dan tidak memepertimbangkan joint untuk kedua jenis pemodelan tanah



**Tabel 21** Hasil analisis support PHASE2 dengan support dan mempertimbangkan joint untuk kedua jenis pemodelan tanah



Dari hasil analisis diperoleh nilai bending moment shotcrete dan shear force shotcrete untuk pemodelan Mohr Coulumb dan Hoek dan Brown adalah sama. Hal ini seperti hasil analisis yang dilakukan oleh Mazmur Togar, Imam Aschuri, dan Bemby Sunaryo (2012)[1] dalam papernya yang berjudul “Analisis Stabilitas Terowongan Batuan Dengan Metode Elemen Hingga Berdasarkan Teori Mohr-Coulumb & Hoek and Brown” bahwa nilai gaya dalam untuk pemodelan Mohr Coulumb dan Hoek dan Brown pada kondisi ADT (Active Diversion Tunnel) adalah sama. Pada kondisi Max Water Level At Dam, nilai gaya aksial yang dihasilkan oleh pemodelan Mohr Coulumb lebih besar dibandingkan hasil pemodelan material menggunakan Hoek and Brown. Pada kondisi Max Water Level At Dam, nilai gaya geser dan momen yang dihasilkan oleh pemodelan Hoek and Brown lebih besar dibandingkan hasil pemodelan menggunakan Mohr Coulumb.

Perbandingan Pengaruh Support dan Joint Pada Analisis PHASE2

**Tabel 22** Pengaruh support pada PHASE2 dengan tidak mempertimbangkan joint

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Lokasi | Total Displacement (m) | | | |
| Top Heading | | Bench | |
| Unsupport | Support | Unsupport | Support |
| Ri t  wall | i.os i o 4 | 9.00.1 —5 | 1.00x 1 0“ | 7.50x 1 0\*5 |
| Roof | L.1 *5 F 1* 0 | 2.85 x 1 0“ | 2.75a 1 0“ | 2.25x 1 0“ |
| Lcfi  wall | 1 .20x 1 0“ | 1.05x 1 0“ | 1.25 x 1 0“ | 7.50x1 0 |
| ,;, | . i o. i o 5 | u oo. i o 5 | 3.75 1 0“ | 3 50x 1 0“ |

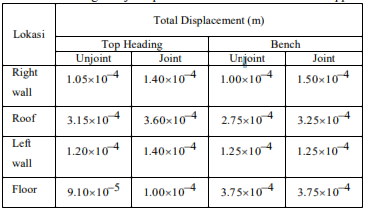
**Tabel 23** Pengaruh support pada PHASE2 dengan mempertimbangkan joint

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Lokasi | Total Displacement (m) | | | |
| Top Heading | | Bench | |
| Unsupport | Support | Unsupport | Support |
| Right  wall | 1.40x 1 0“ | 1.35 x 1 0“ | 1.50x 1 0“ | 1.25x 10“ |
| Roof | 3.60x 1 0“ | 3.30 1 0“ | 3.25 x 1 0“ | 2.75 x1 0“ |
| Left  wall | .40.1 0“ | 1.05 x 1 0“ | 1.25 x 1 0“ | 7.50x l 0°5 |
| “”' | 1 00 1 0” | 9 00 1 0 5 | 3.75 1 0“ | 3.50.10“ |

**Tabel 24** Pengaruh joint pada PHASE2 untuk kondisi support

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Lokasi | Total Displacement (rn) | | | |
| Top Heading | | Bench | |
| Unjoint | Joint | Unjoint | Joint |
| Right | 9.00x 1 0 5 | i .35 1 0“ | 7.50. i o *5* | 1.25 1 0“ |
| Roof | 2.85 X 1 0“ | 3.30x 1 0“ | 2.25 x 1 0“ | 2.75 x 1 0“ |
| Left  wall |  | 1.05 x 1 0“ | 7.50a 1 0\* | 7.50x 1 e—5 |
| “, | 9.00. i 0 | 9.00. i 0 | 3.50 i 0” | 3.50 i 0“ |

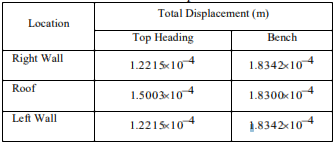
**Tabel 25** Pengaruh joint pada PHASE2 untuk kondisi unsupport



Dari hasil perbandingan diperoleh nilai total displacement dengan mempertimbangkan joint lebih besar (maksimal sama) dibandingkan dengan yang tidak mempertimbangkan joint. Dan nilai nilai total displacement untuk kondisi support lebih kecil (maksimal sama) dibandingkan dengan kondisi unsupport.

Analisis Desain Terowongan dengan Menggunakan Plaxis 3D Tunnel

**Tabel 26** Hasil Analisis total displacemnet Plaxis 3D Tunnel





**Tabel 27** Hasil analisis support Plaxis 3D Tunnel

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Support | Parameter | Top  Heading | Bench |
| Shotcrete | Bending  Moment kNm/m | 1.93 | 3.95 |
| Shear Force  kN/m | -22.52 | -28.01 |

Berdasarkan hasil analisis metode numerik dengan menggunakan program komputer PHASE2 dan Plaxis 3D Tunnel, nilai total displacement yang terjadi tidak melebihi batas izin yaitu sebesar 100 mm (Ramadani, 2012)[2]. Hal ini dapat terjadi karena analisis hanya dilakukan dengan menggunakan satu joint.

Perbandingan Analisis PHASE2 2D dan Plaxis 3D Tunnel

**Tabel 28** Hasil analisis total displacement PHASE2 2D dan Plaxis 3D Tunnel Tanpa Support

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Total Displacement (m) | | | | | |
| Top Heading | | Deviasi | Bench | | Devias |
| PHASE2 | 3D | PHASE2 | 3D |
| R¡gh wa | 0.00009 | 0.00012 | 26.3 | 0.00005 | 0.00018 | 59.1 |
| Roo1‘ | 0 00029 | 0.00015 | 47.3 | 0.00023 | 0.00018 | 18.7 |
| $q$ | 0.00011 | 0.00012 | 14.0 | 0.00008 | 0.00018 | 59. 1 |
|  | 0.00009 | 0.0001 5 | 40. I | 0.00035 | 0.00018 | 47.7 |

Dari hasil berbandingan PHASE2 dan Plaxis 3D Tunnel diperoleh nilai total displacement berdasarkan Plaxis 3D Tunnel lebih besar dibandingkan dengan PHASE2. Nilai gaya dalam untuk bending moment berdasarkan PHASE2 lebih besar dari pada Plaxis 3D Tunnel. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Serkan Ucer (2006) dalam papernya yang berjudul “comparison of 2D and 3D finite element models of tunnel advance in soft ground:a case study on Bolu tunnels”. Namun pada tugas akhir ini diperoleh nilai gaya dalam untuk shear force berdasarkan PHASE2 lebih kecil daripada Plaxis 3D Tunnel sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut tentang gaya dalam pada shotcrete berdasarkan program komputer PHASE2 dan Plaxis 3D Tunnel.

Perbandingan Analisis Metode Emprik dan Numerik

**Tabel 30** Niali tegangan yang terjadi di atas terowongan untuk metode empirik dan metode numerik

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Metode | Metode Empirik | | | Metode Numerik | |
| Ter‘‘gh'’ | R | System | PHASE2 | Plaxis  3D  Tunnel |
| NilaiTegangan di Roof (kN/m’) | sv.49 /d  316.19 | 1 05.52 | 48.29 | 1 11 | 272.fi |

Dari hasil berbandingan nilai tegangan diperoleh nilai untuk metode Q-System jauh lebih kecil dari metode Terzaghi’s, RQD, Q-System, PHASE2, dan Plaxis 3D Tunnel. Hal ini disebabkan karena metode Q-System tidak memperhitungkan berat jenis batuan, namun hanya memperhitungkan nilai dari rating yang dihasilkan berdasarkan data geologi. Sedangkan metode yang lain memperhitungkan nilai dari berat jenis batuan.

# 4. Penutup

## 4.1 Kesimpulan

1. Hasil studi terdahulu menggunakan analisis empirik dengan metode Rock Mass Rating System (RMR) diperoleh galian dilaksanakan bertahap (top heading dan bench), Panjang penggalian maksimum 1.5 m. Dengan Rockbolt D25mm L = 4.00-6.00 m @ 150 (transversal); 0.60-1.20 m (longitudinal). Penyangga yang digunakan adalah shotcrete t = 15 cm dengan wiremesh. Steel rib I 150.75.5.7 jarak 0.60 m. Stand up time sekitar <1 jam sampai 20 jam. Sedangkan pada tugas akhir ini rekomendasi penggalian dan penyangga dari analisis empirik dengan metode Rock Mass Rating System (RMR) dan Q-System adalah metode penggalian top heading and bench dengan panjang penggalian I m masuk kedalam top heading. Support yang digunakan adalah shotcrete dengan tebal 15 cm. Berdasarkan hasil analisis pada tugas akhir diperoleh nilai displacement yang terjadi tidak melebihi batas izin yaitu sebesar 100 mm (Ramadani, 2012). Hal ini dapat terjadi karena analisis hanya dilakukan dengan menggunakan satu joint.
2. Nilai total displacement pada program komputer PHASE2 untuk pemodelan Mohr Coulumb dan Hoek and Brown adalah sama.
3. Nilai gaya dalam berupa bending moment dan shear force pada program komputer PHASE2 untuk pemodelan Mohr Coulumb dan Hoek and Brown adalah sama.
4. Nilai total displacement pada program komputer PHASE2 akan lebih besar jika analisis dilakukan dengan mempertimbangkan joint.
5. Nilai total displacement pada program komputer PHASE2 akan lebih kecil jika analisis dilakukan dengan menggunakan support.
6. Nilai total displacement berdasarkan Plaxis 3D Tunnel lebih besar dibandingkan dengan PHASE2 dan nilai gaya dalam untuk bending moment berdasarkan PHASE2 lebih besar dari pada Plaxis 3D Tunnel.
7. Nilai tegangan diatas terowongan Q-System jauh lebih kecil dari metode Terzaghi’s, RQD, Q- System, PHASE2, dan Plaxis 3D Tunnel. Hal ini disebabkan karena metode Q-System tidak memperhitungkan berat jenis batuan, namun hanya memperhitungkan nilai dari rating yang dihasilkan berdasarkan data geologi. Sedangkan metode yang lain memperhitungkan nilai dari berat jenis batuan.

# Daftar Pustaka

[1] Mazmur Togar BB, ST. dkk, Analisis Stabilitas Terowongan Batuan Dengan Metode Elemen Hingga Berdasarkan teori MohrCoulumb & Hoek and Brown, 2012.

[2] Ramadani, Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel. Bandung : UPI, 2012.

[3] Rahardjo. Paulus P, Teknik Terowongan. Bandung: Geotechnical Engineering Center, Parahyangan Catholic University, 2004.

[4] Dr. Marte S. Gutierrez, dkk. Distinct Element Modeling of the Shimizu Tunnel No.3 in Japan. Thesis. Virginia: Sotirios Vardakos, 2003.

[5] Serkan Ucer, Comparison Of 2D And 3D Finite Element Models Of Tunnel Advance In Soft Ground: A Case Study On Bolu Tunnels - Comparisons Between In Situ Tests And Indirect Estimates, 2006.

[6] Zulfu Gurocak , Pranshoo Solanki , Musharraf M. Zaman, Empirical and numerical analyses of support requirements for a diversion tunnel at the Boztepe dam site, eastern Turkey, 2007.

[7] Rocscience, Manual PHASE2, 2001

[8] Rocscience, Rock massproperties. [http://www.rocscience.com/hoek/corner/11\_Rock \_mass\_properties.pdf](http://www.rocscience.com/hoek/corner/11_Rock%20_mass_properties.pdf), 2014

[9] Tampubolon, Andra H. Studi Analisis Pengaruh Pembangunan Terowongan MRT Terhadap Lingkungan Sekitar dengan Metode Elemen Hingga Skripsi. Bandung: Central Library Institute Technology Bandung, 2007.

[10] Andarhtamp, Studi Analisis Pengaruh Pembangunan Terowongan MRT Terhadap. Lingkungan Sekitar Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga, 2007.