

# **TUGAS AKHIR**

## **PERHITUNGAN ULANG LINING TEROWONGAN REL KERETA API IJO BARU**

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Pendidikan  
Strata Satu (S1) Program Studi Teknik Sipil - Fakultas Teknik  
Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA) Semarang**



Oleh:

**Neila Ulfiana Firdaus**

**30.2017.00.136**

**Rimanda Anggarani Sanjaya**

**30.2017.00.157**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG  
JULI 2021**



**UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG**  
**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL**

Jalan Raya Kaligawe KM. 4 PO. BOX 1054 Telepon. 089608181018 Semarang 50112

**HALAMAN PENGESAHAN**

**TUGAS AKHIR**

**PERHITUNGAN ULANG LINING TEROWONGAN**

**REL KERETA API IJO BARU**

Oleh:



Neila Ulfiana Firdaus

30201700136

Rimanda Anggarani Sanjaya

30201700157

Disetujui dan disahkan di Semarang pada tanggal 5 Juli 2021

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

  
Ir. Gatot Rusbintardjo, M.R.Eng, M.Sc., Ph.D

  
Selvia Agustina ST.M.Eng

Mengetahui,  
Ketua Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung Semarang

  
Muhammad Rusli Ahyar, ST., M.Eng

## PERNYATAAN KEASLIAN DAN BEBAS PLAGIASI

Yang bertanda tangan dibawah ini :

1. Nama : Neila Ulfiana Firdaus  
NIM : 30201700136
2. Nama : Rimanda Anggarani Sanjaya  
NIM : 30201700157

menyatakan bahwa Tugas Akhir yang berjudul:

### **“PERHITUNGAN ULANG LINNING TEROWONGAN REL KERETA API IJO BARU”**

adalah merupakan hasil pemikiran dan pemaparan asli kami sendiri dan benar bebas dari plagiarisme. Kami tidak mencantumkan pendapat-pendapat, rumus-rumus tanpa merujuk pada publikasi-publikasi yang telah ada sebelumnya atau yang telah ditulis oleh orang lain, atau sebagai bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijazah pada Universitas Islam Sultan Agung Semarang atau perguruan tinggi lainnya.

Apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidak-benaran dalam pernyataan ini, maka kami bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Demikian pernyataan ini kami buat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Dibuat di: Semarang  
Pada tanggal: 5 Juli 2021

Mahasiswa I



**Neila Ulfiana Firdaus**  
**30.2017.00.136**

Mahasiswa II



**Rimanda Anggarani Sanjaya**  
**30.2017.00.157**



**UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG**  
**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL**

Jalan Raya Kaligawe KM. 4 PO. BOX 1054 Telepon. 089608181018 Semarang 50112

**BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR**

No. 05 / A.2 / SA – T / VII / 2021 tanggal 5 Juli 2021

Pada hari ini Senin, 5 Juli 2021 berdasarkan Surat Keputusan Kepala Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA) Semarang Nomor: 05 / A.2 / SA – T / VII / 2021 Tanggal 26 Februari 2021 hal penunjukan Dosen Pembimbing Tugas Akhir I dan Dosen Pembimbing Tugas Akhir II.

Bersama ini kami:

1. Nama : Ir. Gatot Rusbintardjo, M.R.Eng, M.Sc., Ph.D  
Jabatan : Lektor
2. Nama : Selvia Agustina ST. M. Eng  
Jabatan : Lektor

menyatakan bahwa mahasiswa yang tersebut di bawah ini:

1. Nama/NIM : Neila Ulfiana Firdaus / 30201700136
2. Nama/NIM : Rimanda Anggarani Sanjaya / 30201700157

telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Perhitungan Ulang Lining Terowongan Rel Kereta Api Ijo Baru” dengan tahapan sebagai berikut:

NO	Tahapan	Tanggal
1	Penunjukan Dosen Pembimbing	26 Februari 2021
3	Konsultasi Pengambilan Tugas Akhir	3 Maret 2021
4	Penyusunan Laporan Tugas Akhir	April – Juni 2021
5	Seminar Tugas Akhir	16 Juli 2021

Demikian Berita Acara Bimbingan Tugas Akhir / Skripsi ini dibuat untuk diketahui dan dipergunakan seperlunya oleh pihak-pihak yang berkepentingan.

Dosen Pembimbing I,

**Ir. Gatot Rusbintardjo, M.R.Eng, M.Sc., Ph.D**

Dosen Pembimbing II,

**Selvia Agustina ST.M.Eng**

Mengetahui,  
Ketua Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik - Sipil Universitas Islam Sultan Agung Semarang

**Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng**

## MOTO

Sesungguhnya Allah tidak akan mengubah nasib suatu kaum sehingga mereka mengubah keadaan yang ada pada diri mereka sendiri. (*Q.S 13 Ar-Ra'd ayat 11*)

Maka sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan, sesungguhnya beserta kesulitan itu ada kemudahan. (*Q.S 94 Asy-Syarh ayat 5-6*)

Mintalah pertolongan kepada Allah dengan Sabar dan Sholat (*Q.S2 Al Baqarah: ayat 45*)

Siapa yang keluar untuk menuntut ilmu maka dia sesungguhnya telah berjuang fi sabilillah hingga dia kembali. (Hadist Riwayat Tirmidzi)

Bersemangatlah atas hal – hal yang bermanfaat bagimu. Minta tolonglah pada Allah, jangan engkau lemah. (Hadist Riwayat Muslim)

Ketahuiilah bahwa kemenangan bersama kesabaran, kelapangan bersama kesempatan, dan kesulitan bersama kemudahan. (Hadist Riwayat Tirmidzi)



## UCAPAN TERIMA KASIH

*Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh*

*Bismillahirrohmannirohiim,*

*Alhamdulillahirobbil'alaamiin,*

Dengan menyebut asma Allah Yang Maha Pengasih dan Maha Pnyayang, segala puja dan puji syukur bagi Allah Subhanahu Wa ta'ala yang atas Rahmat, Taufiq, dan Hidayah Nya, kami telah apat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Perencanaan Jalan Rel Kereta Api di Atas Tanah Lunak”.

Penyusunan Laporan Tugas Akhir ini dapat terwujud atas pertolongan Allah Tuhan Yang Maha Penolong dan atas bantuan serta dukungan beberapa pihak. Untuk itu ingin mengucpkan terima kasih kepada kepada:

1. Bapak Ir. H. Rachmat Mudiyono, MT., Ph. D, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Bapak Muhammad Rusli Ahyar, ST., M.Eng, selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Bapak Ir. Gatot Rusbintardjo, M.R.Eng., Ph.D dan Ibu Lisa Fitriyana, ST., M.Eng, selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir.
4. Kedua orang tua saya, Bapak Mustajab dan Ibu Masrini yang telah memberikan do'a serta dukungan berupa moril dan materil.
5. Adik saya Hana Khani Fatusy Syhfa' yang selalu memberikan dukungan do'a, motivasi dan kasih sayang.
6. Rimanda Anggarani S. yang selalu sabar dan setia sebagai parter dalam berjuang bersama menyelesaikan penyusunan Laporan Tugas Akhir.
7. Sahabat saya Juju, Citra, Nila, Afidah, Farah, Vivi, yang selalu memberikan dukungan, dorongan, hiburan, dan inspirasi.
8. Rekan – rekan di Program Studi Teknik Sipil UNISSULA angkatan tahun 2017 dan Angkatan tahun 2016, yang telah memberikan bantuannya.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu – persatu yang terlibat dan telah membantu penyusun Laporan Tugas Akhir ini.

Semoga laporan ini bermanfaat bagi diri kami pada khususnya dan semua pihak yang memerlukan pada umumnya.

*Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.*

Semarang, 5 Juli 2021



Neila Utiana Firdaus

## UCAPAN TERIMA KASIH

*Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh*

*Bismillahirrohmannirohiim,*

*Alhamdulillahirobbil'aalaamiin,*

Dengan menyebut asma Allah Yang Maha Pengasih dan Maha Pnyayang, segala puja dan puji syukur bagi Allah Subhanahu Wa ta'ala yang atas Rahmat, Taufiq, dan Hidayah Nya, kami telah apat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Perencanaan Jalan Rel Kereta Api di Atas Tanah Lunak”.

Penyusunan Laporan Tugas Akhir ini dapat terwujud atas pertolongan Allah Tuhan Yang Maha Penolong dan atas bantuan serta dukungan beberapa pihak. Untuk itu ingin mengucpkan terima kasih kepada kepada:

1. Bapak Ir. H. Rachmat Mudyono, MT., Ph. D, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Bapak Muhammad Rusli Ahyar, ST., M.Eng, selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Bapak Ir. Gatot Rusbintardjo, M.R.Eng., Ph.D. dan Ibu Selvia Agustina ST.M.Eng selaku dosen pembimbing saya yang telah sabar mengajarkan saya dalam pembuatan laporan ini.
4. Kedua orang tua saya, Bapak Ikhsan dan Ibu Eni Wijayanti, Adik saya, serta keluarga besar yang telah yang telah memberikan segenap kasih sayang, dukungan materil, semangat, do'a dan pendidikan mental untuk terus mengejar impian menjadi seseorang yang mulia di dunia dan akhirat.
5. Neila Ulfiana F. sebagai partner saya yang telah bekerja keras dan berjuang bersama dalam penyelesaian tugas akhir ini.
6. Nabila yang telah memberikan nasihat-nasihat yang sangat bermanfaat hingga saya dapat menjalani tugas akhir ini hingga selesai.
7. Sahabat saya Mario yang telah membantu saya dalam mengerjakan tugas akhir.
8. Rekan – rekan di Program Studi Teknik Sipil UNISSULA angkatan tahun 2017, yang telah memberikan semangat dan bantuannya.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu – persatu yang terlibat dan telah membantu penyusun Laporan Tugas Akhir ini.

Semoga laporan ini bermanfaat bagi diri kami pada khususnya dan semua pihak yang memerlukan pada umumnya.

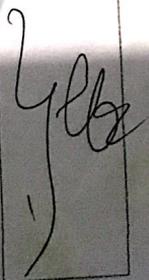
*Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.*

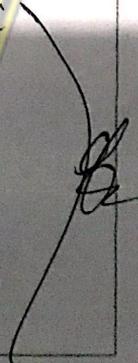
Semarang, 5 Juli 2021  
Rimanda Anggarani Sanjaya

## LEMBAR ASISTENSI



Nama : Neila Ulfiانا F. 30201700136  
 Rimanda Anggarani S. 30201700157  
 Laporan Tugas : Tugas Akhir  
 Nama Proyek : Evaluasi Terowongan Jalan Kereta Api  
 Notog - Purwokerto  
 Dosen Pembimbing I : Ir. Gatot Rusbintardjò, M.R.Eng., Ph.D  
 Dosen Pembimbing II : Selvia Agustina ST.M.Eng

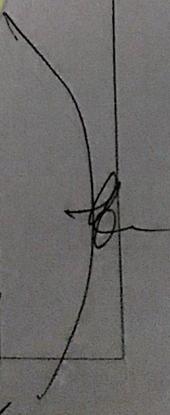
NO	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
1.	Revisi $\frac{2}{3}$ / 2021	Judul T.A. - konstruksi Terowongan untuk Jalan Revisi Kereta api - cari literatur tentang konstruksi terowongan. - <del>Uraikan</del> Akhir april 2021 Selesai bab 1 sampai 3	
2	Revisi $\frac{2}{3}$ / 21	Bab 1 1.1 latar belakang 1.2 Tujuan 1.3 Masalah 1.4. pembahasan masalah.	

NO	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
3	Rabu 21/21. 3	<p>- Debaribi bab 1. 2 bid gambar (foto) Two use- age, notog - pur- wokoro.</p> <p>- Bab 2. Tulis pustaka<sup>2</sup> ge meliputi tin jaman geo- logi, konstruksi two use, dan politik dan sempa.</p>	
4	Senin 21/21. 4	<p>Bab 1. di ketulukan susun koreksi. gambar ayah &amp; pembuat.</p> <p>Bab 2 dokter penulisan bab 2 susun contohnya.</p>	

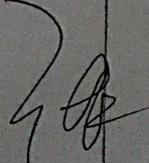
Naifa Ulfione. F  
Rimanda A.S.

1

⑤ $\frac{2}{4}$	- Probaiti Lab 2 - sesuai boreski - syora cari data teknis suwayan Notoq.	} G. } G.
⑥ $\frac{12}{4}$	Dab 1: Setukan y kuway Dab 2: semu bok'pas d' ber' uouuo reforma. - belajar cari d' internet politik suwayan	} G.
7.	- Dab 1. All - Dab 2 d' betul kau seuai boreski - tegera tulis Dab 3.	} G. } G.

NO	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
8	Senin 19/12/19 4	- Bab 2 → OK. - Bab 3 → format bagian alir sesuai petunjuk. - Tulis bab 3 dan lembar. - Cari contoh protokoler dari T.A dan asih. 2017.	
9	Sabtu 24/12/19 4	- Bab 3 → perbaikan - Bab 4 → mulai di ketikkan.	
10	Kamis 29/12/19 4	- Artikel ditulis "PERKEMBANGAN ULANG KONSTRUKSI TERPADU IJO BAKU". - Perbaiki bab 1, 2 3 sesuai topik bab - Kembangkan bab 4.	

NO	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
11.	Sabtu 1 5 '21	- lanjutkan proli- fungus dan ungu- nakan proli fungus keertua.	) <i>[Signature]</i>
12	Selasa 4 5 '21.	- bab 4 di perbaiki	) <i>[Signature]</i>
13	Sabtu 8 5 '21.	- Proli fungus bab 4: Cobaan spori- bas & parameter proli fungus yg berbeda antara tirovawan yg ada dengan tiro- vawan yang di hitung.	) <i>[Signature]</i>
14	Senin 10 5 '21.	Perbaiki proli- fungus bab 4.	) <i>[Signature]</i>

NO	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
15	Rabu 19/21 5	- Perbaiki ambu. Peralihan ulang mengu- kan data konsors. Yang ada, beva- li data tanah.	} 
16	Rabu 20/21 5	- Perbaiki litupan luring.	} 
17	Kamis 21/21 5	- Stikus lagi body sumpi bitum tebal lining dan lantai dasar terowongan.	} 
18	Kamis 21/21 6	- Stikus tebal luring untuk beton dug to - Cayun.	} 

- judul TA di ganti;  
"PERMUDAAN ULTRA LINGKUP  
TEROWONGAN NO 1000".

NO	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
19	Senin 21/12. 6	- Bab 3 - d. tulis ulang.	3
20	Senin 28/12. 6	- Bab 3: d. tulis lagi lihat bab 3 AL-QURAN. - tentang pembinaan di bab 4 for pus. 2 d. bab 3. - Tulis: - Daftar pustaka. - Lampiran (jika ada) - Halaman kembali paper	3

NO	TANGGAL	KETERANGAN	PARAF
21	Dab 7 '21 7	- Probabil abstrak. - Dab 5.	y lbr



## LEMBAR ASISTENSI



Nama : Neila Ulfiana F. (30201700136)

Rimanda Anggarani S. (30201700157)

Laporan Tugas : Tugas Akhir

Nama Proyek : Perhitungan Ulang Lining Terowongan  
Rel Kereta Api Ijo Baru

Dosen Pembimbing 1 : Ir. Gatot Rusbintardjo, M.R.Eng, M.Sc., Ph.D

Dosen Pembimbing 2 : Selvia Agustina ST.M.Eng

NO.	TGL ASISTENSI	KETERANGAN	PARAF
1.	Senin 8/03/2021	Perancangan perhitungan tanah berdasarkan jenis tanah di daerah Kabupaten Kebunrejo.	

## ABSTRAK

### PERHITUNGAN ULANG LINING TEROWONGAN REL KERETA API IJO BARU

Neila ulfiana firdaus<sup>1)</sup>, Rimanda Anggarani S.<sup>1)</sup>

Ir. Gatot Rusbintardjo, M.R.Eng, M.Sc., Ph.D<sup>2)</sup>, Selvia Agustina ST.M.Eng<sup>2)</sup>

Perbedaan geometri antara rel kereta api dan jalan raya mengharuskan pembangunan terowongan untuk meminimalisir tikungan tajam pada alinyemen horizontal. Studi ini bertujuan untuk menghitung ulang konstruksi terowongan eksisting untuk mengetahui ketebalan *lining*. Perhitungan menggunakan metode analitik dengan acuan Perhitungan Desain Terowongan Departemen Pekerjaan Umum. Hasil yang didapatkan adalah tebal lining 37 cm untuk lining dengan beton tidak bertulang, dan 35 cm untuk lining dengan beton bertulang. Hasil ini sedikit lebih besar dari tebal lining konstruksi terowongan Ijo Baru yang telah ada yaitu 30 cm dan 35 cm. Tebal lining tersebut telah memenuhi kekuatan yang disyaratkan. Selisih tebal lining antara perhitungan ulang dengan konstruksi yang ada dimungkinkan karena adanya perbedaan anggapan besaran parameter tanah, seperti tegangan tanah, kohesi tanah dan sebagainya.

**Kata kunci:** Terowongan Rel Kereta Api, Studi Literatur, Perhitungan Ulang, *Lining*, Pembebanan

- 1) Mahasiswa Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Unissula
- 2) Dosen Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Unissula

## ABSTRACT

### RECALCULATION OF LINING RAILWAY TUNNEL IJO BARU

Neila ulfiana firdaus<sup>1)</sup>, Rimanda Anggarani S. <sup>1)</sup>

Ir. Gatot Rusbintardjo, M.R.Eng, M.Sc., Ph.D<sup>2)</sup>, Selvia Agustina ST.M.Eng<sup>2)</sup>

*The difference in geometry between railroads and roads necessitated the construction of tunnels to minimize sharp bends in the horizontal alignment. Due to these differences in geometry, a railroad tunnel is needed, one of which is the Ijo Baru tunnel in Gombong. This study aims to recalculate the existing tunnel construction to determine the lining thickness. Calculations use analytical methods concerning Tunnel Design Calculations from the Ministry of Public Works. The results obtained are 37 cm thick for lining with non-reinforced concrete, and 35 cm for lining with reinforced concrete. This result is slightly larger than the existing lining thickness of the existing Ijo Baru tunnel construction, which is 30 cm and 35 cm. The thickness of the lining has met the required strength. The difference in lining thickness between the recalculation and the existing construction is possible due to differences in the assumptions of the magnitude of soil parameters, such as soil stress, soil cohesion, etc.*

**Keyword:** Railway Tunnel, Literature Study, Recounting of Construction, Lining, Load

1) Students of the Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Unissula

2) Lecturer of the Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Unissula

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	i
<b>PERNYATAAN KEASLIAN</b> .....	ii
<b>BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR</b> .....	iii
<b>MOTTO DAN UCAPAN TERIMA KASIH</b> .....	iv
<b>LEMBAR ASISTENSI</b> .....	vii
<b>ABSTRAK</b> .....	viii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ix
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Tujuan Tugas Akhir .....	3
1.3 Rumusan masalah dan batasan masalah.....	3
1.4 Sistematika penulisan laporan T.A. ....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Pendahuluan .....	4
2.2. Terowongan.....	4
2.3. Tipe terowongan berdasarkan jenis tanah yang ada.....	5
2.3.1. Terowongan pada tanah batuan.....	5
2.3.2. Terowongan pada tanah lunak .....	7
2.4. Lining terowongan .....	7
2.5. Parameter untuk perhitungan dan perancangan terowongan.....	9
2.5.1. Beban kereta api .....	9
2.5.2. Tekanan tanah .....	10
2.5.3. Gempa .....	12
2.6. Metode konstruksi terowongan .....	14
2.7. Metode Konstruksi Terowongan konvensional dari NATM.....	15
2.8. Garis besar perencanaan terowongan .....	15
2.8.1. Pemilihan metode perencanaan.....	15

2.8.2. Penerapan perencanaan standar.....	17
2.8.3. Penerapan Perencanaan Berdasarkan Kondisi Serupa .....	17
2.8.4. Penerapan perencanaan analitik .....	18
2.9. Konsep Modifikasi Perencanaan .....	21
2.9.1. Konsep modifikasi perencanaan di konstruksi.....	21
2.9.2. Konsep Modifikasi Perencanaan di masa depan .....	23
2.10. Detail metode perancangan .....	25
2.10.1.Kondisi perancangan .....	25
2.11. Kondisi Geologi .....	27
2.11.1. Klasifikasi Massa Batuan .....	28
2.11.2. Kriteria keruntuhan Mohr-Coloumb .....	29
2.11.3. Penggalian dengan Metode NATM (New Austrian Tunneling Method) .....	34
2.12. Stabilitas Terowongan.....	35
2.13. Faktor Kegempaan .....	36
2.13.1.Gempa Rencana untuk Terowongan .....	38
2.14. Ringkasan Tinjauan Pustaka .....	40
 <b>BAB III METODOLOGI</b>	
3.1 Pendahuluan .....	41
3.3. Perhitungan Terowongan .....	41
3.3.1 Perhitungan Pembebanan .....	41
3.3.2 Perhitungan Tebal lining .....	45
3.3.3 Kontrol terhadap tebal lining .....	48
 <b>BAB IV PERHITUNGAN ULANG</b>	
4.1. Pendahuluan.....	51
4.2. Konstruksi Terowongan Ijo Baru .....	51
4.3. Spesifikasi bahan dan parameter perhitungan.....	53
4.4. Perhitungan ulang lining terowongan Ijo Baru.....	53
4.5. Beban-beban yang diperhitungkan .....	54
4.5.1. Beban mati (G).....	54
4.5.2. Tekanan atau beban vertikal pada bagian atas terowongan (P1) .....	55

4.5.3.	Tekanan atau beban vertikal pada dasar terowongan ( $P_2$ ).....	56
4.5.4.	Tekanan atau beban lateral pada bagian atas terowongan ( $q_1$ ).....	56
4.5.5.	Tekanan atau beban lateral pada dasar terowongan ( $q_2$ ) .....	57
4.6.	Perhitungan Tebal Lining Terowongan Ijo Baru.....	58
4.6.1.	Perhitungan Tambahan Tegangan Pada Lining .....	59
4.6.2.	Perhitungan Tebal Lining Dengan Beton Tanpa Tulangan .....	61
4.6.3.	Perhitungan Tebal Lining Dengan Beton Bertulang.....	63
4.6.4.	Kontrol Terhadap Tebal Lining Terowongan.....	66
4.7.	Kesimpulan Perhitungan.....	70

## **BAB V PERHITUNGAN ULANG**

5.1.	Kesimpulan.....	71
5.2.	Saran .....	71

<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	xiv
-----------------------------	-----

## **LAMPIRAN**



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Lokasi Terowongan Ijo di Gombang – Kebumen Jawa Tengah.....	2
Gambar 1.2 Tampak depan Terowongan Ijo Baru.....	2
Gambar 2.1 Terowongan batuan.....	6
Gambar 2.2 terowongan pada tanah lunak.....	7
Gambar 2.3 bagian-bagian lining terowongan.....	8
Gambar 2.4 Distribusi beban roda pada bantalan.....	10
Gambar 2.5 Contoh notasi yang digunakan dalam pedoman.....	11
Gambar 2.6 tekanan tanah yang bekerja pada lining.....	13
Gambar 2.7 Perbedaan antara metode NATM dengan metode konvensional (1).	16
Gambar 2.8 Perbedaan antara metode NATM dengan metode konvensional (2).	16
Gambar 2.9 Contoh analisis FEM dua dimensi.....	20
Gambar 2.10 Contoh ‘Mesh Diagram’ untuk analisis FEM tiga dimensi.....	20
Gambar 2.11 Contoh metode analisa kerangka struktur.....	21
Gambar 2.12 Chart estimasi nilai GSI untuk batuan terkekarkan.....	31
Gambar 2.13 Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb.....	33
Gambar 2.14 Sistem pendukung pada terowongan dengan metode NATM.....	34
Gambar 2.15 Mode deformasi dari terowongan akibat gelombang seismic.....	37
Gambar 4.1 Penampang melintang terowongan Ijo Baru dengan demensinya ....	52
Gambar 4.2 Kondisi beban dan tekanan pada terowongan.....	58

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Metode Konstruksi Terowongan untuk kondisi yang berlaku .....	14
Tabel 2.2 Metode Konstruksi Terowongan untuk kondisi yang berlaku .....	15
Tabel 2.3 Titik - titik Kesamaan Terowongan .....	18
Tabel 2.4 Daftar perencanaan dengan metode analitik .....	19
Tabel 2.5 Item Survei dan Pengukuran dalam Konstruksi dan Evaluasi Hasil ....	22
Tabel 2.6 Kualitas Massa Batuan .....	30
Tabel 2.7 Kualitas GSI massa batuan .....	32
Tabel 2.8 Pemilihan Metode Penggalian dan Karakteristiknya .....	35
Tabel 2.9 Kriteria Desain Gempa .....	38
Tabel 2.10 Faktor Amplifikasi PGA dan Periode 0,2 detik ( $F_{pga}$ dan $F_a$ ) .....	39
Tabel 2.11 Besarnya nilai factor amplifikasi untuk 1 detik ( $F_v$ ) .....	39
Tabel 2.12 Klasifikasi Situs .....	40
Tabel 4.1 Dimensi terowongan .....	51
Tabel 4.2 Data kondisi tanah .....	53



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar belakang

Terowongan adalah struktur teknik sipil yang dibangun dengan tujuan mengamankan ruang di dalam tanah. Bergantung pada tujuan penggunaan, terowongan diklasifikasikan menjadi terowongan jalan raya, terowongan kereta api, dan terowongan jalur air. Selain itu, terowongan diklasifikasikan sebagai terowongan gunung dan terowongan kota tergantung pada kondisi lokasinya. Terowongan umumnya mengacu pada struktur on-line di mana penampang yang telah ditentukan terus menerus dalam arah longitudinal. Definisi terowongan diberikan oleh OECD (Economic Cooperation and Development Organisation) Tunnel Recommendation Conference, OECD Advisory Conference on Tunneling di Washington 1970 [1] adalah rongga yang terletak di bawah permukaan tanah dan digunakan dalam beberapa cara dan dibuat menjadi geometri yang ditentukan dan memiliki ukuran dua meter persegi atau lebih.

Kereta api adalah sarana transportasi darat yang memiliki jalan khusus yaitu jalan rel kereta api. Selain daripada itu, kereta api terdiri dari lokomotif yang menarik beberapa gerbong sehingga merupakan rangkaian yang panjang. Karena panjangnya rangkaian kereta api, maka geometri jalan kereta api berbeda dengan geometri jalan raya. Perbedaannya antara lain, geometri jalan kereta api tidak memiliki tikungan yang tajam pada alinyemen horizontal dan tidak ada kemiringan atau gradien yang besar di alinyemen vertikal.

Karena perbedaan geometri tersebut, pembangunan jalan rel kereta api akan menjadi masalah apabila menjumpai bukit di depannya. Jika elevasi jalan kereta api mengikuti tanah yang datar maka jalan kereta api akan menjadi sangat panjang karena harus memutar bukit atau pegunungan. Untuk menghindari hal tersebut, maka dilakukan dengan membuat terowongan yang menembus bukit yang ada di depannya. Salah satu terowongan kereta api yang baru saja dibangun adalah Terowongan kereta api Ijo atau Terowongan Kroya – Kutoarjo KM

424+100 s.d. 426+200 antara Tambak - Gombang Kabupaten Kebumen Jawa Tengah. Lokasi terowongan Ijo Baru seperti terlihat pada peta di Gambar 1.1.



Gambar 1.1. Lokasi Terowongan Ijo di Gombang – Kebumen Jawa Tengah [2]

Terowongan Ijo Baru yang akan dihitung ulang konstruksinya adalah terowongan baru dengan rel ganda (double track) selesai dibangun pada bulan Desember 2019 dengan tampak depan seperti terlihat pada Gambar 1.2.



Gambar 1.2. Tampak depan Terowongan Ijo Baru [3]

## **1.2 Tujuan Tugas Akhir**

Dari uraian latar belakang tersebut di atas, maka tujuan dari Tugas Akhir ini adalah: Menghitung ulang konstruksi Terowongan kereta api Ijo Baru di Gombang Kabupaten Kebumen Jawa Tengah.

## **1.3 Rumusan masalah dan batasan masalah**

Masalah yang ada dalam menghitung ulang terowongan jalan rel kereta api Ijo Baru adalah tidak didapatnya data yang lengkap dari Terowongan Ijo Baru, baik data konstruksinya, data geologi dan tanah.

Karena tidak adanya data tersebut di atas, maka perhitungan ulang Terowongan Ijo Baru didasarkan pada gambar-gambar konstruksi dan keterangan spesifikasi bahan yang dipergunakan. Untuk data geologi dan tanah dipergunakan penjelasan dari jurnal yang ada tentang terowongan Ijo Baru tersebut.

## **1.4 Sistematika penulisan laporan T.A.**

Laporan Tugas Akhir ini dimulai dengan menguraikan latar belakang tentang terowongan jalan rel kereta api yang diuraikan pada Bab I, kemudian dilanjutkan dengan tinjauan pustaka yaitu meninjau buku-buku, jurnal-jurnal, dan makalah-makalah yang berkaitan dengan perencanaan terowongan jalan rel kereta api yang diberikan pada Bab II. Selanjutnya metodologi penulisan yang menjelaskan tentang langkah-langkah yang dilakukan untuk mencapai tujuan diberikan pada Bab III. Perhitungan ulang konstruksi terowongan jalan rel kereta api Ijo Baru diberikan pada Bab IV. Bahasan atas hasil perhitungan ulang terowongan jalan rel kereta api Ijo Baru diberikan pada Bab V. Sebagai penutup laporan diberikan kesimpulan pada Bab VI.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Pendahuluan**

Jurnal-jurnal dan makalah-makalah dalam prosiding seminar yang berkaitan dengan konstruksi terowongan jalan kereta api serta konstruksi terowongan Ijo Baru akan ditinjau dalam bab ini. Tinjauan yang dilakukan meliputi 1) Konstruksi terowongan pada umumnya dan jalan kereta api, 2) Konstruksi terowongan Ijo Baru.

#### **2.2. Terowongan**

Seperti disebutkan pada paragraf awal Bab I, terowongan adalah struktur teknik sipil yang dibangun dengan tujuan mengamankan ruang di dalam tanah. Bergantung pada tujuan penggunaan, terowongan diklasifikasikan menjadi terowongan jalan raya, terowongan kereta api, dan terowongan jalur air.

Terowongan ada yang dipergunakan untuk lalu lintas jalan kaki atau kendaraan, untuk lalu lintas kereta api, atau untuk saluran air. Beberapa terowongan adalah saluran air untuk memasok air untuk konsumsi atau untuk pembangkit listrik tenaga air atau selokan.

Terowongan adalah bagian dari infrastruktur jalan raya atau jalan kereta api yang paling mahal tetapi dalam beberapa kasus, terowongan diperlukan untuk mengatasi keadaan di mana solusi lain tidak dapat diterapkan. Seperti diutarakan pada Bab I terowongan jalan kereta api dibuat agar kereta api, karena masalah geometri jalan kereta api, tidak perlu mengitari bukit yang ada. Biaya konstruksi awal sebuah terowongan mungkin lebih dari sepuluh kali lipat dari biaya konstruksi di lokasi yang sama (dalam hal jalur lalu lintas yang disediakan) dengan biaya pengoperasian dan pemeliharaan yang tinggi.

Terowongan dibor dalam jenis material yang bervariasi dari tanah liat lunak hingga batuan keras. Metode pembangunan terowongan bergantung pada faktor-faktor seperti kondisi geologi, kondisi tanah, kondisi air tanah, panjang dan diameter terowongan, kedalaman terowongan, logistik pendukung penggalian terowongan, penggunaan akhir dan bentuk terowongan. serta manajemen risiko yang tepat [4].

### **2.3. Tipe terowongan berdasarkan jenis tanah yang ada**

Berdasarkan jenis tanah yang dapat digunakan untuk merancang suatu Terowongan terdapat dua jenis Terowongan yaitu Terowongan pada tanah batuan dan Terowongan pada Tanah Lunak. Kedua jenis terowongan tersebut dapat diuraikan sebagai berikut.

#### **2.3.1. Terowongan pada tanah batuan**

Terowongan batuan dibuat langsung di atas batuan masif dengan pengeboran atau peledakan. Terowongan batuan umumnya lebih mudah dibangun daripada terowongan yang melalui tanah lunak karena umumnya batuan dapat berdiri sendiri untuk menghadang pada batuan yang mengalami rekahan, dan karena batuan memiliki kekakuan dan stabilitas yang lebih tinggi, sehingga perkuatannya akan lebih sederhana [5]. Terowongan Batuan dapat dilihat pada Gambar 2.1.

Jalur terowongan yang melewati Zona Sesar atau sesar aktif dapat berbahaya jika ketinggian terowongan di bawah permukaan air. Arah patahan terhadap sumbu terowongan harus dipertimbangkan dengan hati-hati [6].

Untuk mengetahui pengaruh sambungan pada konstruksi terowongan, Bieniawski (1974) mengelompokkan massa batuan menjadi lima kelompok untuk mengetahui metode yang cocok digunakan untuk implementasi. Material batuan dengan banyak sambungan dapat diekstraksi menggunakan ripper [7].



Gambar 2.1 Terowongan batuan [4]

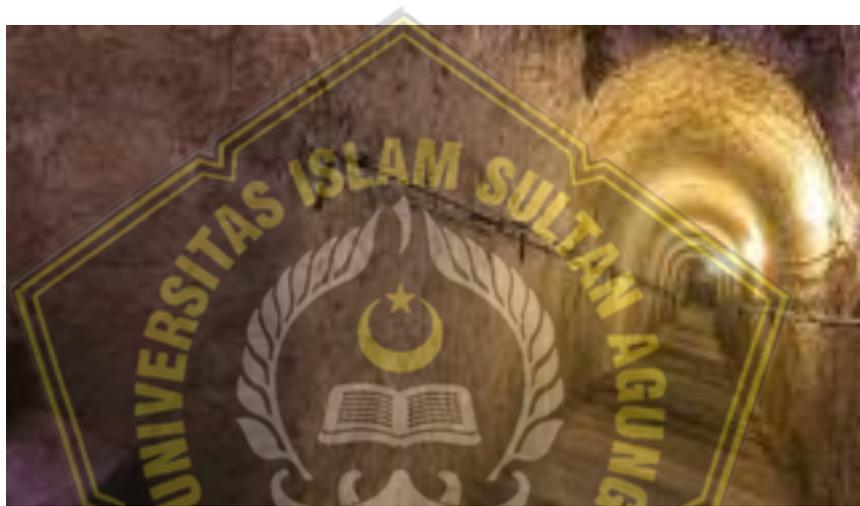
Bidang permukaan sambungan lebar sering ditemukan dalam pembuatan terowongan. Arah yang sejajar atau hampir sejajar dengan terowongan dapat menimbulkan masalah besar dalam pelaksanaannya. Periode di mana massa batuan masih dalam kondisi stabil tanpa perlu penyangga disebut Stand-Up Time atau kapasitas jembatan. Waktu Stand-up ini bergantung pada lebar bukaan, kekuatan batuan dan pola diskontinuitas. Jika waktu stand up rendah berarti segera setelah pembukaan atau penggalian harus segera dilakukan proteksi atau penopang massa batuan.

Kerutan pada lubang galian terowongan dapat terjadi sebagai akibat dari perubahan kondisi tegangan, munculnya tegangan geser cesareous dan adanya lapisan lempung yang ekspansif. Masalah serius yang terjadi pada saat penggalian terowongan adalah aliran air yang tiba-tiba dalam jumlah besar. Kondisi air tanah menjadi masalah utama.

Getaran gempa merupakan faktor penting yang harus diperhatikan dalam perencanaan lining dan sistem pendukung. Efek gempa bumi biasanya relatif lebih kecil dibandingkan dengan struktur yang ditemukan di tanah.

### 2.3.2. Terowongan pada tanah lunak

Terowongan tanah lunak adalah terowongan yang menembus tanah lunak seperti lempung, pasir dan batuan lunak. Jenis material ini cenderung runtuh pada saat proses pengeboran sehingga membutuhkan dinding yang kuat sebagai pelindung seiring dengan proses pengeboran [8]. Perisai yang biasa digunakan (pelindung) untuk melindungi galian dari keruntuhan. Teknik yang paling umum untuk proses pembangunan terowongan tanah lunak adalah dengan menggunakan Tunnel Boring Machine (TBM). Soft Ground Tunnel dapat dilihat pada Gambar 2.2.

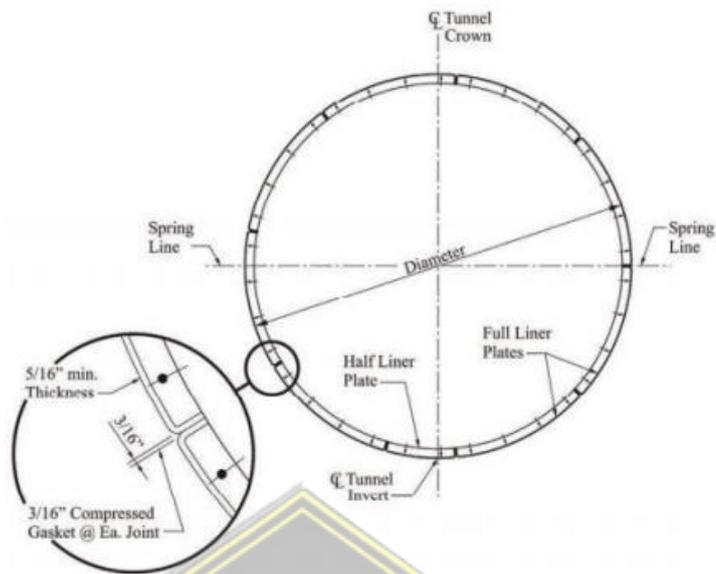


Gambar 2.2 terowongan pada tanah lunak

### 2.4. Lining terowongan

Lining terowongan adalah cangkang yang dipasang setelah pengeboran tanah lunak atau batuan selesai. Material yang digunakan untuk lining terowongan ini biasanya terbuat dari beton pracetak. Terowongan beton pracetak dibagi menjadi beberapa bagian atau segmen untuk memudahkan proses pemasangan.

Secara umum lining terowongan memiliki tiga titik acuan yaitu Crown, Spring Line dan Invert. Di mana Crown adalah puncak dari lining tunnel, Spring Line adalah garis horizontal di tengah lining terowongan, dan Invert adalah bagian terbesar dari lining terowongan. Bagian-bagian lining terowongan dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 bagian-bagian lining terowongan

Untuk terowongan dengan diameter bagian dalam lebih dari 3,5 m, dinding tidak boleh vertikal tetapi harus miring ke arah terbalik. Pada terowongan dengan penampang yang sangat kecil (diameter dalam <2,0 m), dinding samping pembalik harus berupa garis lurus. Pembalikan dan pertemuan dinding tegak lurus untuk melakukan pengangkutan galian dan instalasi beton.

**Momen Inersia efektif pada lining**

Pada terowongan dengan metode bor, lining dibagi menjadi beberapa segmen untuk memudahkan pemasangan lining. Namun metode ini menyebabkan struktur terowongan menjadi tidak monolit yang mempengaruhi kekakuan lapisan. Solusi agar momen inersia tetap efektif digunakan persamaan Muir Wood tahun 1975 berikut untuk menghitung kekakuan lining [9]. Persamaan dari Momen Inertia Efektif Lining Tunnel dapat dilihat pada persamaan 2.1.

$$I_e = I_j + I_s (4/n)^2 \dots\dots\dots \text{pers. 2.1.}$$

di mana:

- $I_e$  = momen inersia efektif ( $\text{kN/m}^4$ )
- $I_j$  = moment inersia di lapisan sambungan ( $\text{kN/m}^4$ ) (dianggap nol)
- $I_s$  = momen inersia awal ( $\text{kN/m}^4$ )
- $n$  = jumlah segmen

## 2.5. Parameter untuk perhitungan dan perancangan terowongan

Seperti pada konstruksi teknik sipil lainnya, parameter perhitungan dan perancangan terowongan meliputi beban, tanah dan lingkungan. Beban konstruksi terowongan yang diperhitungkan terdiri dari beban Kereta Api, Tekanan Tanah dan beban Gempa.

### 2.5.1. Beban kereta api

Berat kereta penumpang (berisi penumpang) adalah 40 ton. Kereta didukung oleh 2 bogie masing-masing dengan berat  $P_b = 20$  ton, masing-masing bogie terdiri dari 2 gandar, jadi t gandar adalah  $P_g = 10$  ton.

Wagon digunakan untuk mengangkut barang. Satu gerbong bisa terdiri dari 2 gandar tanpa bogie atau 4 gandar dengan bogie.

Faktor dinamis. Karena beban dinamis pada jalan rel kereta api, maka faktor dinamis muncul. Untuk mengubah gaya statis menjadi gaya dinamis digunakan persamaan Eisenmann berikut ini.

$$DAF = 1 + t \cdot \varphi (1 + (V-60) / 140) \dots\dots\dots \text{pers. 2.2.}$$

di mana:

- DAF = Faktor dinamis,
- t = Koefisien standar deviasi untuk keamanan perhitungan, dan diambil sebesar 3.
- $\varphi$  = Angka kondisi rel. Untuk kondisi normal = 0.2
- V = kecepatan kereta (km/jam)

Gaya dinamis dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$P_d = P_s \times DAF \dots\dots\dots \text{pers. 2.3.}$$

di mana:

- $P_d$  = gaya dinamis(ton)
- $P_s$  = Gaya statis (ton), dan
- DAF = Faktor dinamis.

Gaya Horizontal Sumbu Rel Garis Lurus Tegak. Gaya ini disebabkan oleh "gerakan ular" kereta api, gaya angin yang bekerja pada kereta di sisi kanan dan kiri, serta gaya sentrifugal saat kereta melintasi tikungan.

Gaya Sumbu Longitudinal Horizontal Jalur Kereta Api. Gaya ini disebabkan oleh gaya pengereman, gesekan antara roda rel dengan kepala rel, gaya akibat penyusutan rel dan gaya gravitasi jika rel berupa tanjakan atau turunan.

Distribusi Beban Kereta Api pada Lapisan Tanah Dasar Kereta api memberikan gaya vertikal dan horizontal pada rel. Menurut Profilidis (2006), skema distribusi gaya roda pada tanah dasar adalah seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Distribusi beban roda pada bantalan

### 2.5.2. Tekanan tanah

Tekanan tanah harus ditentukan dengan analisa yang tepat. Tekanan tanah vertikal pada mahkota terowongan harus memiliki beban yang seragam dan harus sama dengan tekanan lapisan penutup, jika terowongan yang dirancang adalah terowongan dangkal. Tekanan tanah horizontal harus merupakan beban yang bervariasi secara seragam yang bekerja pada sentroid lapisan dari mahkota ke dasar. Persamaan 2.4 adalah persamaan untuk menentukan tekanan tanah, dan Gambar 2.5. contoh notasi yang dipergunakan dalam pedoman.

$$P_{el} = P_0 + \sum \gamma_i H_i + \sum \gamma_j H_j \dots\dots\dots \text{pers. 2.4.}$$

di mana:

$P_0$  = Beban tanah

$\gamma_i$  = Satuan berat tanah lapisan ke i, yang berada di atas muka air tanah.

$\gamma_j$  = Satuan berat tanah lapisan ke j yang berada di bawah muka air tanah.

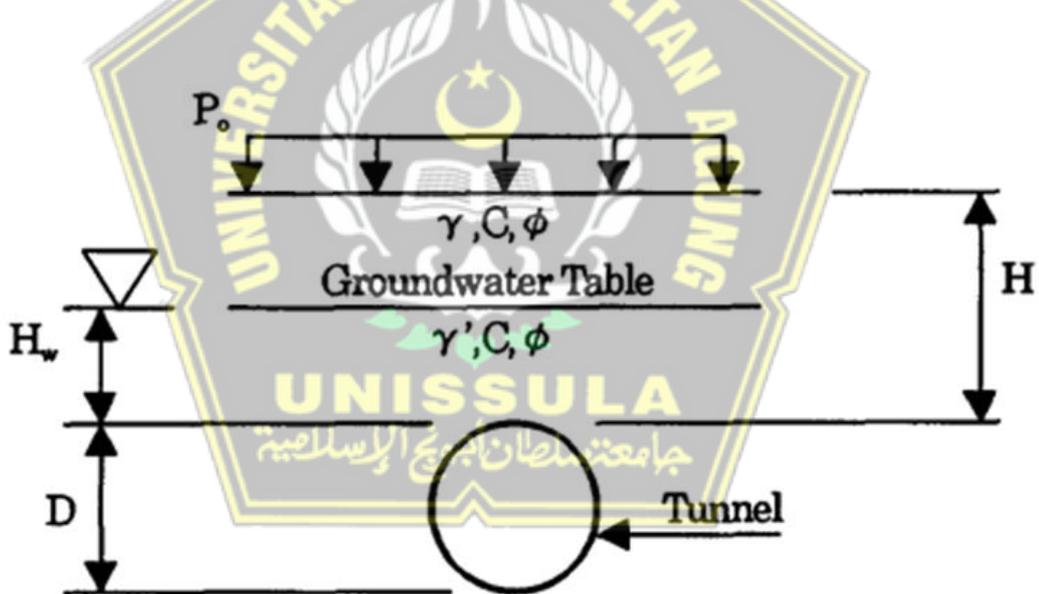
$H_j$  = Tebal lapisan j,

$H$  =  $\sum H_i + \sum H_j$

$h_0$  =  $B (1 - C/B_1\gamma) [(1 - \exp(-k_0 \tan(\phi) H/B_1)]/K_0 \tan(\phi) + P_0 \exp\{K_0 \tan(\phi) H/B_1\}/\gamma$

$B_1$  =  $R_0 \cot(\pi/8 + \phi/4)$

$P_{el}$  =  $\gamma h_0$  (jika berada di atas muka air tanah)



Gambar 2.5 Contoh notasi yang digunakan dalam pedoman

**Batasan untuk Penguatan**

Untuk bagian kompresi non-prategang, luas tulangan maksimum diberikan oleh Persamaan Spesifikasi AASTHO LRFD sebagai berikut:

$$\frac{A_s}{A_g} \leq 0.08 \Rightarrow A_s \leq 76.8 \text{ in}^2 \dots\dots\dots \text{pers. 2.5.}$$

Untuk bagian kompresi non-pratekan, luas tulangan minimum diberikan oleh Persamaan Spesifikasi LRFD AASHTO sebagai:

$$\frac{A_s}{A_g} \leq 0.08 \Rightarrow A_s \leq 76.8 \text{ in}^2 \dots\dots\dots \text{pers. 2.6.}$$

di mana:

- $A_s$  = Luas tulangan tarik non-prategang (inch<sup>2</sup>)
- $A_g$  = Luas kotor penampang beton (inch<sup>2</sup>)
- $f_y$  = Kekuatan besi tulangan (ksi)
- $f'_c$  = Kuat tekan beton (ksi)

**Parameter Dasar Model Mohr-Coulomb**

Model Mohr-Coulomb membutuhkan total lima parameter yang biasa digunakan oleh praktisi geoteknik. Parameter ini beserta dimensi dasarnya adalah sebagai berikut:

- $E_{ref}$  : Young Modulus (kN/m<sup>2</sup>)
- $\nu$  : Poisson ratio
- $\phi$  : Sudut geser (°)
- $c_{ref}$  : Kohesi (kN/m<sup>2</sup>)
- $\Psi$  : Sudut dilatasi (°)

**2.5.3. Gempa**

Beban gempa adalah beban yang bekerja pada suatu struktur akibat gerakan tanah yang disebabkan adanya gempa bumi (baik gempa tektonik maupun vulkanik) yang mempengaruhi struktur tersebut. Gempa bumi menimbulkan beban pada

struktur akibat interaksi tanah dengan struktur dan karakteristik respon struktur. Beban gempa di terowongan dapat dihitung menggunakan persamaan 2.7.

$$P_d = C_d \times W \times D \dots\dots\dots \text{pers. 2.7.}$$

di mana:

$C_d$  = koefisien tekanan untuk terowongan liner, (H adalah tinggi penutup pada Gambar 2.6)

$W$  = Satuan berat tanah total (pcf)

$D$  = Diameter horizontal terowongan

Beban vetikal sepanjang penampang terowongan.

$$P_g = W / (2\pi R_c) \dots\dots\dots \text{pers. 2.8.}$$

$P_g$  =  $\gamma_c \times t$  (Jika penampangma segi empat panjang)



Gambar 2.6 tekanan tanah yang bekerja pada lining

- $q_{e1} = \lambda (p_{e1} + \gamma \times t/2)$  (jika terowongan terletak di atas muka air tanah)
- $q_{e1} = \lambda (p_{e1} + \gamma' \times t/2)$  (jika terowongan terletak di bawah muka air tanah)
- $q_{e2} = \lambda \{p_{e1} + \gamma \times (2R_o - t/2)\}$  (jika terowongan terletak di atas muka air tanah)
- $q_{e2} = \lambda \{p_{e1} + \gamma' \times (2R_o - t/2)\}$  (jika terowongan terletak di bawah muka air tanah)

## 2.6. Metode konstruksi terowongan

Terdapat tiga jenis spesifikasi tujuan umum untuk membangun terowongan, yaitu terowongan batu, terowongan perisai, terowongan potong dan penutup. Metode konstruksi ini sangat erat kaitannya dengan kondisi lokasi terowongan. Untuk alasan ini, ada kecenderungan bahwa terowongan batu dipilih untuk terowongan yang dibangun di daerah pegunungan, dan terowongan pelindung atau terowongan potong dan penutup dipilih untuk terowongan kota yang dibangun di atas tanah datar. Namun, tergantung pada topografi dan kondisi geologi, ada kasus di mana metode potong dan tutup diadopsi di portal terowongan gunung, dan terowongan batu diadopsi di terowongan kota. Oleh karena itu, batasan belum tentu jelas. Spesifikasi Standar untuk terowongan batu, terowongan pelindung, terowongan potong dan penutup masing-masing dikembangkan oleh Japan Society of Civil Engineers. Sasaran dari pedoman ini adalah terowongan batu [9]. Tabel 2.1. adalah tabel untuk metode konstruksi terowongan untuk kondisi yang berlaku (applicable condition), dan Tabel 2.2. metode konstruksi terowongan untuk kondisi perencanaan (design condition) [9]. Terjemahan Tabel 2.1. dan Tabel 2.2. dapat dilihat di Lampiran A1 dan A2.

Tabel 2.1 Metode Konstruksi Terowongan untuk kondisi yang berlaku [9]

Condition		Mountain Tunnel	Shield Tunnel	Cut and Cover Tunnel
A P P l i c a b l e  c o n d i t i o n	Geology	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suitable for consolidated bedrock, excavation is possible even in unconsolidated grounds by using</li> <li>Basics of excavation surface independence</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suitable for unconsolidated mountains / low consolidated mountains</li> <li>In the case of the closed type, it is possible to construct even if the excavation surface is not self-sustaining</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mainly suitable for unconsolidated land, but it can be applied to any land</li> </ul>
	Earth Covering	<ul style="list-style-type: none"> <li>Earth Covering more than 2D (tunnel outer diameter) is necessary. It is possible to construct even a few meters by using auxiliary method</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Earth Covering more than 1D (tunnel outer diameter) is necessary.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suitable for small earth covering (roughly 20 m or less)</li> </ul>
	Ground Water	<ul style="list-style-type: none"> <li>If the amount of spring water is large or the autonomy of the excavated surface can not be secured, an auxiliary construction method is necessary. It is necessary to consider the influence to the surroundings</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>In the open type, countermeasures such as pressure method and underground water reduction method are required, but in the case of sealed type almost no auxiliary method is required</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>It is necessary to take countermeasures such as groundwater reduction method and soil improvement</li> </ul>
	Location	<ul style="list-style-type: none"> <li>It is used in the mountains, but depending on ground conditions it is also used in urban areas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>It is also used in urban areas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>It is used in urban areas. Sometimes it is constructed as a start / arrival base of the shield Tunnel</li> </ul>

Tabel 2.2 Metode Konstruksi Terowongan untuk kondisi yang berlaku [9]

Condition		Mountain Tunnel	Shield Tunnel	Cut and Cover Tunnel
D e s i g n  C o n d i t i o n	Cross Section	<ul style="list-style-type: none"> <li>horseshoe shaped cross section is used. An arbitrary sectional shape is possible to some extent, but an arch shape is desirable for the upper half</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>determined by the cross sectional shape of the shield machine, but a circular cross section is used</li> <li>With the exception of special excavating machinery, it is impossible to change the cross sectional shape</li> <li>With special excavating machines, cross sections such as multi-circle and rectangle are also possible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Generally, a rectangular cross section is used, but an arbitrary cross sectional shape is possible</li> </ul>
	Structure of Support and Lining	<ul style="list-style-type: none"> <li>Use steel support, rock bolts, shotcrete as support.</li> <li>The lining is basically based on plain concrete by striking the place, but in the case where the ground pressure acts it may be a reinforced concrete structure</li> <li>Portal zone is generally arranged with reinforcing bars to prevent cracking due to shrinkage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Assemble a reinforced concrete made from a factory or a steel segment in the rear of the machine to make it the primary lining</li> <li>In some cases lining is carried out with plain or reinforced concrete secondary lining</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rigid structure by steel frame or reinforced concrete is basic</li> </ul>

(Source: JICA project)

## 2.7. Metode Konstruksi Terowongan konvensional dari NATM

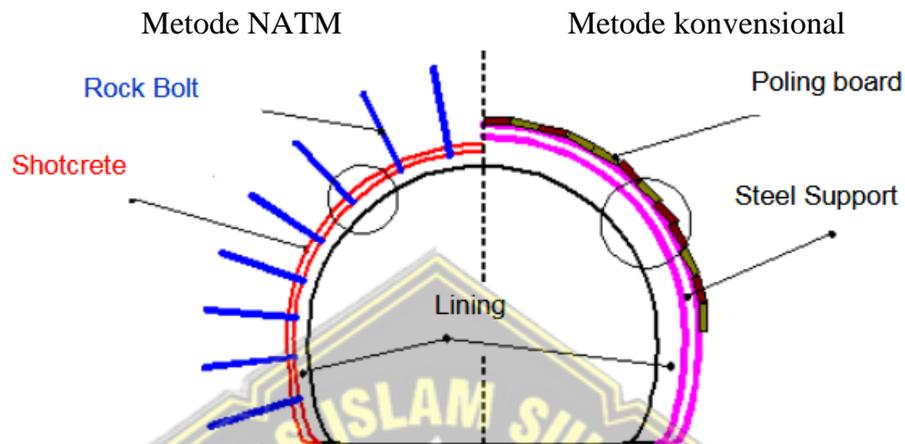
Metode konstruksi terowongan NATM (New Austrian Tunneling Method) adalah salah satu metode konstruksi terowongan yang diusulkan oleh ahli geologi Austria Dr. Rabcewicz pada tahun 1964. NATM diperkenalkan ke Jepang pada tahun 1977 di terowongan kereta api, dan sejak 1978 menjadi konstruksi standar metode di terowongan kereta api. NATM sangat berbeda dari metode konvensional dan dapat dikatakan bahwa metode konstruksi untuk memanfaatkan toleransi secara maksimal. dimiliki oleh tanah karena penyangga bersentuhan erat dengan tanah. Gambar 2.7. dan Gambar 2.8. menunjukkan perbedaan antara metode NATM dengan metode konvensional.

## 2.8. Garis besar perencanaan terowongan

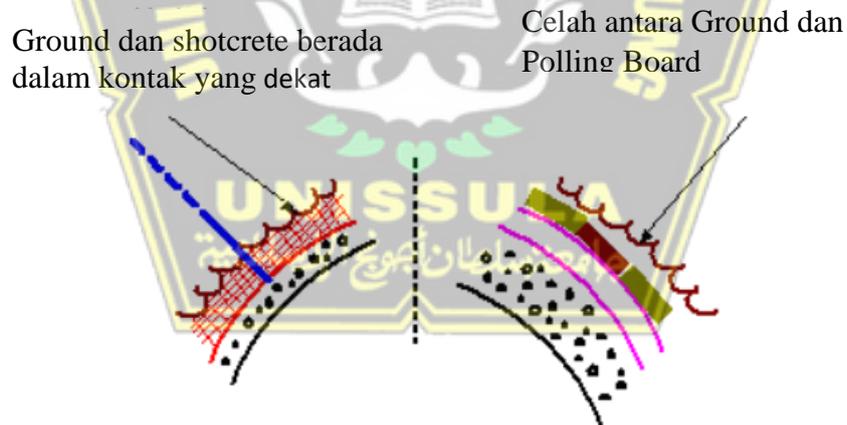
### 2.8.1. Pemilihan metode perencanaan

Perencanaan terowongan didasarkan pada perencanaan awal atau dasar dan perencanaan dasar terowongan yang perencanaannya mendukung bagian struktur seperti shotcrete, baut batu, penyangga dan lining baja, yang berdasarkan hasil

survei lapangan terbatas sebelumnya. Pada tahap konstruksi dilakukan modifikasi perencanaan untuk mengubah struktur penopang berdasarkan pengamatan permukaan yang akan dilakukan pada saat penggalian dan hasil pengukuran dan sejenisnya.



Gambar 2.7 Perbedaan antara metode NATM dengan metode konvensional (1)



Gambar 2.8 Perbedaan antara metode NATM dengan metode konvensional (2)

Ada tiga jenis metode desain yang digunakan dalam desain awal.

- a. Penerapan perencanaan standar
- b. Penerapan perencanaan berdasarkan kondisi serupa
- c. Penerapan perencanaan analitik

Namun, dengan mempertimbangkan proses perncanaan dan efisiensi ekonomi, setiap tingkatan bukit atau gunung, yang membedakan kondisi pegunungan di tanah menjadi beberapa jenis, ditetapkan pola penyangga standar yang sesuai.

### **2.8.2. Penerapan perencanaan standar**

Jika penampang melintang standar ditentukan seperti terowongan jalan raya dan terowongan jalan kereta api, perencanaan standar umum digunakan kecuali untuk kondisi khusus. Dalam metode ini, pola dukungan yang representatif untuk shotcrete, baut batu, penyangga baja, pelapis, dan lain-lain ditetapkan sebelumnya untuk setiap kelas kemiringan dan diterapkan. Nilai tanah gunung didasarkan pada tabel klasifikasi geoteknik yang dievaluasi dengan mengelompokkan era generasi gunung, struktur geologi, situasi pelapukan / kerusakan, keadaan permukaan yang terputus-putus, pengaruh air tanah dan kondisi geologi lainnya.

Klasifikasi geoteknik dan pola dukungan standar dikembangkan secara terpisah untuk setiap terowongan karena ada hubungan yang erat dengan setiap ukuran penampang terowongan yang digali bersama dengan metode konstruksi. Dengan kata lain, banyak data hasil konstruksi dan observasi serta jenis batuan, eksplorasi gelombang elastis, kondisi kualitas batuan, kondisi inti, RQD (Rock Quality Designation), rasio intensitas kekuatan tanah dan situasi pada galian terowongan yang dianalisis.

### **2.8.3. Penerapan Perencanaan Berdasarkan Kondisi Serupa**

Jika terdapat terowongan yang ada di dekat terowongan yang dibangun dan hasil konstruksi dapat diperoleh, perencanaan awal yang lebih masuk akal menjadi mungkin dengan mempertimbangkan hasil sebenarnya dari terowongan yang dibangun. Saat mendesain dua terowongan yang berdekatan, data pengukuran terowongan yang dibor di awal akan efektif dalam mendesain pola penyangga dan metode konstruksi terowongan yang akan digali nanti. Jika kondisi tanah dan kondisi perencanaan, seperti penampang terowongan, dianggap hampir sama, maka perencanaan terowongan yang ada dapat diterapkan ke yang lain setelah

mempertimbangkan kesamaan meskipun terowongan yang ada terletak jauh dari target. terowongan. Sudut pandang kemiripan ditunjukkan pada Tabel 2.3. Terjemahan Tabel 2.3. dapat dilihat di Lampiran A3.

Tabel 2.3 Titik - titik Kesamaan Terowongan [9]

Item	Focus Points	
Function of tunnel	Are the functions of the tunnel the same?	
Ground condition	class of ground	Is the Class of ground the same?
	topography overburden	Are the topography and overburden similar?
	property of ground	Whether rock species and geology ages, groundwater conditions, etc. are similar
Cross section shape and dimension	Cross section shape and dimension are similar?	
Impact on surroundings	Whether the regulation values are similar	
Proximity construction after completion	Type, positional relationship, scale, etc. are similar	

#### 2.8.4. Penerapan perencanaan analitik

Perencanaan terowongan dengan menggunakan metode analitik diadopsi untuk terowongan khusus (misalnya terowongan penampang besar dan terowongan paralel), pegunungan khusus (misalnya tanah yang tidak terkonsolidasi dan lahan yang luas) dan kondisi khusus (misalnya kedekatan dengan daerah perkotaan dan struktur yang ada). Metode analitik yang khas adalah metode analitik teoritis, metode analitik FEM (Finite Element Method), analisis struktur kerangka, dan lain-lain. Objek perencanaan dan tujuannya untuk setiap metode analitik ditunjukkan pada Tabel 2.4. Terjemahan Tabel 2.4. dapat dilihat pada Lampiran A4.

##### 2.8.4.1. Metode teori analitik

Metode ini didasarkan pada teori elastis oleh mekanika kontinum. Secara umum, kondisi detail tidak dapat dicerminkan dalam metode ini karena terdapat batasan pada kondisi analisis seperti penanganan terowongan sebagai lingkaran dan struktur pendukung yang sedang dibangun bersamaan dengan penggalian. Merupakan praktik umum untuk melakukan studi pendahuluan tentang perencanaan dengan analisis numerik.

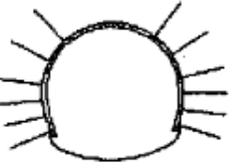
Tabel 2. 4 Daftar perencanaan dengan metode analitik [9]

Analysis method	Object of design	Aim of analysis
Theoretical analysis method	Support	Preliminary study of numerical analysis Evaluate the stability of the support
FEM analysis method	Auxiliary Method support Lining	Grasp the behavior of the ground during excavation Evaluation of the stability of the support Confirm the effect of auxiliary method estimation of environmental impact Grasp the behavior of the lining of the expansive mountain Consider the influence of proximity construction
Framework structure analysis	Lining	Evaluate the structural stability of the lining

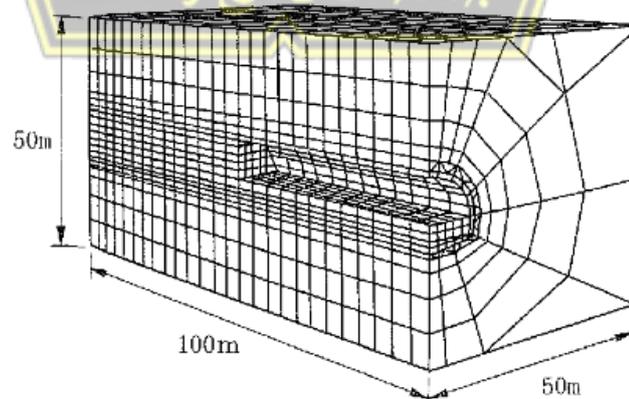
#### 2.8.4.2. Metode analisa FEM

Metode ini dilakukan untuk tujuan menguji perilaku gunung dengan melakukan grand design pada struktur pendukungnya. Dalam metode ini, struktur lapisan yang kompleks dapat direproduksi dan penanganan proses konstruksi dapat ditangani dengan mengekspresikan tanah dalam model elemen. Dalam analisis ini, analisis dua dimensi sering digunakan, namun contoh aplikasi analisis tiga dimensi juga semakin meningkat dalam beberapa tahun terakhir. Kedua analisis diperlihatkan pada Gambar 2.10. untuk metode FEM dua dimensi dan Gambar 2.9. untuk metode FEM tiga dimensi.



STEP	Initial Stress Analysis	STEP	Support of Bench
0		4	
STEP	Excavation of Top heading	STEP	Excavation of Invert
1		5	
STEP	Support of Top heading	STEP	Place Invert
2		6	
STEP	Excavation of Bench		
3			

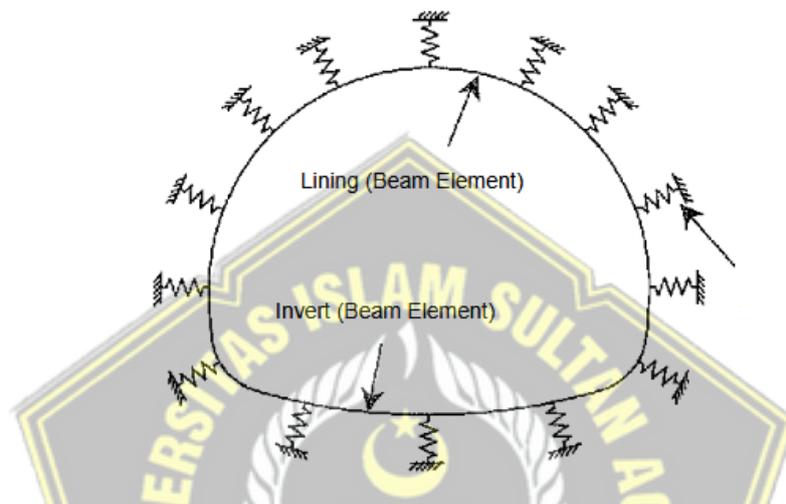
Gambar 2.9 Contoh analisis FEM dua dimensi [10]



Gambar 2.10 Contoh 'Mesh Diagram' untuk analisis FEM tiga dimensi [10]

### 2.8.4.3. Metode Kerangka Struktur

Dalam metode ini, penampang terowongan berbentuk tapal kuda dimodelkan oleh anggota balok pseudo-dibagi dengan anggota linier; dan deformasi terowongan karena beban yang ditopang oleh pegas tanah. Karena relatif mudah ditangani, ini banyak diadopsi dalam desain lapisan. Gambar 2.12. menunjukkan metode kerangka struktur.



Gambar 2.11 Contoh metode analisa kerangka struktur [10]

## 2.9. Konsep Modifikasi Perencanaan

Karena terowongan adalah struktur linier, ia akan menghadapi berbagai struktur geologi. Namun, sulit untuk memahami terlebih dahulu karakteristik tanah secara mendetail. Oleh karena itu, perencanaan awal hanya berdasarkan informasi yang terbatas. Kemudian, konstruksi aktual akan memodifikasi perencanaan seperlunya sambil mengevaluasi hasil pengukuran di lokasi, dan lain-lain. Oleh karena itu, penting untuk mengidentifikasi perpindahan dan tegangan tanah, perpindahan dan tegangan penyangga dengan akurasi tinggi selama konstruksi.

### 2.9.1. Konsep modifikasi perencanaan di konstruksi

Dalam metode konstruksi terowongan batu, penting untuk "memanfaatkan kekuatan gunung secara maksimal tanpa memperburuknya". Selain itu, untuk

menstabilkan oleh interaksi antara tanah dan penyangga, terjadi kelonggaran sehingga terjadi perubahan. Kelonggaran terjadi tergantung pada kekuatan arde, kekakuan penyangga, dan waktu pemasangan. Untuk itulah, berbagai survei dan pengukuran di waktu konstruksi dilakukan. Selain itu, validitas perencanaan tanah dan perencanaan awal yang sesuai dievaluasi sambil memastikan perilaku tanah dan pengaruh dukungan yang menyertai penggalian dengan mengukur, dan lain-lain. Penting untuk melakukan koreksi dan segera merefleksikan desain dan konstruksi.

Sangat penting untuk memodifikasi metode perencanaan / konstruksi asli agar sesuai dengan pegunungan untuk memastikan keselamatan dan keekonomisan konstruksi dan untuk mempertahankan fungsi jangka panjang dan kualitas struktur terowongan. Tabel 2.5 menunjukkan item-item survei dan pengukuran yang sedang dibangun dan hasil evaluasi. Terjemahan Tabel 2.5. dapat dilihat pada Lampiran A5.

Tabel 2.5 Item Survei dan Pengukuran dalam Konstruksi dan Evaluasi Hasil [10]

Investigation and Measurement	Detail item	evaluation of result
Ground Strength	Drilling Speed Using Expositive amounts Excavatiuon Speed (/day)	Confirm ground condition
Face Conditons	Rock Type, Rock Quality, Cracking condition Reason density ,Strike , Tipping	Confirm ground condition prediction condition front of face
Water Inflow	water inflow in face, water pressure in face Drainge Condition	Confirm water inflow
Measurement A	Crown Settlement, Convergence Convergence situation of displacement	Grasp ground action and support stability
Measurement B	Geographical situation around tunnel excavation	Grasp ground action and support stability
Influence of proximity Construction	Behavior of ground surface, ground and surrounding structures Behavior of portal	Grasp influence of proximity structure and ground surface
Weather Condition	weather, Temperatura, amount of rainfall, earrhquake	Estimate damage condition
Ground water at Surrounding Area	River flow ,Ground water Level	Grasp influence of excavation
Work environment in a Tunnel	Temperatura, humidity, oxygen concentration Ventilation mounts , Dust concentraration Inflammable gas and Methane, poisonous gas concentration	Grasp site environment
Enviroment at Srrounding Area	noise, vibration, low frequency sound, drainge coccentration	Grasp environment srrounding area

Dalam beberapa kasus, deformasi besar pada tanah dan perubahan struktur pendukung terjadi bahkan jika konstruksi dilakukan sesuai rancangan. Dalam hal ini, diperlukan pertimbangan pekerjaan tindakan balasan. Penanggulangan utama tercantum di bawah ini:

- a. Sebuah ukuran dukungan
- b. Penguatan muka dan muka muka tanah
- c. Mengubah kerusakan soba, hukum konstruksi (perubahan panjang bangku, pemasangan pembalik, dll.)
- d. Peluncuran awal beton
- e. Mengamankan atau memperluas tunjangan deformasi

### **2.9.2. Konsep Modifikasi Perencanaan di masa depan**

Dalam perencanaan ruas yang akan datang, empat kasus berikut diasumsikan dari situasi pada saat konstruksi.

- a. Sebuah terowongan distabilkan dengan bagian pendukung dan metode konstruksi seperti yang dirancang, dan jumlah perpindahan juga dalam asumsi.
- b. Terowongan stabil pada posisi yang kurang dari jumlah perpindahan yang diasumsikan.
- c. Melengkapi penyangga dan mengubah metode konstruksi diperlukan untuk menekan jumlah perpindahan yang diasumsikan.
- d. Perpindahan yang jauh lebih besar dari perkiraan jumlah perpindahan terjadi, dan akibatnya, tidak mungkin untuk mengamankan penampang, yang menyebabkan peningkatan substansial pada struktur pendukung dan perubahan yang signifikan dalam metode konstruksi.

Tindakan penanggulangan dari empat kasus yang disebutkan di atas dijelaskan di bawah ini.

- (1) "Terowongan distabilkan dengan bagian pendukung dan metode konstruksi seperti yang dirancang"

Karena dianggap bahwa perancangan dan konstruksi sebagian besar sesuai dengan tanah target, dapat dinilai bahwa tidak akan ada masalah di ruas-ruas yang akan datang dengan konstruksi seperti yang dirancang. Namun, dari sudut pandang ekonomi, jika ada kemungkinan untuk mengurangi struktur penyangga, perlu dipertimbangkan untuk mengurangi ukuran penyangga dengan menganalisis hasil pekerjaan pengukuran.

- (2) "Terowongan itu stabil tetapi perpindahannya kecil"

Tanah lebih baik dari yang diasumsikan pada desain awal. Ada kemungkinan member pendukung yang dirancang dan metode konstruksi berlebihan, oleh karena itu perlu diperhatikan pengurangan member pendukung dan perubahan pola pendukung. Namun, ada juga kasus dimana tanah berubah secara tiba-tiba, sehingga penting untuk merumuskan alat ukur yang detail dengan sebaik-baiknya.

- (3) "Mengubah pola penyangga dan metode konstruksi untuk mengurangi jumlah perpindahan yang diperlukan"

Studi tentang metode konstruksi tambahan diperlukan ketika dipastikan bahwa metode konstruksi seperti yang dirancang telah dilaksanakan dan bahwa penyangga dipasang pada waktu yang tepat dan tidak ada masalah dalam konstruksi. Namun, perlu untuk memeriksa secara cermat kemampuan kerja dan efisiensi ekonomi, apakah perubahan pola penyangga baik atau penambahan metode konstruksi tambahan baik. Setelah dilakukan pemeriksaan, perlu dilakukan modifikasi desain.

- (4) "Mengubah dukungan utama dan metode konstruksi untuk mengurangi jumlah perpindahan yang diperlukan"

Diperlukan tinjauan drastis dan modifikasi desain dan metode konstruksi. Berdasarkan hasil pengukuran, perlu dilakukan penelitian terhadap penunjang dan metode konstruksi yang optimal dengan menggunakan metode analitik dan sejenisnya. Juga perlu mempelajari contoh-contoh kondisi tanah yang serupa.

## 2.10. Detail metode perancangan

### 2.10.1. Kondisi perancangan

#### (1) Kondisi Tanah

Karena terowongan batu merupakan suatu struktur yang memanfaatkan fungsi penyangga tanah, maka harus dirancang dengan mempertimbangkan kondisi geografis yang terdiri dari topografi, geologi dan hidrologi. Selain itu, ketika mempertimbangkan kondisi geoteknik, kekuatan dan karakteristik deformasi tanah, stabilitas permukaan dan karakteristik geologi seperti mata air harus diperhatikan.

#### (2) Persyaratan Lokasi

Dalam merancang terowongan, dampak konstruksi terowongan terhadap lingkungan sekitar harus dipertimbangkan. Selain itu, dampak konstruksi di dekatnya dan posisi terowongan khusus juga harus dipertimbangkan. Mengenai lingkungan sekitar pada pembangunan terowongan, perlu diperhatikan hal-hal berikut ini:

- a. Kebisingan dan getaran ledakan, kebisingan yang disebabkan oleh kendaraan konstruksi, getaran dan masalah lalu lintas
- b. Pencemaran air seperti air tanah dan air sungai oleh geser yang digali dan air limbah konstruksi
- c. Kekeringan dan penurunan tanah di sekitar terowongan
- d. Kontaminasi dan peningkatan air tanah melalui injeksi cairan kimia, dll.
- e. Dampak penggalian di permukaan tanah dan bangunan bawah tanah di dekatnya

Di sisi lain, pengaruh terhadap lingkungan sekitar setelah konstruksi dapat dipertimbangkan sebagai berikut.

- a. Fenomena kekeringan sungai dan sumur akibat perubahan lingkungan air tanah

- b. Penurunan permukaan tanah karena kendornya tanah dan penurunan air tanah
- c. Perubahan kualitas air tanah jangka panjang dengan injeksi cairan kimia, dan lain-lain.
- d. Getaran lalu lintas dan kebisingan
- e. Efek dari area portal pada lingkungan sekitarnya.

### (3) Bentuk dan Dimensi

Dalam merancang penampang, perlu diperhatikan bentuk dan dimensi terowongan yang ditentukan dari tujuan dan bentuk penggunaannya. NATM memiliki derajat kebebasan yang tinggi sehubungan dengan bentuk dan ukuran, dan dimungkinkan untuk membangun terowongan dengan berbagai bentuk dan dimensi selama tanah, penyangga, dan lapisan memiliki kemampuan untuk menahan ruang. Itulah salah satu kelebihan NATM. Penampang melintang mencakup pengukur konstruksi yang telah ditentukan sebelumnya, fasilitas yang diperlukan, kelengkapan, dan lain-lain, dan mempertimbangkan keselamatan dan ekonomi.

Selain ukuran konstruksi, terowongan jalan kereta api ditentukan dengan mempertimbangkan batasan konstruksi, ventilasi, penerangan, fasilitas darurat, dinding interior, jalur untuk manajemen, dan drainase.

### (4) Kondisi untuk mengambil pengaruh kekuatan eksternal dalam pertimbangan

Saat merancang terowongan, pengaruh tekanan bumi, tekanan air, gempa bumi, dan lain-lain, yang bekerja setelah terowongan selesai dibangun harus dipertimbangkan seperlunya. Tekanan bumi dikategorikan sebagai tekanan plastik, tekanan tanah lepas, dan tekanan tanah tidak seimbang. Ketika efek tekanan tanah ini diasumsikan, perlu dipertimbangkan dalam rancangan. Tekanan air memiliki tekanan air eksternal dan tekanan air internal, dan perlu dipertimbangkan dalam rancangan ketika diasumsikan bahwa efek tersebut bekerja. Sedangkan untuk gempa bumi, karena terowongan berperilaku menyatu dengan tanah di sekitarnya, pengaruh gempa lebih kecil dibandingkan dengan struktur lainnya. Akan tetapi, dari kasus kerusakan akibat gempa bumi besar di

Jepang, perhatian harus diberikan pada kasus-kasus berikut pada saat perancangan dengan mempertimbangkan pengaruh gempa.

- a. Selubung Bumi dari Terowongan berukuran kecil dan terowongan tersebut berada di pegunungan yang tidak terkonsolidasi
- b. Terowongan itu ada di bagian kegagalan geologi
- c. Tunnel memotong faul aktif

### **2.11. Kondisi Geologi**

Penentuan geologi pada pembangunan terowongan merupakan hal yang paling penting, karena berkaitan dengan kondisi lapisan-lapisan tanah yang kuat untuk dilakukan pengeboran ke arah horizontal. Untuk hal tersebut dikutip pustaka-pustaka tentang kondisi geologi yang berkaitan dengan pembuatan terowongan.

Yunanto (2019) dalam tesisnya yang berjudul “Evaluasi Kondisi Geologi Teknik Bagi Perancangan Terowongan Saluran Pengelak Bendungan Cipanas Provinsi Jawa Barat” [11], menjelaskan bahwa dalam penentuan geologi, metode yang dilakukan adalah dengan metode kualitatif dan kuantitatif. Metode kualitatif, yaitu melakukan observasi lapangan, pengukuran struktur, deskripsi sifat fisik dan rekayasa tanah/batuan, dan kondisi air. Metode kuantitatif adalah melakukan perhitungan dan analisis seperti daya dukung, stabilitas lereng, kompresibilitas dan kerokan tanah.

Rori (2017) dalam jurnalnya yang berjudul “Analisa Tanah Pada Bukaan Terowongan” [12], menjelaskan bahwa dalam konstruksi terowongan, kondisi geologi yang paling umum ditemui adalah jenis tanah lunak dan batuan keras. Terowongan pada tanah lunak berbeda dengan terowongan pada batuan. Istilah tanah lunak mencakup tanah tidak berkohesi seperti pasir dan kerikil sampai tanah kohesif seperti lempung dan lanau. Gaya yang bekerja pada tanah lunak terowongan yaitu beban basah yang mendorongnya ke semua sisi terowongan sehingga terlihat seperti terjepit. Penentuan waktu berdiri di titik penggalian sangat penting karena waktu pemboran pada jenis tanah ini sangat singkat

sehingga resiko longsor akan sering terjadi, sehingga diperlukan perisai untuk mencegahnya. Perisai adalah silinder dari besi atau baja yang mendorong ke dalam tanah lunak dan menghasilkan lubang bulat sempurna untuk menopangnya diikuti dengan aplikasi besi cor/beton pracetak untuk konstruksi permanennya.

Lebih lanjut Rori menjelaskan bahwa pembangunan terowongan di atas batuan masif dilakukan dengan metode pengeboran atau peledakan. Konstruksi terowongan pada lapisan batuan umumnya lebih mudah untuk dikerjakan daripada terowongan pada tanah lunak karena batuan memiliki kekakuan dan stabilitas yang lebih tinggi, dengan demikian perkuatan yang dibutuhkan lebih sederhana. Sedangkan pengeboran batu keras hampir selalu menggunakan peledakan, dengan menempatkan perancah yang disebut Jumbo untuk menempatkan bahan peledak dengan aman dan cepat. Jumbo ini ditempatkan di beberapa lubang pada batu yang akan diledakkan. Lubang yang dihasilkan dari peledakan ini dapat mencapai diameter hingga 10 m. Setelah peledakan selesai, puing-puing batu tersebut dibuang menggunakan truk. Cara lain untuk menghancurkan batu yang keras (hard rock) dilakukan dengan menggunakan mesin bor.

#### **2.11.1. Klasifikasi Massa Batuan**

Klasifikasi massa batuan sangat diperlukan dalam suatu desain terowongan karena di dalam perhitungan sifat teknis massa batuan menjadi hal penting yang perlu diperhatikan. Klasifikasi massa batuan digunakan sebagai parameter penting dalam perancangan model terowongan. Namun, klasifikasi massa batuan tidak digunakan sebagai pengganti desain teknik, tetapi harus digunakan bersama dengan metode lain seperti metode analitik dan metode observasi. Hal ini guna mendapatkan hasil desain yang lengkap sesuai dengan tujuan desain dan kondisi geologi di lapangan. Nilai Rock Mass Rating (RMR) suatu batuan dapat digunakan dalam analisis konstruksi terowongan dan analisis stabilitas lereng dari portal pada terowongan.

Klasifikasi massa batuan yang paling banyak digunakan untuk memulai kegiatan di bidang geomekanik adalah klasifikasi RQD dari Deere (1964). Untuk pengamatan awal inti bor dari eksplorasi dan pengeboran geoteknik dengan menggunakan RQD dan Fracture Frequency. Adapun penilaian kualitas massa batuan yang paling banyak digunakan pada tahap awal adalah RMR Bieniawski (1989) [13] dan Q-System yang dikemukakan oleh Barton, Lien dan Lunde (1974). Nilai RMR suatu batuan dapat digunakan dalam analisis konstruksi terowongan dan analisis stabilitas lereng dari portal pada terowongan. Untuk menentukan kualitas massa rock, penelitian ini akan menggunakan metode RMR dan GSI.

#### **2.11.1.1. Metode RMR**

Hermawan & Hamdhan (2019) dengan penelitiannya yang berjudul “Analisa Geoteknik Terowongan Kereta Api Kebasen Menggunakan Metode Elemen Hingga 3D” [14], menjelaskan bahwa dalam mengklasifikasikan massa batuan berdasarkan sistem klasifikasi RMR, Bieniawski menggunakan 5 parameter utama dan 1 parameter pengontrol untuk Uniaxial Compressive Strength (UCS) dari bahan batuan utuh membagi massa batuan.

1. Uniaxial Compressive Strength (UCS).
2. Rock Quality Designation (RQD).
3. Kondisi air tanah (Groundwater conditions).
4. Jarak antar (spasi) kekar (Spacing of discontinuities).
5. Kondisi kekar (Condition of discontinuities).
6. Orientasi Kekar (Orientation of discontinuities).

RMR dapat digunakan sebagai panduan untuk memilih penyangga pada terowongan. Panduan ini bergantung pada beberapa faktor seperti kedalaman bukaan dari permukaan, ukuran dan bentuk terowongan serta metode penggalian yang akan digunakan.

Setiap parameter memiliki bobot atau *rating* yang berbeda-beda tergantung hasil penyelidikan lapangan yang dilakukan, dengan demikian nilai dari parameter RMR tersebut dapat diketahui. Dalam menentukan kondisi massa batuan tersebut berdasarkan kelasnya seperti pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Kualitas Massa Batuan [14]

Kelas Batuan	Bobot Batuan	Tipe Batuan	Stand-Up Time	Properties	
				C (Kpa)	$\theta$ (°)
I	81-100	Sangat Baik	20 Tahun - 15 M Span	>400	>45
II	61-80	Baik	1 Tahun – 10 M Span	300-400	35-45
III	41-60	Sedang	1 Minggu – 5 M Span	200-300	25-35
IV	21-40	Jelek	10 Jam – 2,5 M Span	100-200	15-25
V	<20	Sangat Jelek	30 Menit – 1 M Span	<100	<15

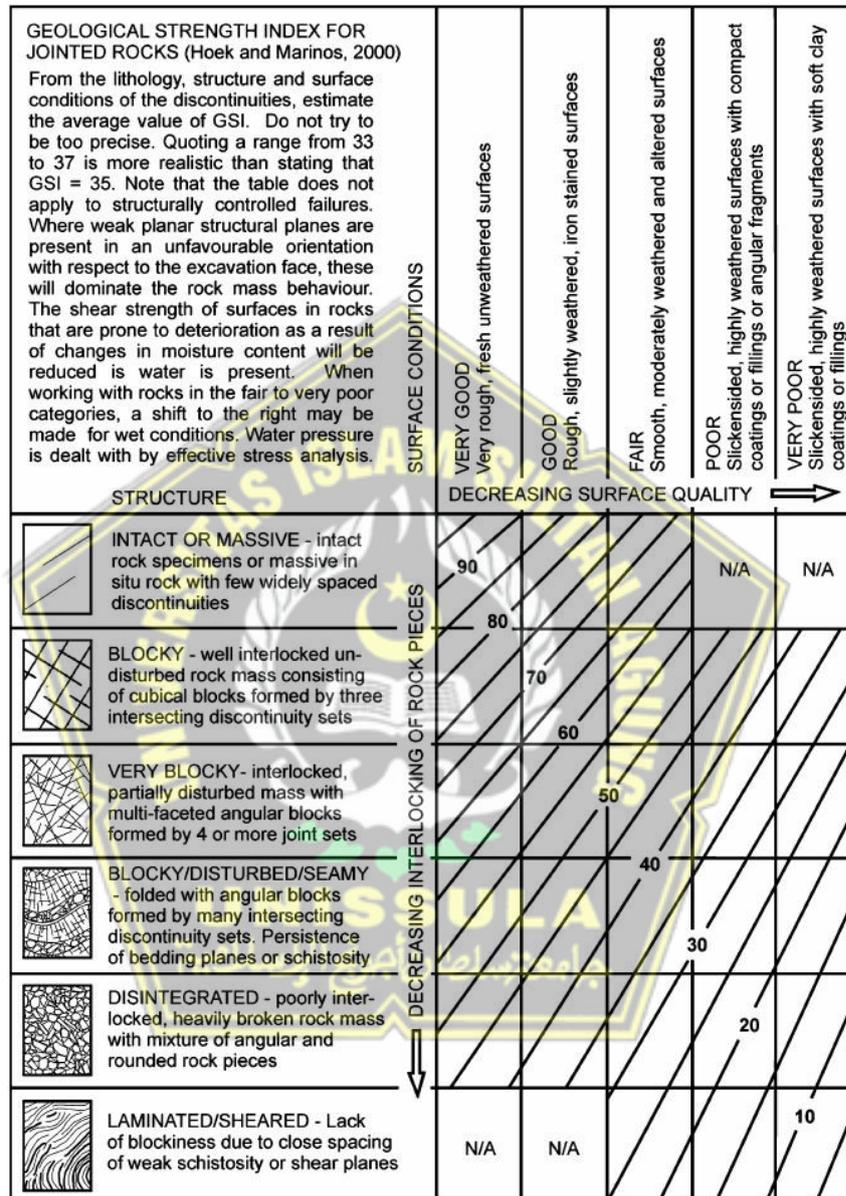
#### 2.11.1.2. Metode Geological Strength Index (GSI)

Pamuji dkk. (2018) dalam jurnalnya yang berjudul “Pengaruh Geological Strength Index (GSI) terhadap nilai faktor keamanan melalui simulasi kestabilan lereng tambang” [15] menjelaskan bahwa GSI adalah salah satu data geologi yang digunakan untuk mengetahui sifat fisik dan mekanik dari batuan sehingga dapat menentukan Faktor Keamanan (FK) sebuah lereng. GSI menggunakan Kriteria Kegagalan Hoek-Brown untuk mengukur struktur massa batuan dan kondisi kerusakan di atas kekuatannya, dengan asumsi batuan belum diganggu.

Hal terpenting dalam klasifikasi GSI adalah melalui deskripsi kualitatif geologi teknik dan massa batuan yang mampu memperkirakan pengurangan kekuatan massa batuan melalui pengamatan lapangan secara visual. GSI menggabungkan 2 (dua) parameter utama yaitu struktur sifat balok, dan kondisi permukaan berupa kekasaran, pelapukan atau alterasi, dan isian pada Gambar 2.1 (Hoek & Marinos 2000) [16].

Hoek (2007) [17] mengklasifikasikan massa batuan menjadi lima kelas utama berdasarkan klasifikasi dari Bieniawski (1989) [14] seperti pada Tabel 2.7.

Klasifikasi tersebut didasarkan pada total nilai GSI yang diperoleh dengan melihat parameter penting pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Chart estimasi nilai GSI untuk batuan terkekarkan [16]

Tabel 2.7 Kualitas GSI massa batuan [14]

<b>Nilai GSI</b>	95 – 76	75 – 56	55 – 36	35 – 21	< 20
<b>Kualitas Massa batuan</b>	Sangat Baik	Baik	Sedang	Jelek	Sangat Jelek

**2.11.2. Kriteria keruntuhan Mohr-Coloumb**

Yulianto (2016) dalam jurnalnya yang berjudul “Studi Perilaku Terowongan Bor Dibawah Fondasi Tiang-Rakit Menggunakan Plaxis 8.6” [18], menyebutkan analisis perhitungan disederhanakan dengan asumsi semua perilaku tanah menggunakan model Mohr-Coulomb. Mohr (1910) mengemukakan teori yang menyatakan bahwa kondisi keruntuhan suatu material terjadi karena kombinasi dari keadaan kritis antara tegangan normal dan tegangan geser. Hubungan fungsional antara tegangan normal dan tegangan geser pada bidang keruntuhan dinyatakan dengan persamaan 2.1 berikut:

$$\tau = f(\sigma) \dots\dots\dots \text{pers. 2.9.}$$

di mana,

$\tau$  = tegangan geser pada saat terjadinya keruntuhan atau kegagalan (*failure*)

$\sigma$  = tegangan normal pada saat terjadinya keruntuhan atau kegagalan (*failure*)

Kuat geser tanah merupakan gaya tahanan yang diberikan oleh butiran tanah terhadap tekanan atau tarikan. Atas dasar pengertian tersebut maka jika tanah mengalami pembebanan maka akan tertahan oleh kohesi tanah yang bergantung pada jenis tanah dan berat jenisnya, serta gesekan antara butiran tanah yang ukurannya berbanding lurus dengan tegangan normal pada bidang geser. Coulomb (1776) mendefinisikan  $f(\sigma)$  pada Persamaan berikut:

$$\tau = c + \sigma(\tan\varphi) \dots\dots\dots \text{pers. 2.10.}$$

di mana,

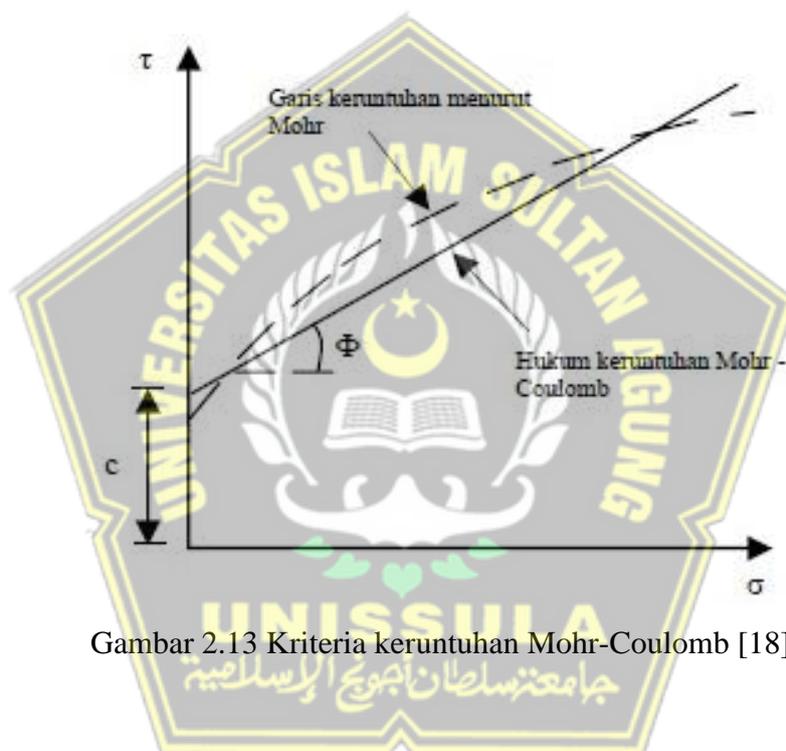
$\tau$  = kuat geser tanah (kN/m<sup>2</sup>)

$c$  = kohesi tanah (kN/m<sup>2</sup>)

$\varphi$  = sudut gesek tanah (°)

$\sigma$  = tegangan normal pada bidang runtuh ( $\text{kN/m}^2$ )

Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb dapat terlihat pada Gambar 2.13. Kegagalan geser pada material akan terjadi ketika tegangan yang bekerja berada di luar garis selubung kegagalan. Garis putus-putus merepresentasikan garis kegagalan aktual menurut Mohr dengan fungsi melengkung, sedangkan garis linear nyata merepresentasikan garis runtuh Mohr-Coulomb yang merupakan aproksimasi dari garis kegagalan Mohr.



Gambar 2.13 Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb [18]

Pemodelan kriteria runtuh Mohr-Coulomb untuk kekar batuan adalah:

$$F = |\tau_j| + \sigma_n \tan \phi_j = 0 \dots \dots \dots \text{pers. 2.11.}$$

di mana,

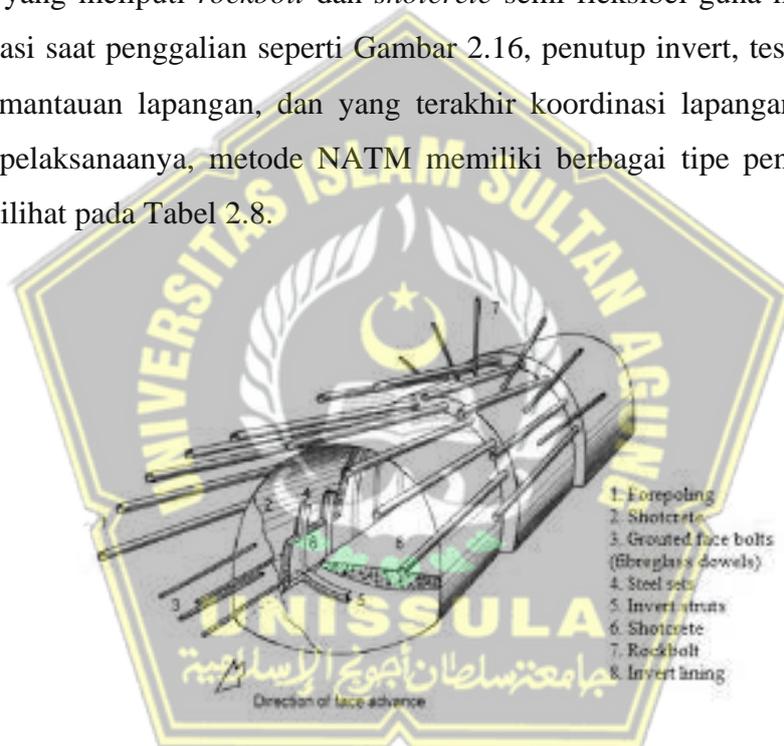
$\phi_j$  = sudut geser kekar batuan (joint rock friction angle)

$\tau_j$  = tegangan geser pada bidang kekar

$\sigma_n$  = tegangan normal pada permukaan kekar

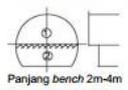
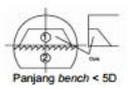
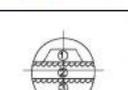
### 2.11.3. Penggalian dengan Metode NATM (New Austrian Tunneling Method)

Metode penggalian terowongan mengacu pada sistem ekskavasi pada proyek Terowongan Kroya-Kutoarjo KM 424+100 s/d 426+200 antara Tambak-Gombang (K.17-07) Purwokerto dengan meninjau makalah Hatmoko & Artati (2018) yang berjudul “Analisis Stabilitas Terowongan Dengan Perkuatan *Wiremesh* Dan *Rockbolt* Menggunakan Metode Elemen Hingga” [19]. Dalam penelitian ini, beberapa prinsip utama yang perlu diperhatikan dalam konstruksi NATM yaitu, kekuatan massa batuan di sekitarnya, sistem pendukung awal dan primer yang meliputi *rockbolt* dan *shotcrete* semi fleksibel guna meminimalisir deformasi saat penggalian seperti Gambar 2.16, penutup invert, tes laboratorium dan pemantauan lapangan, dan yang terakhir koordinasi lapangan. Sedangkan dalam pelaksanaannya, metode NATM memiliki berbagai tipe penggalian yang dapat dilihat pada Tabel 2.8.



Gambar 2.14 Sistem pendukung pada terowongan dengan metode NATM [18]

Tabel 2.8 Pemilihan Metode Penggalian dan Karakteristiknya [19]

Metode penggalian	Pembagian muka bidang galian	Kondisi media yang sesuai	Kategori batuan/tanah	Kelebihan	Kekurangan
Penggalian seluruh muka bidang galian dengan bench tambahan	 Panjang bench 2m-4m	<ul style="list-style-type: none"> <li>Media batuan/tanah dengan kondisi yang cukup stabil, tetapi penggalian dengan metode seluruh muka silit untuk dilakukan</li> <li>Media batuan/tanah yang bagus, tetapi diselingi dengan media yang buruk</li> </ul>	CI dan CII	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hemat tenaga kerja karena penggalian bagian atas dan bawah dilakukan secara mekanis dan paralel</li> <li>Manajemen konstruksi termasuk pengendalian keamanan lebih mudah karena penggalian muka bidang galian dilakukan bertahap</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Jika muka bidang galian menjadi tidak stabil, silit untuk mengganti dengan metode penggalian lainnya.</li> </ul>
Metode penggalian dengan bench	Metode penggalian dengan bench panjang  Panjang bench > 5D	<ul style="list-style-type: none"> <li>Media yang cukup stabil, tetapi metode seluruh muka bidang galian silit untuk dilakukan</li> <li>Metode penggalian cincin (ring cut) diterapkan jika muka bidang galian tidak stabil</li> </ul>	DII dan DIII	<ul style="list-style-type: none"> <li>Penggalian bagian atas heading dan bench yang dilakukan bergantian dapat mengurangi penggunaan peralatan dan tenaga kerja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Penggalian yang bergantian akan memperpanjang masa konstruksi</li> </ul>
	Metode penggalian dengan bench pendek  D < Panjang bench < 5D	<ul style="list-style-type: none"> <li>Metode penggalian cincin (ring cut) diterapkan jika muka bidang galian tidak stabil</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Dapat beradaptasi dengan perubahan kondisi media</li> <li>Penggalian bagian atas heading dan bench yang bergantian mengurangi penggunaan peralatan dan tenaga kerja</li> </ul>	
	Metode penggalian dengan bench kecil  Panjang bench < 5D	<ul style="list-style-type: none"> <li>Jika diperlukan pengendalian konvergensi</li> <li>Squeezing ground yang memerlukan penutupan dini dari penampang penggalian</li> <li>Metode penggalian cincin (ring cut) diterapkan jika muka bidang galian tidak stabil</li> </ul>	DIII dan E	<ul style="list-style-type: none"> <li>Perutupan (closure) lebih awal dengan memasang lantai kerja mudah untuk dilakukan</li> <li>Penggalian bagian atas heading dan bench yang bergantian mengurangi penggunaan peralatan dan tenaga kerja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pemilihan peralatan konstruksi cenderung menjadi terbatas jika direncanakan untuk bekerja pada dasar heading bagian atas</li> </ul>
	Metode penggalian dengan bench ganda 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Media yang cukup bagus untuk terowongan dengan penampang yang tinggi dan besar</li> <li>Media yang lunak dan memerlukan bagian kecil heading untuk menstabilkan muka bidang galian</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Muka bidang galian dapat dengan mudah distabilisasi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deformasi yang besar dapat terjadi jika penghentian penggalian ditunda pada media yang lunak</li> <li>Panjang setiap bench terbatas dan daerah kerja juga terbatas</li> <li>Diperlukan pelaksanaan dengan hati-hati terhadap pembuangan material pada setiap bench</li> </ul>

## 2.12. Stabilitas Terowongan

Faktor penting dalam mempertimbangkan proses penggalian terowongan adalah menjamin kestabilan tanah di area galian dengan menahan batuan dari proses penggalian hingga pemasangan sistem tulangan permanen. Stabilitas terowongan biasanya diperhitungkan sebelum proses penggalian dilakukan yang bertujuan untuk menentukan apakah sistem penguatan sementara diperlukan atau tidak sebelum implementasi pemasangan sistem tulangan permanen.

Zakariya & Laksono (2019) dalam Jurnalnya yang berjudul “Pemodelan Pelaksanaan Terowongan Cisumdawu Menggunakan Program Plaxis 2D Dan Plaxis 3D Tunnel” [20], menguraikan stabilitas terowongan berdasarkan Broms dan Bennemark (1967) [21]. Salah satu faktor penting yang perlu diperhatikan dalam penggalian terowongan adalah menjaga kestabilan lapisan tanah pada permukaan mesin pelindung agar tidak roboh dan memastikan bahwa stabilitas banyak hubungannya dengan keselamatan pekerjaan penggalian terowongan. Broms dan Bennemark memberikan solusi persamaan untuk menentukan jumlah kestabilan muka terowongan saat penggalian dilakukan pada persamaan berikut:

$$N = \frac{(qs + (C + R)\gamma - \sigma_T)}{C_u} \dots\dots\dots \text{pers. 2.12.}$$

di mana:

$q_s$  = beban permukaan tanah (kN/m<sup>2</sup>)

$C$  = kedalaman titik *crown* dari terowongan (m)

$R$  = jari-jari terowongan (m)

$\gamma$  = berat jenis tanah total (kN/m<sup>3</sup>)

$\sigma_T$  = *face pressure* (kN/m<sup>2</sup>)

$c_u$  = kuat geser tanah dalam kondisi *undrained* (kN/m<sup>2</sup>).

Secara empiris, ketidakstabilan terjadi saat  $N > 6$ . Keruntuhan terowongan akan terjadi saat nilai  $N$  melebihi 6.

Davis dkk., (1980) [22] mengembangkan persamaan Broms dan Bennemark yang digunakan dalam kasus terowongan dengan bukaan vertikal tanpa adanya tekanan pendukung untuk meningkatkan stabilitas permukaan terowongan. Oleh Davis, persamaan Broms dan Bennemark diterapkan pada persamaan 2.8 mengenai kestabilan muka terowongan dengan menambahkan *support pressure*.

$$N = \frac{(q_s - s + (C + R)\gamma - \sigma_T)}{c_u} \dots\dots\dots \text{pers. 2.13.}$$

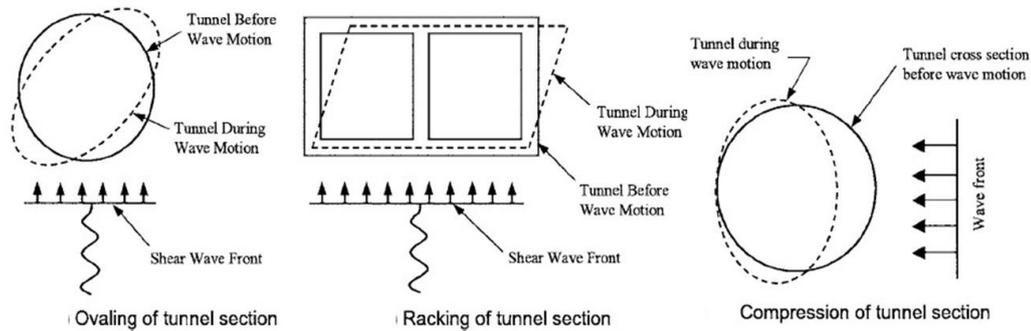
di mana:

$s$  = *support pressure* (kN/m<sup>2</sup>), sedangkan  $q_s$ ,  $C$ ,  $R$ ,  $\gamma$ , dan  $\sigma_T$  sama dengan persamaan 2.8. di atas.

### 2.13. Faktor Kegempaan

Darmawan & Satyarno (2018) dalam jurnalnya yang berjudul “Analisis Perilaku Terowongan Sirkular Akibat Beban Gempa Dengan Pemodelan Elemen Hingga” [23], menjelaskan bahwa pengaruh gempa bumi terhadap struktur bawah tanah dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu getaran tanah dan kerusakan tanah. Getaran tanah mengacu pada deformasi tanah yang ditimbulkan oleh gelombang seismik yang merambat melalui kerak bumi. Faktor utama yang mempengaruhi getaran tanah adalah bentuk tanah, dimensi dan kedalaman struktur, sifat tanah atau batuan sekitarnya, sifat struktur, dan berat tanah yang ditinjau. Tiga jenis

deformasi respons seismik pada struktur bawah tanah adalah aksial kompresi dan ekstensi, momen longitudinal, dan oval yang dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Mode deformasi dari terowongan akibat gelombang seismic (Owen dan Scholl, 1981) [24]

Prinsip analisis desain struktur bangunan terhadap pengaruh beban gempa statik adalah mengganti gaya horizontal yang bekerja pada struktur akibat gerakan tanah dengan gaya statis ekuivalen. Dalam merancang rencana gempa untuk setiap jenis infrastruktur struktur dan komponennya harus memiliki sistem penahan gaya lateral dan vertical yang mampu memberikan kekuatan, kekakuan, dan kapasitas disipasi energi yang cukup untuk tahan terhadap rencana beban gempa sesuai kriteria deformasi dan batas kekuatan yang dibutuhkan. Kriteria desain gempa untuk setiap jenis infrastruktur dapat dilihat pada Tabel 2.9 dengan merujuk standar SNI – 8460: 2017 [25].



Tabel 2.9 Kriteria Desain Gempa [25]

Peruntukan	Umur rencana (tahun)	Probabilitas terlampaui (%)	Periode ulang (tahun)	Kriteria keamanan	Referensi
Bangunan gedung dan non-gedung	50	2	2.500	-	SNI 1726:2012
Jembatan konvensional	75	7	1.000	-	SNI 2833:201x AASHTO (2012)
Dinding penahan Abutmen Jembatan	75	7	1.000	FK>1,5 (terhadap geser saat mengalami beban statik) FK>2 (terhadap guling saat mengalami beban statik) FK>1,1 (terhadap beban pseudostatik)	WSDOT, FHWA-NJ-2005-002
Timbunan oprit				FK>1,1	
Bendungan	100	1	10.000, <i>Safety Evaluation Earthquake (SEE)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tidak terjadi aliran air yang tidak terkendali</li> <li>• Deformasi tidak melebihi 0,5 dari tinggi jagaan</li> <li>• Deformasi pada filter tidak boleh melebihi 0,5 tebal filter</li> <li>• <i>Spillway</i> tetap berfungsi setelah terjadi gempa rencana</li> </ul>	ICOLD No 148, 2016,
	100	50	145 <i>Operating Basis Earthquake (OBE)</i>	Kerusakan minor setelah terjadi gempa rencana	
Bangunan pelengkap bendungan	50	2	2500	-	
Terowongan	100	10	1.000 tahun		

### 2.13.1. Gempa Rencana untuk Terowongan

Yunanto (2019) [11] menjelaskan bahwa dalam desain seismik untuk terowongan mengacu pada persyaratan perencanaan gempa untuk jembatan, yaitu:

1. Bahaya gempa harus diklasifikasi menggunakan spektrum respons percepatan dan faktor situs untuk kelas situs yang sesuai.
2. Konstruksi harus direncanakan dengan kemungkinan untuk runtuh kecil tetapi akibatnya bisa mendapatkan kerusakan yang signifikan dan gangguan layanan jika gempa dengan kemungkinan terlampaui 7% dalam 75 tahun atau yang setara dengan periode ulang 1000 tahun.
3. Jika analisis riwayat waktu dinamis digunakan, maka faktor modifikasi respon (R) diambil 1 untuk semua tipe bangunan bawah dan hubungan antara elemen struktur.
4. Gaya seismik harus diasumsikan bekerja dari semua arah lateral; Faktor modifikasi respon yang sesuai (R) harus digunakan di kedua arah sumbu substruktur ortogonal.

Dalam menentukan beban gempa, persyaratan yang harus dipenuhi yaitu persyaratan berdasarkan faktor amplifikasi seperti pada Tabel 2.10 dan Tabel 2.11 serta klasifikasi situs seperti pada Tabel 2.12 dari kondisi tanah disekitar lokasi menurut AASHTO, 2012 [26].

Tabel 2.10 Faktor Amplifikasi PGA dan Periode 0,2 detik ( $F_{pga}$  dan  $F_a$ ) [26]

Kelas Situs	$PGA \leq 0.1$	$PGA = 0.2$	$PGA = 0.3$	$PGA = 0.4$	$PGA \geq 0.5$
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
Batuan keras (SA)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Batuan (SB)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Tanah keras (SC)	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
Tanah sedang (SD)	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
Tanah lunak (SE)	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
Tanah khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

Tabel 2.11 Besarnya nilai factor amplifikasi untuk 1 detik ( $F_v$ ) [26]

Kelas Situs	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 \geq 0.5$
Batuan keras (SA)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Batuan (SB)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Tanah keras (SC)	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
Tanah sedang	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
Tanah lunak (SE)	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
Tanah khusus	SS	SS	SS	SS	SS

di mana:

- $PGA$  = Percepatan puncak batuan dasar (SB) mengacu pada peta gempa dengan periode ulang rencana sesuai persyaratan infrastruktur yang digunakan.
- $S_s$  = Percepatan spektral respons horizontal di batuan dasar (SB) pada periode 0,2 detik dengan periode ulang rencana sesuai persyaratan infrastruktur yang digunakan.
- $S_1$  = Percepatan spektral respons horizontal di batuan dasar (SB) pada periode 1,0 detik dengan periode ulang rencana sesuai persyaratan infrastruktur yang digunakan
- $SF$  = Lokasi yang memerlukan investigasi geoteknik dan analisis respons spesifik-situs.

Tabel 2.12 Klasifikasi Situs [26]

Klasifikasi Situs	$\bar{v}_s$ (m/detik)	$\bar{N}_{SPT}$ atau $\bar{N}_{SPTch}$	$\bar{s}_u$ (kPa)
SA (batuan keras)	>1.500	N/A	N/A
SB (batuan dasar)	750 sampai 1.500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	$\geq 100$
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m dengan karakteristik sebagai berikut : 1. Indeks Plastisitas, $PI > 20$ , 2. Kadar air, $(w) \geq 40\%$ , dan 3. Kuat geser niralir, $\bar{s}_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus yang membutuhkan penyelidikan geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik - situs)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik seperti : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitive, tanah bersementasi lemah</li> <li>• Lempung sangat organic dan/atau gambut (ketebalan, <math>H &gt; 3</math>m)</li> <li>• Lempung berplastisitas tinggi (ketebalan, <math>H &gt; 7.5</math> m dengan</li> <li>• Indeks Plastisitas, <math>PI &gt; 75</math>)</li> <li>• Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan <math>H &gt; 35</math> m dengan <math>\bar{s}_u &lt; 50</math> kPa</li> </ul>		

di mana:

$\bar{N}_{SPT}$  = Nilai rata rata tahanan penetrasi standar lapangan rata-rata

$\bar{N}_{SPTch}$  = Nilai rata rata tahanan penetrasi standar untuk lapisan tanah non kohesif

$\bar{v}_s$  = Nilai rata rata kecepatan gelombang geser (m/detik)

$\bar{s}_u$  = Nilai rata rata kecepatan gelombang geser (m/detik)

## BAB III

### METODOLOGI

#### 3.1 Pendahuluan

Bab metodologi ini ditulis untuk menjelaskan langkah – langkah yang dilakukan dalam menghitung ulang Konstruksi Terowongan Kereta Api Ijo Baru di Kroya – Kutoharjo KM 424 + 100 s.d KM 426 + 200 antara Tambak – Gombang. Dimulai dengan studi pustaka yang berkaitan dengan konstruksi terowongan Ijo Baru yang telah dijabarkan pada Bab II, metodologi dilanjutkan dengan pengumpulan data seperti data geologi, data tanah, dan data teknis konstruksi terowongan kemudian dilakukan perhitungan ulang lining terowongan dengan menghitung perhitungan beton tidak bertulang dan perhitungan beton bertulang kemudian dilakukan control terhadap perhitungan tersebut lalu dilakukan analisis dan pembahasan hingga perhitungan memenuhi syarat yang ditentukan dan perhitungan dinyatakan selesai. Uraian metode penelitian di atas dapat diringkas pada bagan alir Gambar 3.1.

#### 3.2 Perhitungan Terowongan

##### 3.2.1 Perhitungan Pembebanan

Beban yang ada dalam perhitungan konstruksi terowongan yaitu tekanan tanah, tekanan air, beban mati, beban reaksi, dan tambahan beban pada terowongan.

Beban mati (G)

Beban mati yang dihitung merupakan beban vertikal yang berkerja sepanjang titik melintang terowongan.

$$G = \gamma c . t \dots\dots\dots \text{pers. 3.1}$$

$$P_G = w/2\pi . R_c \dots\dots\dots \text{pers. 3.2}$$

di mana:

- G = beban mati (kN/m<sup>2</sup>)
- P<sub>G</sub> = reaksi beban mati pada dasar terowongan (kN/m<sup>2</sup>)
- w = Berat lining per meter (kN/m<sup>2</sup>)
- γ<sub>c</sub> = berat isi beton terowongan (kN/m<sup>2</sup>)
- t = tebal lining (m)
- R<sub>c</sub> = Jari-jari dalam lining (m)

Tekanan atau beban vertikal pada bagian atas terowongan (P<sub>1</sub>)

$$P_{e1} = P_0 + \sum \gamma_i \cdot H_i + \sum \gamma_j \cdot H_j \dots\dots\dots \text{pers. 3.3}$$

$$P_{w1} = \gamma_w \cdot H_w \dots\dots\dots \text{pers. 3.4}$$

$$P_1 = P_{e1} + P_{w1} \dots\dots\dots \text{pers. 3.5}$$

di mana:

- P<sub>e1</sub> = tekanan tanah atas terowongan (kN/m<sup>2</sup>)
- P<sub>w1</sub> = tekanan air atas terowongan (kN/m<sup>2</sup>)
- P<sub>1</sub> = tekanan vertikal atas terowongan (kN/m<sup>2</sup>)
- P<sub>0</sub> = beban tambahan (kN/m<sup>2</sup>)
- γ<sub>i</sub> = Berat tanah diatas muka air tanah (kN/m<sup>3</sup>)
- γ<sub>j</sub> = Berat tanah dibawah muka air tanah (kN/m<sup>3</sup>)
- γ<sub>w</sub> = berat air (kN/m<sup>3</sup>)
- H<sub>i</sub> = tinggi tanah di atas muka air tanah (m)
- H<sub>j</sub> = tinggi tanah di bawah muka air tanah (m)
- H<sub>w</sub> = H<sub>j</sub>

Tekanan atau beban vertikal pada dasar terowongan (P<sub>2</sub>)

$$P_{w2} = \gamma_w \cdot H_2 \dots\dots\dots \text{pers. 3.6}$$

$$P_2 = P_{e1} + P_{w1} + \pi P_G + - P_{w2} \dots\dots\dots \text{pers. 3.7}$$

di mana:

- P<sub>w2</sub> = tekanan air dasar terowongan (kN/m<sup>2</sup>)
- P<sub>2</sub> = Tekanan vertikal pada dasar terowongan (kN/m<sup>2</sup>)
- P<sub>e1</sub> = tekanan tanah atas terowongan (kN/m<sup>2</sup>)

- $P_{w1}$  = tekanan air atas terowongan ( $\text{kN/m}^2$ )
- $P_G$  = reaksi beban mati pada dasar terowongan ( $\text{kN/m}^2$ )
- $D$  = diameter terowongan (m)
- $H_w$  = tinggi tanah di bawah muka air tanah (m)
- $P_{e2}$  =  $P_2$

Tekanan atau beban lateral pada bagian atas terowongan ( $q_1$ )

$$q_{e1} = \lambda (P_{e1} + \gamma' \times t/2) \dots\dots\dots \text{pers. 3.8}$$

$$q_{w1} = \gamma_w \cdot H_1 \dots\dots\dots \text{pers. 3.9}$$

$$q_1 = q_{e1} + q_{w1} \dots\dots\dots \text{pers. 3.10}$$

di mana:

- $q_{e1}$  = tekanan tanah lateral ( $\text{kN/m}^2$ )
- $q_{w1}$  = tekanan air lateral ( $\text{kN/m}^2$ )
- $\lambda$  = Koefisien tekanan tanah lateral
- $q_1$  = tekanan lateral pada bagian atas terowongan ( $\text{kN/m}^2$ )
- $\gamma'$  = Berat tanah yang terendam air ( $\text{kN/m}^3$ )
- $H_2$  = tinggi tanah di atas terowongan (m)
- $t$  = tebal lining (m)

Tekanan atau beban lateral pada Tekanan atau beban lateral pada dasar terowongan ( $q_2$ )

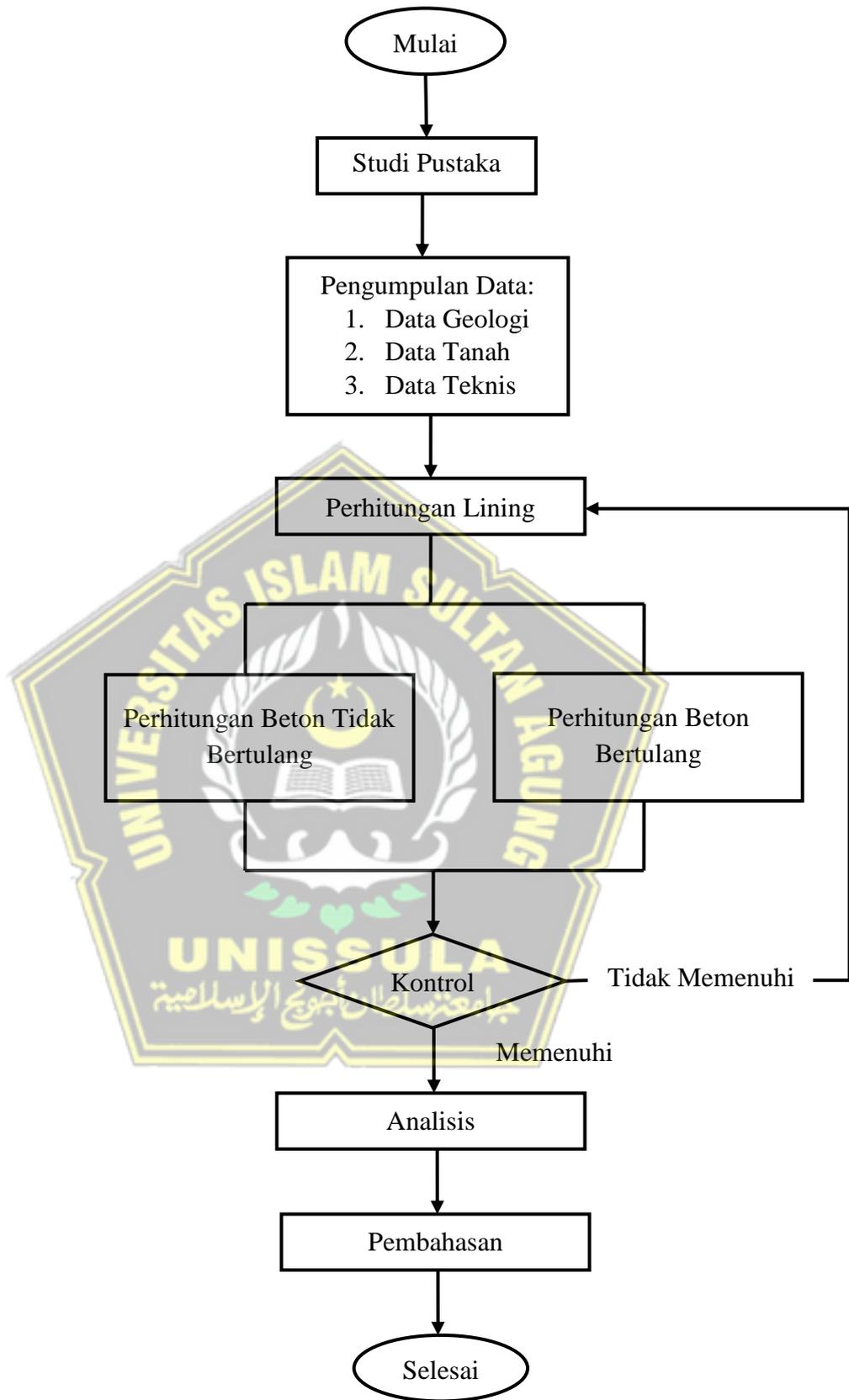
$$q_{e2} = \lambda \{ p_{e1} + \gamma' \times (2R_o - t/2) \} \dots\dots\dots \text{pers. 3.11}$$

$$q_{w2} = \gamma_w \cdot H_2 \dots\dots\dots \text{pers. 3.12}$$

$$q_2 = q_{e2} + q_{w2} \dots\dots\dots \text{pers. 3.13}$$

di mana:

- $q_{e2}$  = tekanan tanah lateral ( $\text{kN/m}^2$ )
- $q_{w2}$  = tekanan air lateral ( $\text{kN/m}^2$ )
- $q_2$  = tekanan lateral pada dasar terowongan ( $\text{kN/m}^2$ )
- $R_o$  = jari-jari luar lining (m)
- $H_2$  = tinggi tanah di atas terowongan (m)
- $t$  = tebal lining (m)



Gambar 3.1 Bagan alir

### 3.2.2 Perhitungan Tebal Lining

a. Perhitungan tambahan tegangan pada lining

Menghitung tambahan tegangan tekan (P)

$$P = \frac{\sigma_c (b^2 - a^2)}{2b^2} \dots\dots\dots \text{pers. 3.14}$$

di mana:

- D = diameter terowongan (m)
- r = jari-jari terowongan (m)
- a = jari-jari dalam terowongan (m)
- b = jari-jari luar terowongan (m)
- t = tebal lining (m)
- $\sigma_c$  = tegangan tekan beton yang diijinkan ( $\text{kg/cm}^2$ )

Menghitung tambahan tegangan geser (P)

$$P = \frac{t \cdot \tau_c}{\frac{b}{2} \times \sin \alpha} \dots\dots\dots \text{pers. 3.15}$$

di mana:

- $\tau_c$  = Tegangan geser beton yang diijinkan ( $\text{kg/cm}^2$ )
- $\alpha$  = Sudut gesekan internal tanah ( $^\circ$ )
- $b/2$  = tinggi kerucut geser (m)
- $= r \cos \alpha$

b. Perhitungan tebal lining dengan beton tanpa tulangan

Menghitung Tambahan Tegangan Pada Batuan ( $P_r$ )

$$P_r = \sigma t \frac{Er \frac{mr}{mr+1}}{Ec \frac{mc^2}{mc^2-1}} \times \frac{(b^2 + a^2) + (b^2 - a^2)/mc}{2.b^2} \dots\dots\dots \text{pers. 3.16}$$

di mana:

- $P_r$  = tambahan tegangan pada batuan ( $\text{kg/cm}^2$ )
- $m_r$  = rasio modulus pada batuan

- $m_c$  = rasio modulus pada beton
- $E_r$  = modulus batuan setelah injeksi ( $\text{kg/cm}^2$ )
- $E_c$  = modulus elastisitas beton ( $\text{kg/cm}^2$ )
- $E_s$  = modulus elastisitas baja ( $\text{kg/cm}^2$ )
- $D$  = diameter terowongan (m)
- $a$  = jari-jari dalam terowongan (m)
- $\sigma_c$  = tegangan tekan beton yang diijinkan ( $\text{kg/cm}^2$ )
- $b$  = jari-jari luar terowongan (m)

Menghitung tegangan tekanan pada beton ( $P_c$ )

$$P_c = \frac{\sigma_t (b^2 - a^2)}{(b^2 + a^2)} \dots \dots \dots \text{pers. 3.17}$$

di mana:

- $P_c$  = tambahan tegangan pada beton ( $\text{kg/cm}^2$ )
- $a$  = jari-jari dalam terowongan (m)
- $\sigma_c$  = tegangan tekan beton yang diijinkan ( $\text{kg/cm}^2$ )
- $b$  = jari-jari luar terowongan (m)

Sehingga didapatkan tebal lining dengan perbandingan sebagai berikut:

$$P_c = P_w - P_r \dots \dots \dots \text{pers. 3.18}$$

c. Perhitungan tebal lining dengan beton bertulang

Menghitung luas penampang tulangan ( $A_{st}$ )

$$\frac{1}{A_{st}} = \frac{\sigma_{st}}{a \sigma_t} \times \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} - \frac{m - 1}{b - a} \dots \dots \dots \text{pers. 3.19}$$

di mana:

- $A_{st}$  = luas penampang tulangan ( $\text{m}^2$ )
- $t$  = tebal lining (m)
- $a$  = jari-jari dalam terowongan (m)
- $b$  = jari-jari luar terowongan (m)
- $m$  = rasio modular

$\sigma_{st}$  = tegangan izin baja (kg/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_c$  = tegangan tekan beton yang diijinkan (kg/cm<sup>2</sup>)

Menentukan beban radial yang dapat dipikul oleh besi pada beton bertulang ( $Pi_s$ )

$$Pi_s = \frac{Ast(m-1)\tau_c}{b/2 \sin \alpha} \dots\dots\dots \text{pers. 3.20}$$

di mana:

Ast = luas penampang tulangan (m<sup>2</sup>)

$\tau_c$  = tegangan geser beton (kg/cm<sup>2</sup>)

$\alpha$  = Sudut gesekan internal tanah (°)

b/2 = tinggi kerucut geser (m)

Menentukan besar tekanan radial yang mendesak lining (Pi)

$$Pi = Po(1 - \sin \alpha) \left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{2\sin \alpha}{1 - \sin \alpha}} \dots\dots\dots \text{pers. 3.21}$$

di mana:

Pi = besar tekanan radial yang mendesak lining (kg/cm<sup>2</sup>)

W = berat jenis batuan (kg/cm<sup>2</sup>)

H = tinggi lapisan (m)

Po = beban tambahan di atas terowongan (kg/cm<sup>2</sup>)

$\alpha$  = Sudut gesekan internal tanah (°)

Menentukan beban radial yang dapat dipikul beton pada beton bertulang ( $Pi_c$ )

$$Pi_c = \frac{t \cdot \tau_c}{b/2 \sin \alpha} \dots\dots\dots \text{pers. 3.22}$$

di mana:

$Pi_c$  = beban radial yang dapat dipikul beton pada beton bertulang (kg/cm<sup>2</sup>)

t = tebal lining (m)

b/2 = tinggi kerucut geser (m)

$$Pi = Pi_c + Pi_s \dots\dots\dots \text{pers. 3.23}$$

### 3.2.3 Kontrol terhadap tebal lining

Setelah mendapatkan tebal lining, kemudian dicek apakah lining tersebut sudah memenuhi angka aman atau tidak.

#### a. Kontrol terhadap beton tanpa tulangan

Nilai tebal lining yang sudah didapat kemudian disubsitusikan pada pers. 3.15 untuk mengetahui tambahan tegangan pada batuan ( $P_r$ ) dan pers. 3.16 untuk tambahan tegangan pada beton ( $P_c$ ).

Menghitung tambahan tegangan air terhadap dinding terowongan ( $P_w$ )

$$P_w = \frac{\sigma_w (b^2 - a^2)}{2b^2} \dots\dots\dots \text{pers. 3.24}$$

di mana:

- $P_w$  = tambahan tegangan air terhadap dinding terowongan ( $\text{kg/cm}^2$ )
- $\sigma_w$  = tekanan air keluar ( $\text{kg/cm}^2$ )
- $b$  = jari-jari luar terowongan (m)
- $a$  = jari-jari dalam terowongan (m)

Menghitung tegangan injeksi terhadap dinding terowongan ( $P_q$ )

$$P_q = \frac{\sigma_c (b^2 - a^2)}{2.b^2} \dots\dots\dots \text{pers. 3.25}$$

di mana:

- $P_q$  = tambahan tegangan air terhadap dinding terowongan ( $\text{kg/cm}^2$ )
- $\sigma_q$  = tekanan injeksi ( $\text{kg/cm}^2$ )
- $b$  = jari-jari luar terowongan (m)
- $a$  = jari-jari dalam terowongan (m)

Kontrol terhadap tebal lining dapat ditentukan dari perbandingan berikut

$$P_w \leq P + P_r + P_c \dots\dots\dots \text{pers. 3.26}$$

$$P_q - P_w \geq P_r + P_c \dots\dots\dots \text{pers. 3.27}$$

di mana:

$P$  = tinggi tekanan air ke dalam ( $\text{kg/cm}^2$ )

$P_r$  = tambahan tegangan pada batuan ( $\text{kg/cm}^2$ )

$P_c$  = tambahan tegangan pada beton ( $\text{kg/cm}^2$ )

$P_q$  = tambahan tegangan injeksi ( $\text{kg/cm}^2$ )

$P_w$  = tambahan tegangan air ( $\text{kg/cm}^2$ )

b. Kontrol terhadap beton dengan tulangan

Menghitung tegangan tekan efektif pada beton ( $\sigma_c'$ )

$$\sigma_c' = \sigma_c \frac{(b-a)+(m-1)A_{st}}{(b-a)} \dots\dots\dots \text{pers. 3.28}$$

di mana:

$\sigma_c'$  = tegangan tekan efektif pada beton ( $\text{kg/cm}^2$ )

$\sigma_c$  = tegangan tekan beton yang diijinkan ( $\text{kg/cm}^2$ )

$b$  = jari-jari luar terowongan (m)

$a$  = jari-jari dalam terowongan (m)

$m$  = rasio modular

$A_{st}$  = luas penampang tulangan ( $\text{m}^2$ )

Karena pengaruh tulangan pada lining maka dipakai tegangan tekan efektif ( $\sigma_c'$ ) pada beton, kemudian disubstitusikan pada pers. 3.16 untuk mendapatkan tambahan tegangan pada batuan ( $P_r$ ).

Menghitung tambahan tegangan pada beton bertulang ( $P_c$ )

$$P_c = \frac{A_{st} \cdot \sigma_{st}}{a} \dots\dots\dots \text{pers. 3.29}$$

di mana:

$\sigma_{st}$  = tegangan baja izin ( $\text{kg/cm}^2$ )

- Ast = luas penampang tulangan ( $m^2$ )  
a = jari-jari dalam terowongan (m)

Kontrol terhadap tebal lining dapat ditentukan dari perbandingan berikut

$$P \leq P_r + 60\% P_c \dots\dots\dots \text{pers. 3.30}$$

di mana:

- P = tinggi tekanan air ke dalam ( $kg/cm^2$ )  
P<sub>r</sub> = tambahan tegangan pada batuan ( $kg/cm^2$ )  
P<sub>c</sub> = tambahan tegangan pada beton ( $kg/cm^2$ )



## BAB IV

### PERHITUNGAN ULANG LINING

#### 4.1. Pendahuluan

Bab ini dilakukan untuk melakukan perhitungan ulang terhadap lining terowongan Ijo Baru. Di dalam melakukan perhitungan lining terlebih dahulu ditampilkan konstruksi lining terowongan Ijo Baru dan spesifikasi bahan-bahan yang dipergunakan. Perhitungan ulang kemudian akan menggunakan data konstruksi yang ada sejauh data yang diperoleh, Sedangkan untuk data tanah dan data geologi menggunakan sifat umum dari tanah yang ada di sekitar terowongan Ijo Baru.

#### 4.2. Konstruksi Terowongan Ijo Baru

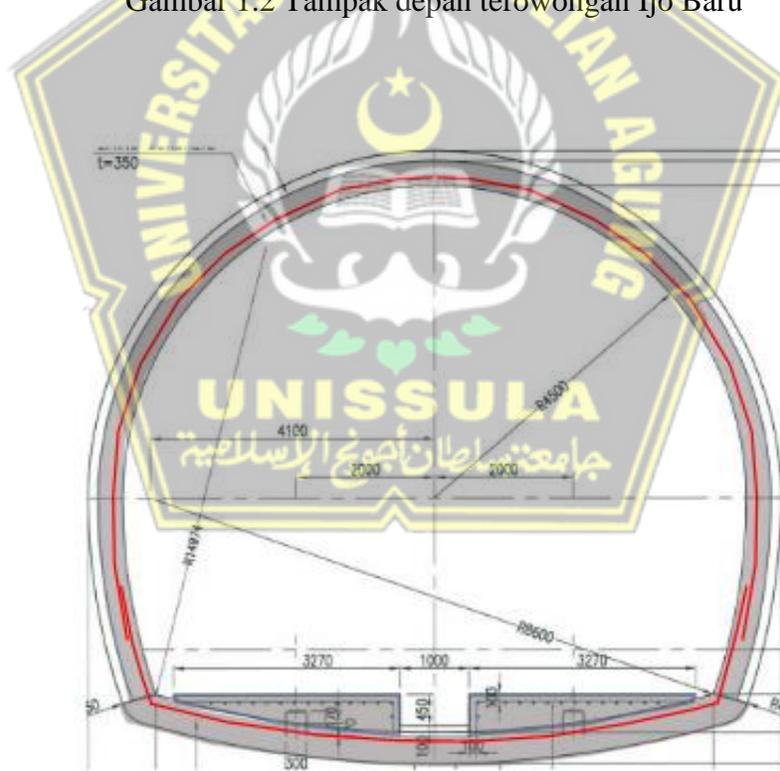
Konstruksi terowongan jalan kereta api Ijo Baru adalah konstruksi terowongan berbentuk Tapal Kuda yang mempunyai panjang 579 meter. Lining terowongan dari beton bertulang dengan ketebalan 30,00 cm dan 35,00 cm [3]. Tampak depan terowongan Ijo Baru ini diperlihatkan pada Gambar 1.2., sedangkan penampang melintang diperlihatkan pada Gambar 4.1., sedangkan dimensi terowongan diberikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Dimensi terowongan

Bagian	Ukuran (mm)
Diameter lapisan segmental (D)	9.000
Radius sentroid lapisan segmental ( $R_0$ )	4.500
Lebar garis (b)	1.200
Ketebalan lining terowongan (t)	300 dan 350



Gambar 1.2 Tampak depan terowongan Ijo Baru



Gambar 4.1 Penampang melintang terowongan Ijo Baru dengan demensinya [3]

### 4.3. Spesifikasi bahan dan parameter perhitungan

Data yang diperoleh dari konstruksi terowongan Ijo Baru adalah mutu dan modulus elastisitas beton masing-masing sebesar  $f_c' = 24$  MPa dan  $E_c = 23000$  MPa, dan tebal lapisan tanah di atas terowongan (overburden)  $H = 12,30$  meter. Data perhitungan dan kondisi tanah diberikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.2 Data kondisi tanah [27]

Parameter	Nilai	Satuan
Poisson ratio ( $\nu$ )	0.2	-
Nilai variable N – SPT tanah	14,6	-
Masa jenis tanah (lempung kepasiran) ( $\gamma_b$ )	18	kN/m <sup>3</sup>
Berat tanah yang terendam air ( $\gamma'$ )	8	kN/m <sup>3</sup>
Sudut gesekan internal tanah ( $\phi$ )	30	° (derajat)
Kohesi (c)	0	-
Koefisien reaksi tanah dasar (k)	50	Mn/m <sup>3</sup>
Koefisien tekanan tanah lateral ( $\lambda$ )	0.4	-
Tinggi tanah di bawah muka air tanah ( $H_w$ )	11,7	m'

### 4.4. Perhitungan ulang lining terowongan Ijo Baru

Perhitungan ulang lining terowongan Ijo baru dimulai dengan memberikan mutu beton dan besi tulangan yang dipergunakan dan data teknis konstruksi terowongan Ijo Baru adalah sebagai berikut:

#### 1) Beton

- Mutu beton  $f_c' = 24$  Mpa
- Kekuatan tekan yang diijinkan  $\delta_{ca} = 600$  N/m<sup>2</sup>
- Kekuatan geser yang diijinkan  $\tau_{ca} = 80$  N/m<sup>2</sup>

2) Besi tulangan (Ulir D25)

- Tegangan yang diijinkan = 21100 N/m<sup>2</sup>
- Modulus elastisitas baja = 2,1 x 10<sup>6</sup> N/m<sup>2</sup>

Data teknis konstruksi:

Jari-jari terowongan (R <sub>O</sub> )	= 4.500 mm
Modulus elastitas (E)	= 23000 MPa
Momen Inersia per segmen (I)	= 0,0064 cm <sup>4</sup>
Luas baja non pratekan (A)	= 0.48 m <sup>2</sup>
Konstanta pegas rotasi untuk momen positif K <sub>OP</sub>	= 18.070 kN.m/radial
Konstanta pegas rotasi untuk momen negatif K <sub>ON</sub>	= 32.100 kN.m/radial

#### 4.5. Beban-beban yang diperhitungkan

Perhitungan lining diawali dengan memberikan beban-beban atau tekanan-tekanan yang bekerja pada terowongan.

##### 4.5.1. Beban mati (G)

Beban mati terowongan dinyatakan dalam 'G' yang besarnya ada pada persamaan 3.1. Sedangkan reaksi beban mati pada dasar terowongan dihitung dengan persamaan 3.2.

$$G = 26,5 \times 0,3 = 7,95 \text{ kN/m}^2$$

$$P_G = \frac{24}{2 \times 3,14} \times 4,5 = 17,2 \text{ kN/m}^2$$

di mana:

$$\gamma_c = \text{berat isi beton terowongan} = 26.5 \text{ kN/m}^3$$

$$w = \text{berat lining per meter} = 24 \text{ kN/m}^3$$

$$t = \text{tebal lining eksisting} = 30 \text{ mm} = 0,30 \text{ m}$$

#### 4.5.2. Tekanan atau beban vertikal pada bagian atas terowongan (P1)

Tekanan vertikal pada bagian atas terowongan terdiri atas tekanan tanah vertikal  $P_{el}$  yang besarnya sama dengan persamaan 3.3. dan tekanan air vertikal  $P_{wl}$  yang besarnya sama dengan persamaan 3.4, di mana  $\gamma_w$  berat jenis air dan  $H_w$  adalah tinggi muka air tanah. Dengan demikian:

$$\text{Tekanan tanah: } P_{el} = 0 + 18 \cdot 0,6 + 8 \cdot 11,7 = 104,4 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Tekanan air: } P_{wl} = 10 \times 11,7 = 117 \text{ kN/m}^2$$

di mana:

$$P_0 = \text{beban tambahan} = 0 \text{ kN/m}^2$$

$$\gamma_i = \text{Berat tanah diatas muka air tanah} = 18 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_j = \text{Berat tanah dibawah muka air tanah} = 8 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_w = \text{berat jenis air} = 10 \text{ kN/m}^3$$

$$H_i = \text{tinggi tanah di atas muka air tanah} = 12,3 \text{ m}$$

$$H_j = \text{tinggi tanah di bawah muka air tanah} = 11,7 \text{ m}$$

$$H_w = H_j$$

Dari kedua tekanan tersebut, besarnya tekanan vertikal pada bagian atas terowongan dihitung dengan persamaan 3.5 sebagai berikut.

$$P_1 = 104,4 + 117 = 221,4 \text{ kN/m}^2$$

#### 4.5.3. Tekanan atau beban vertikal pada dasar terowongan (P2)

Tekanan vertikal pada dasar terowongan merupakan total tekanan vertikal pada atas terowongan ( $P_1$ ) dan reaksi beban mati pada dasar terowongan ( $P_G$ ) dikurangi dengan tekanan air dasar terowongan ( $P_{w2}$ ) pada persamaan 3.6, sehingga didapatkan persamaan 3.7 berikut.

$$P_{w2} = 10 (9 + 11,7) = 207 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{e2} = 104,4 + 117 + (3,14 \times 17,2) - 207 = 68,408 \text{ kN/m}^2$$

di mana:

$$P_{e1} = \text{tekanan tanah atas terowongan} = 104,4 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{w1} = \text{tekanan air atas terowongan} = 117 \text{ kN/m}^2$$

$$P_G = \text{reaksi beban mati pada dasar terowongan} = 17,2 \text{ kN/m}^2$$

$$D = \text{diameter terowongan} = 9 \text{ m}$$

$$H_w = \text{tinggi tanah di bawah muka air tanah} = 11,7 \text{ m}$$

#### 4.5.4. Tekanan atau beban lateral pada bagian atas terowongan ( $q_l$ )

Tekanan lateral pada bagian atas terowongan terdiri atas tekanan tanah lateral  $q_{e1}$  (persamaan 3.8) dan tekanan air lateral  $q_{w1}$  (persamaan 3.9)

$$\begin{aligned} \text{Tekanan tanah lateral : } q_{e1} &= 0,4 \left( 104,4 + 8 + \frac{0,3}{2} \right) \\ &= 0,4(112,55) \\ &= 45,02 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Tekanan air : } q_{w1} = 10 \times 12,3 = 123 \text{ kN/m}^2$$

di mana:

$$P_{e1} = \text{tekanan tanah atas terowongan} = 104,4 \text{ kN/m}^2$$

$$\lambda = \text{Koefisien tekanan tanah lateral} = 0,4$$

$$\begin{aligned}\gamma_w &= \text{berat jenis air} = 10 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma' &= \text{Berat tanah yang terendam air} = 8 \text{ kN/m}^3 \\ H_1 &= \text{tinggi tanah di atas terowongan} = 12,3 \text{ m} \\ t &= \text{tebal lining} = 0,3 \text{ m}\end{aligned}$$

Dengan demikian tekanan lateral pada bagian atas terowongan dapat dihitung dengan persamaan 3.10 berikut.

$$q_l = 45,02 + 123 = 168,02 \text{ kN/m}^2$$

#### 4.5.5. Tekanan atau beban lateral pada dasar terowongan ( $q_2$ )

Tekanan atau beban lateral pada bagian dasar terowongan terdiri atas tekanan tanah lateral  $q_{e1}$  (persamaan 3.11) dan tekanan air lateral  $q_{w1}$  (persamaan 3.12)

$$\begin{aligned}\text{Tekanan tanah lateral : } q_{e2} &= 0,4 \left( 104,4 + 8 + \left( 2 \times 4,5 - \frac{0,3}{2} \right) \right) \\ &= 0,4(121,25) \\ &= 48,5 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

$$\text{Tekanan air lateral : } q_{w2} = 10 \times 21,3 = 213 \text{ kN/m}^2$$

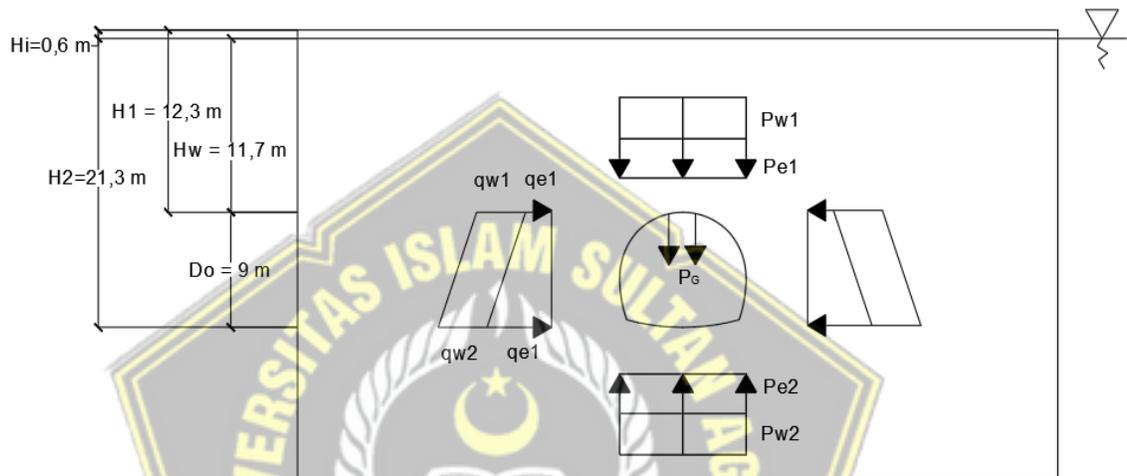
di mana:

$$\begin{aligned}P_{e1} &= \text{tekanan tanah atas terowongan} = 104,4 \text{ kN/m}^2 \\ \lambda &= \text{Koefisien tekanan tanah lateral} = 0,4 \\ \gamma_w &= \text{berat jenis air} = 10 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma' &= \text{Berat tanah yang terendam air} = 8 \text{ kN/m}^3 \\ H_2 &= \text{tinggi tanah di atas terowongan} = 21,3 \text{ m} \\ R_o &= \text{jari-jari luar lining} = 4,5 \text{ m} \\ t &= \text{tebal lining} = 0,3 \text{ m}\end{aligned}$$

Dengan demikian tekanan lateral pada bagian dasar terowongan dapat dihitung dengan persamaan 3.13 berikut.

$$q_2 = 48,4 + 213 = 261,5 \text{ kN/m}^2$$

Kondisi beban dan tekanan-tekanan tersebut di atas ditunjukkan pada Gambar 4.2



Gambar 4.2 Kondisi beban dan tekanan pada terowongan

#### 4.6. Perhitungan Tebal Lining Terowongan Ijo Baru

Perhitungan lining terowongan Ijo Baru dilakukan dengan beton tanpa tulangan dan dengan beton bertulang.

Perhitungan ini diawali dengan memberikan data teknis terowongan sebagai berikut:

- Tebal lining eksisting ( $t$ ) = 30 cm dan 35 cm
- Jari-jari terowongan bagian atas ( $R$ ) = 4.50 m'
- Perbandingan antara tekanan tanah lateral dan vertikal  $k = 1$  (hidro-statis) dan  $k = 0,9$  (hidro-dinamis).
- Sudut gesekan internal tanah ( $\varphi$ ) =  $30^\circ$

- e. Diameter terowongan (D) = 9 m'
- f. Tinggi tekanan air kedalam saat operasi normal adalah 50 m, dan saat diam yang ekstrim adalah 70 m
- g. Angka poisson batuan = 6
- h. Modulus perubahan bentuk badan (setelah injeksi) = 90.000 kg/cm<sup>2</sup>
- i. Data Beton

Mutu beton	K-300
Poison ratio beton	0,20
Modulus elastisitas beton	225.000 kg/cm <sup>2</sup>
Tegangan tekan beton yang diijinkan	18 kg/cm <sup>2</sup>
Tegangan geser beton yang diijinkan	8 kg/cm <sup>2</sup>
- untuk tekanan air keluar	80 kg/cm <sup>2</sup>
- untuk tekanan injeksi	175 kg/cm <sup>2</sup>

- j. Data Baja
- Tegangan yang diijinkan 2110 kg/cm<sup>2</sup>
- Modulus elastisitas baja 210.000 kg/cm<sup>2</sup>
- Poison rasion baja 3,33
- Tekanan yang diijinkan
- Untuk operasi normal 60% tegangan yang diijinkan
- Untuk ekstrim diam 80% tegangan yang diijinkan

#### 4.6.1. Menghitung Tambahan Tegangan Pada Lining

Untuk menghitung tambahan tegangan pada lining dilakukan dengan menggunakan perbandingan antara tekanan tanah lateral dan vertikal 'k' = 1.00 dan 'k' = 0.90 dengan tebal lining eksisting yaitu 30 cm.

- 1) Dengan nilai 'k' = 1.00 (hidro-statis) tambahan tegangan tekan yang terjadi dapat dihitung dengan persamaan 3.14.

$$P = \frac{18 (23,040 + 20,250)}{2 \times 23,040} = 1,090 \text{ kg/cm}^2$$

di mana:

D = diameter terowongan = 9 m'

a = jari-jari dalam terowongan  
 $= \frac{1}{2} D = \frac{1}{2} \times 9,00 = 4,5 \text{ m} \rightarrow a^2 = 20,250 \text{ m}^2$

b = jari-jari luar terowongan  
 $= a + t = (4,5 + 0,30) \text{ m} = 4,8 \text{ m} \rightarrow b^2 = 23,040 \text{ m}^2$

t = tebal lining = 30 cm

$\sigma_c$  = tegangan tekan beton yang diijinkan = 18 kg/cm<sup>2</sup>

- 2) Dengan nilai k = 0.9 (Hidro-dinamis) tambahan tegangan geser yang terjadi dapat dihitung dengan persamaan 3.15.

$$P = \frac{0,3 \times 8}{3,897 \times 0,50} = \frac{2,4}{2,241} = 1,232 \text{ kg/cm}^2$$

di mana:

t, dan b, = keterangan di rumus 3.13

$\tau_c$  = Tegangan geser beton yang diijinkan = 8 kg/cm<sup>2</sup>

$\varphi$  = Sudut gesekan internal tanah = 30<sup>0</sup>

$\sin 30^0$  = 0,50

b/2 = a .  $\cos \alpha = 4,5 \times \cos 30^0 = 4,5 \times 0,866 = 3,897$

#### 4.6.2. Perhitungan Tebal Lining Dengan Beton Tanpa Tulangan

Rumus untuk menghitung tambahan tegangan pada batuan dapat dihitung menggunakan persamaan 3.16.

$$P_r = 18 \frac{0,9 \times 10^5 \frac{6}{6+1}}{2,25 \times 10^5 \frac{25}{25^2-1}} \times \frac{(b^2 + 4,5^2) + (b^2 - 4,5^2)/5}{2 \cdot b^2}$$

$$P_r = 18 \frac{0,7713 \times 10^5}{2,3435 \times 10^5} \times \frac{5 \cdot (b^2 + 20,25^2) + (b^2 - 20,25^2)}{10 \cdot b^2}$$

$$P_r = 5,9239 \times \frac{6 \cdot b^2 \times 81}{10 \times b^2}$$

$$P_r = \frac{35,5434 \cdot b^2 \cdot x \cdot 479,8359}{10 \cdot b^2}$$

di mana :

- $P_r$  = tambahan tegangan pada batuan
- $m_r$  = rasio modulus pada batuan = 6
- $m_c$  = rasio modulus pada beton = 5
- $E_r$  = modulus batuan setelah injeksi = 90000 kg/cm<sup>2</sup>
- $E_c$  = modulus elastisitas beton = 225000 kg/cm<sup>2</sup>
- $E_s$  = modulus elastisitas baja = 2100000 kg/cm<sup>2</sup>
- $D$  = diameter terowongan = 9,00 m
- $a$  = jari-jari dalam terowongan = 4,50 m
- $\sigma_t$  = tegangan tekan beton yang diijinkan = 18 kg/cm<sup>2</sup>
- $b$  = jari-jari luar terowongan.

Rumus untuk menghitung tambahan tegangan pada beton dapat dihitung menggunakan persamaan 3.17.

$$P_c = \frac{18 (b^2 - 4,50^2)}{(b^2 + 4,50^2)}$$

$$P_c = \frac{18 \cdot b^2 - 364,5}{b^2 + 20,25}$$

di mana :

$P_c$  = tambahan tegangan pada beton

$\sigma_b, a, b$ , = keterangan di persamaan 3.16.

Tinggi tekanan air kedalam saat diam yang ekstrim adalah 70 meter, dan tekanan P adalah 70 ton/m<sup>2</sup> atau 7 kg/cm<sup>2</sup>. Untuk mendapatkan nilai 'b' maka didapatkan persamaan 3.19 sebagai berikut.

$$\frac{18 \cdot b^2 - 364,5}{b^2 + 20,25} = 7 - \frac{35,5434 \cdot b^2 - 479,8359}{10 \cdot b^2}$$

$$18 \cdot b^2 - 364,5 = (b^2 + 20,25) \left( 7 - \frac{35,5434 \cdot b^2 - 479,8359}{10 \cdot b^2} \right)$$

$$18 \cdot b^2 - 364,5 = 7 \cdot b^2 + 141,75 - \frac{(35,5434 \cdot b^2 - 479,8359)(b^2 + 20,25)}{10 \cdot b^2}$$

$$18 \cdot b^2 - 364,5 = 7 \cdot b^2 + 141,75 - \frac{35,543 \cdot b^4 + 719,754 \cdot b^2 - 479,836 \cdot b^2 - 9716,677}{10 \cdot b^2}$$

$$(18 \cdot b^2 - 364,5) \times 10b^2 = \left( 7 \cdot b^2 + 141,75 - \frac{35,543 \cdot b^4 + 719,754 \cdot b^2 - 479,836 \cdot b^2 - 9716,677}{10 \cdot b^2} \right) \times 10b^2$$

$$180 \cdot b^4 - 3645 \cdot b^2 = 70 \cdot b^4 + 1417,5 \cdot b^2 - 35,543 \cdot b^4 - 719,754 \cdot b^2 - 479,836 \cdot b^2 - 9716,677$$

$$145,543 \cdot b^4 - 3862,97 \cdot b^2 - 9716,677 = 0$$

$$b^4 - 26,54 \cdot b^2 + 66,76 = 0$$

Agar b dapat dihitung, maka persamaan disederhanakan dengan menanggapi  $b^2 =$  dan persamaan menjadi:

$$a^2 - 26,54 a + 66,76 = 0$$

Nilai a dicari dengan menggunakan persamaan kuadrat dan diambil nilai yang terbesar.

$$a_{12} = \frac{26,54 \pm \sqrt{704,3726 - 267,04}}{2}$$

$$a_{12} = \frac{26,54 \pm \sqrt{437,3316}}{2} = \frac{26,54 \pm 20,92}{2}$$

$$a_1 = 23,73 \quad a_2 = 2,81$$

$$\text{Jadi } b = \sqrt{a_1} = \sqrt{23,73} = 4,87 \text{ cm}$$

Dengan demikian tebal lining tanpa tulangan adalah:

$$t = 4,87 - 4,50 = 0,37\text{m} = \mathbf{37\text{cm}}$$

#### 4.6.3. Perhitungan tebal lining dengan beton bertulang

Untuk menghitung lining terowongan dengan tulangan, terlebih dahulu diperkirakan tebal liningnya yaitu 35 cm, kemudian menghitung luas penampang tulangan dengan persamaan 3.19, sehingga didapatkan:

$$\frac{1}{Ast} = \frac{0,6 \times 2110}{4,5 \times 18} \times \frac{4,85^2 + 4,5^2}{4,85^2 - 4,5^2} - \frac{9,38 - 1}{4,85 - 4,5}$$

$$\frac{1}{Ast} = \frac{1266}{82,44} \times \frac{23,522 + 20,25}{23,522 - 20,25} - \frac{8,38}{0,35}$$

$$\frac{1}{Ast} = 15,356 \times \frac{43,77}{3,275} - 23,942$$

$$\frac{1}{A_{st}} = 209,059 - 23,937 = 185,123$$

$$A_{st} = \frac{1}{185,123} = 0,0054 \text{ m}^2/\text{m} = 0,540 \text{ cm}^2/\text{cm}$$

di mana:

$$t = \text{tebal lining (perkiraan)} = 35 \text{ cm}$$

$$a = \text{jari-jari dalam terowongan} = D/2 = 4,50 \text{ m}$$

$$b = \text{jari-jari luar terowongan} = D/2 + t = 4,50 + 0,35 = 4,85 \text{ m}$$

$$m = \text{rasio modular} = E_s / E_c = (21.1 \times 10^5) / (2.25 \times 10^5) = 9.38$$

$$\sigma_{st} = \text{tegangan baja izin} = 2110 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow 60 \%$$

$$\sigma_t = \text{tegangan tekan beton yang diijinkan} = 18 \text{ kg/cm}^2$$

Menentukan beban radial yang dapat dipikul oleh besi pada beton bertulang ( $Pi_s$ ) pada persamaan 3.20

$$Pi_s = \frac{0,54 \times (9,38 - 1) \times 9,232}{389,7 \times 0,5} = \frac{41,776}{194,85} = 0,214 \text{ kg/cm}^2$$

di mana:

$$\tau_c = \text{tegangan geser beton dijumlahkan dengan tambahan tegangan geser} \\ = 8 + 1,232 = 9,232 \text{ kg/cm}^2$$

$$\alpha = \text{perubahan total dari sudut tendon balok pratekan} = 30^\circ$$

$$\sin 30^\circ = 0,50$$

$$\cos 30^\circ = 0,866$$

$$b/2 = a \cdot \cos 30^\circ = 4,5 \times 0,866 = 3,897 \text{ m} = 389,7 \text{ cm}$$

Menentukan besar tekanan radial yang mendesak lining ( $Pi$ ) pada persamaan 3.21

$$Pi = 31,98 (1 - \sin 30^\circ) (1/3)^{\frac{2 \sin 30^\circ}{1 - \sin 30^\circ}}$$

$$Pi = 31,98 (0,5) (1/3)^{\frac{1}{2}} = 1,777 \text{ kg/cm}^2$$

di mana:

$$W_r = \text{berat jenis batuan} = 2,6 \text{ kg/m}^3$$

$$H = \text{tinggi lapisan} = 12,3 \text{ m}$$

Po = beban tambahan di atas terowongan

$$= W_r \times H = 2,6 \times 12,3 = 31,98$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$(r/R) = 1/3$$

Untuk mendapatkan nilai tebal lining terowongan (t), dapat dihitung dengan persamaan 3.23 yaitu tekanan radial yang mendesak lining ( $P_i$ ) sama dengan beban radial yang dapat dipikul beton bertulang ( $P_{i_c}$ ) dijumlahkan dengan beban radial yang dapat dipikul oleh besi pada beton bertulang ( $P_{i_s}$ ):

$$1,777 = \frac{t \cdot \tau_c}{b/2 \sin \alpha} + 0,214$$

$$1,777 = \frac{t (9,232)}{389,7 \cdot \sin 30^\circ} + 0,214$$

$$t = \frac{1,563 \times 194,85}{9,232}$$

$$t = 32,97 \sim 33 \text{ cm}$$

Perkiraan tebal lining (t) = 35 cm > 33 cm (memenuhi perkiraan)

Maka didapatkan ketebalan lining untuk beton bertulang = **33 cm** ∞ **35cm**.

#### 4.6.4. Kontrol terhadap tebal lining terowongan

##### 4.6.4.1 Kontrol terhadap beton tanpa tulangan (t= 37 cm)

Menghitung tambahan tegangan pada batuan ( $P_r$ ) dengan persamaan 3.16 didapatkan hasil sebagai berikut.

$$P_r = \frac{35,543 \cdot b^2 + 479,835}{10 b^2}$$

$$P_r = \frac{35,543 \times 23,717 + 479,835}{237,17}$$

$$P_r = \frac{842,973 + 479,835}{237,17} = 5,58 \text{ kg/cm}^2$$

di mana :

$m_r$  = rasio modulus pada batuan = 6

$m_c$  = rasio modulus pada beton = 5

$E_r$  = modulus batuan setelah injeksi = 90000 kg/cm<sup>2</sup>

$E_c$  = modulus elastisitas beton = 225000 kg/cm<sup>2</sup>

$E_s$  = modulus elastisitas baja = 2100000 kg/cm<sup>2</sup>

$D$  = diameter terowongan = 9.00 m

$a$  = jari-jari dalam terowongan = 4.50 m

$\sigma_t$  = tegangan geser yang diijinkan untuk tekanan air keluar = 18 kg/cm<sup>2</sup>

$b$  = jari-jari luar terowongan = 4,87 m'

$b^2$  = 23,717 m<sup>2</sup>

Menghitung tambahan tegangan pada beton ( $P_c$ ) dengan persamaan 3.17 didapatkan hasil sebagai berikut.

$$P_c = \frac{18 b^2 + 364,5}{b^2 + 20,25}$$

$$P_c = \frac{18 \times 23,717 - 364,5}{23,717 + 20,25}$$

$$P_c = \frac{62,406}{43,967} = 1,42 \text{ kg/cm}^2$$

di mana :

$\sigma_b, a, b,$  = keterangan di persamaan 3.16.

Menghitung tambahan tegangan air terhadap dinding terowongan dengan persamaan 3.24 didapatkan hasil sebagai berikut.

$$P_w = \frac{80(4,87^2 - 4,50^2)}{2 \times 4,87^2}$$

$$P_w = \frac{80(23,717 - 20,25)}{47,434}$$

$$P_w = \frac{277,36}{47,434} = 5,85 \text{ kg/cm}^2$$

di mana :

$\sigma_w$  = tekanan air keluar =  $80 \text{ kg/cm}^2$

$a, b$  = keterangan di persamaan 3.16.

Menghitung tegangan injeksi terhadap dinding terowongan dengan persamaan 3.25 didapatkan hasil sebagai berikut.

$$P_q = \frac{175(4,87^2 - 4,50^2)}{2 \times 4,87^2}$$

$$P_q = \frac{175(23,717 - 20,25)}{47,434}$$

$$P_q = \frac{606,725}{47,434} = 12,79 \text{ kg/cm}^2$$

di mana :

$$\begin{aligned}\sigma_c &= \text{tekanan injeksi} = 175 \text{ kg/cm}^2 \\ a, b, &= \text{keterangan di persamaan 3.15}\end{aligned}$$

Maka didapatkan nilai:

$$\begin{aligned}P &= 7 \text{ kg/cm}^2 \\ P_r &= 5,02 \text{ kg/cm}^2 \\ P_c &= 1,529 \text{ kg/cm}^2 \\ P_w &= 6,264 \text{ kg/cm}^2 \\ P_q &= 13,703 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

Kontrol terhadap tebal lining 37 cm dapat ditentukan dari perbandingan dengan persamaan 3.26 dan persamaan 3.27:

$$6.264 \leq 7+5.02+1.53 \rightarrow 6.264 \leq 13.55 \text{ (Aman)}$$

$$13.703-6.264 \geq 5.02+1.53 \rightarrow 7.439 \geq 6.55 \text{ (Aman)}$$

#### 4.6.4.2 Kontrol terhadap beton dengan tulangan (t= 35 cm)

Menghitung tegangan tekan efektif pada beton ( $\sigma_t'$ ) dengan persamaan 3.28, maka didapatkan hasil sebagai berikut.

$$\sigma_t' = 18 \frac{(4,85 - 4,50) + (9,38 - 1)0,0054}{(4,85 - 4,50)}$$

$$\sigma_t' = 18 \frac{0,35 + 8,38 \times 0,0054}{0,35}$$

$$\sigma_t' = 18 \times \frac{0,395}{0,35}$$

$$\sigma_t' = 18 \times 1,129 = 20,327 \text{ kg/cm}^2$$

di mana:

$$\begin{aligned} t &= \text{tebal lining} &&= 35 \text{ cm} \\ a &= \text{jari-jari dalam terowongan} &&= D/2 = 4,50 \text{ m} \\ b &= \text{jari-jari luar terowongan} &&= D/2 + t = 4,50 + 0,35 = 4,85 \text{ m} \\ m &= \text{rasio modular} &&= E_s / E_c = (21.1 \times 10^5) / (2.25 \times 10^5) = 9.38 \\ \sigma_{st} &= \text{tegangan izin baja} &&= 2110 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow 60 \% \\ \sigma_t &= \text{tegangan tekan beton yang diijinkan} &&= 18 \text{ kg/cm}^2 \\ A_{st} &= \text{luas tulangan} &&= 0,0054 \text{ m}^2/\text{m} \end{aligned}$$

Menghitung tambahan tegangan pada beton bertulang ( $P_c$ ) dengan persamaan 3.29.

$$P_c = \frac{0,540 \times 2110}{450} = 2,532 \text{ kg/cm}^2$$

di mana:

$$\begin{aligned} A_{st} &= \text{luas tulangan} &&= 0,540 \text{ cm}^2/\text{cm} \\ \sigma_{st} &= \text{tegangan izin baja} &&= 2110 \text{ kg/cm}^2 \\ a &= \text{jari-jari dalam terowongan} &&= 450 \text{ cm} \end{aligned}$$

Menghitung tambahan tegangan pada batuan ( $P_r$ ) dengan persamaan 3.16 menggunakan tegangan tekan efektif pada beton ( $\sigma_t'$ ).

$$P_r = 20,327 \frac{0,9 \times 10^5 \frac{6}{6+1}}{2,25 \times 10^5 \frac{25}{25-1}} \times \frac{(4,85^2 + 4,50^2) + (4,85^2 - 4,50^2)/5}{2 \times 4,85^2}$$

$$P_r = 20,327 \frac{0,7713 \times 10^5}{2,3436 \times 10^5} \times \frac{(23,523 + 20,25) + (23,523 - 20,25)/5}{2 \times 23,523}$$

$$P_r = 6,690 \times \frac{44,428}{47,046}$$

$$P_r = 6,690 \times 0,944 = 6,315 \text{ kg/cm}^2$$

di mana:

$$m_r = \text{rasio modulus pada batuan} = 6$$

$$m_c = \text{rasio modulus pada beton} = 5$$

$$E_r = \text{modulus batuan setelah injeksi} = 90000 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_c = \text{modulus elastisitas beton} = 225000 \text{ kg/cm}^2$$

$$a = \text{jari-jari dalam terowongan} = D/2 = 4,50 \text{ m}$$

$$b = \text{jari-jari luar terowongan} = D/2 + t = 4,50 + 0,35 = 4,85 \text{ m}$$

$$\sigma_t' = \text{tegangan tekan efektif pada beton} = 20,327 \text{ kg/cm}^2$$

Maka didapatkan nilai:

$$P = 5 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_c = 2,532 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_r = 6,315 \text{ kg/cm}^2$$

Kontrol terhadap tebal lining 35 cm dapat ditentukan dari perbandingan dengan persamaan 3.30

$$5 \leq 6,315 + 60\% \times 2,532$$

$$5 \leq 6,315 + 1,519 \rightarrow 5 \leq 7,834 \text{ (Aman)}$$

#### 4.7. Kesimpulan perhitungan

Dari perhitungan tebal lining di atas didapatkan tebal lining beton tanpa tulangan adalah 37 cm, dan dengan beton bertulang 35 cm. Sedangkan tebal lining dari terowongan yang sudah ada adalah 30 cm dan 35 cm. Jadi berdasarkan perhitungan ulang tebal lining terowongan yang ada telah mencukupi. Selisih ketebalan 5 cm dan 2 cm dimungkinkan karena adanya sedikit perbedaan dalam menentukan jenis dan sifat-sifat tanah.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

Dari perhitungan tebal lining terowongan pada Bab IV didapatkan tebal lining 37 cm untuk lining dengan beton tidak bertulang, dan 35 cm untuk lining dengan beton bertulang. Hasil ini sedikit lebih besar dari tebal lining konstruksi terowongan Ijo Baru yang dihitung ulang yaitu 35 cm dan 30 cm. Oleh karena dapat disimpulkan bahwa:

1. Tebal lining terowongan Ijo Baru 30 dan 35 cm telah memenuhi kekuatan yang disyaratkan.
2. Selisih tebal lining antara perhitungan ulang dengan konstruksi yang ada dimungkinkan karena adanya perbedaan anggapan besaran parameter tanah, seperti tegangan tanah, cohesi tanah dan sebagainya.

#### **5.2. Saran**

Dalam menghitung konstruksi terowongan khususnya dalam menghitung tebal lining, parameter tanah, yang merupakan beban utama terowongan hendaknya dicari dan ditetapkan setepat mungkin dengan keadaan tanah yang ada di sekitar terowongan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Guideline for Design Road Tunnel (2018) Road Development Authority (RDA) dan Japan International Cooperation Agency (JICA)
2. <https://www.arcgis.com> Peta Jalur Kereta Api di Pulau Jawa. Diakses pada tanggal 12 Mei 2021 pukul 12.00.
3. Paparan PT. WIKA (Persero) Tbk. (2019) Kontraktor Proyek Terowongan Ijo Baru, YANG DISAMPAIKAN PADA TANGGAL 16 Juni 2019.
4. Goricki et al. (2016) 22. "Support Decision Criteria for Tunnels in Fault Zones" (Proceedings of the Geomechanics Colloquium, Salsberg Published in Felshbau, 24/5.
5. Macher, T., Aydogmus, T. 2013 "Some Aspect on the Design of Near Surface Tunnels"
6. Marinos, Vassilis P. 2012 "Assesing Rock Mass Behaviour for Tunneling", Greece.
7. Rahardjo, P.P. 2004. Teknik Terowongan. Bandung : Geotechnical Engineering Center.
8. Craig, R. F., 1991. *Mekanika Tanah*. Jakarta: PT. Erlangga.
9. Muir-Wood, A. M. 1975. The circular tunnel in elastic ground. *Geotechnique* 25(1), 115-127.
10. Yulianto, Alfredo Joseph. 2016. 'Studi Perilaku Terowongan Bor di Bawah Tiang Pondasi Rakit', (Tugas Akhir Teknik Sipil Universitas Gajah Mada, Yogyakarta).
11. Agus Yunanto. 2019. "Evaluasi Kondisi Geologi Teknik Bagi Perancangan Terowongan Saluran Pengelak Bendungan Cipanas Provinsi Jawa Barat"
12. Rori, S. V. (2017). "Analisa Tanah Pada Bukaannya Terowongan". 5(6), 313–323.
13. Bieniawski, Z. T., (1989). "Engineering Rock Mass Classification Mining and Mineral Resource Research Institute". Pennsylvania State University.
14. Hermawan, D., & Hamdhan, I. N. (2019). "Analisis Geoteknik Terowongan Kereta Api Kebasen Menggunakan Metode Elemen Hingga 3D". *Jurnal Komposit*, 3(1), 1–8.
15. Pamuji, A. F. A., Sophian, R. I., & Muslim, D. (2018). "Pengaruh Geological Strength Index (GSI) Terhadap Nilai Faktor Keamanan Melalui Simulasi Kestabilan Lereng Tambang, Kecamatan Batu Kajang, Kabupaten Paser, Kalimantan Timur". *Padjadjaran Geoscience Journal*, 2(6), 487–497.
16. Marinos P., Hoek E. (2000). "GSI: Geologically Friendly tool for rock mass strength estimation". *Proc. International Conference on Geotechnical & Geological Engineering. GeoEng2000, Technomic Publ., 1422-1442, Melbourne.*

17. Hoek, E., 2007. *Practical Rock Engineering, Rocscience*. North Vancouver. Evert Hoek Consulting Engineer Inc.
18. Hatmoko, D. D., & Artati, H. K. (2018). “Analisis Stabilitas Terowongan Dengan Perkuatan Wiremesh Dan Rockbolt Menggunakan Metode Elemen Hingga”.
19. JSCE (Japanese Society of Civil Engineer), (2007). *Standard specifications for tunnelling-2006: mountain tunnels*. Japan.
20. Zakariya Arifin, A., & Laksono, A. J. (2019). “Cisumdawu Tunnel Implementation Modeling Using 2D Plaxis and 3D Tunnel Plaxis Programs”.
21. Broms BB, Bennermark H (1967) “*Stability of Clay At Vertical Openings, Journal of The Soil Mechanic & Foundations Division, Proceeding of American Society of Civil Engineering*”. 93, 71-93.
22. Davis dkk., (1980). “*The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive material*”. *Geotechnique* 30(4): 397-416.
23. Darmawan, A., Fathani, T. F., & Satyarno, I. (2018). “Analisis Perilaku Terowongan Sirkular Akibat Beban Gempa Dengan Pemodelan Elemen Hingga”. 2012, 339–347.
24. Owen dan Scholl, (1981). *Earthquake Engineering of Large Underground Structure. Reput No. FHWA/RD-80/195. Federal Highway Administration and Nation Science Foundation*.
25. SNI (Standar Nasional Indonesia) 8460:2017. *Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
26. AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). (2012). *LRFD Bridge Design Spesification*. Customary U.S Units.
27. Muethia Kharisas.S.N & Alifiya Arum Lestari (2018). “*Design and calculation of railway tunnel*”.
28. Report, O., & The, O. F. (2000). *Guidelines for the design of shield of tunnel lining. Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(3), 303–331.
29. Kementerian PUPR, D. B. K. (2005). *Pelatihan Ahli Desain Terowongan SDA*.

## LAMPIRAN

Lampiran A1. Metode Konstruksi Terowongan untuk kondisi yang berlaku [9]

Kondisi		Terowongan Pegunungan	Terowongan Perisai	Terowongan Buka dan Tutup
Kondisi yang dapat diterapkan	<b>Geologi</b>	Sesuai dengan batuan dasar terkonsolidasi, penggalian memungkinkan bahkan saat tanah yang tidak terkonsolidasi dengan menggunakan penggalian dasar permukaan bebas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sesuai untuk pegunungan yang tidak kokoh/ pegunungan kurang stabil</li> <li>Pada kasus yang sama, sangat memungkinkan pembangunan bahkan jika permukaan penggalian tidak kuat mendukung bebannya sendiri.</li> </ul>	Pada umumnya cocok pada tanah yang tidak kokoh, namun dapat juga diaplikasikan ke jenis tanah lain.
	<b>Lapisan tanah</b>	Lapisan tanah yang lebih dari 2D (diameter luar terowongan) sangat dibutuhkan. Hal tersebut memungkinkan pembangunan meski beberapa meter dengan menggunakan metode tambahan.	Lapisan tanah lebih dari 1D (diameter luar terowongan) sangat dibutuhkan.	Sesuai dengan lapisan tanah kecil (sekitar 20 m atau kurang)
	<b>Air Bawah Tanah</b>	Jika jumlah mata air besar atau penggalian permukaannya tidak aman, maka sebuah metode tambahan diperlukan. Hal tersebut dibutuhkan untuk mempertimbangkan pengaruh ke sekitar.	Pada tipe terbuka, penanggulangan seperti metode tekanan dan pengurangan air bawah tanah diperlukan, namun pada kasus tipe tertutup hampir tidak dibutuhkan metode tambahan.	Dibutuhkan untuk penanggulangan seperti metode pengurangan air bawah tanah dan penambahan tanah.
	<b>lokasi</b>	Digunakan dipegunungan, namun tergantung pada kondisi tanah. Biasa juga digunakan pada area perkotaan	Biasa digunakan pada area perkotaan.	Biasa digunakan di area perkotaan. Terkadang dibangun sebagai awal/kedatangan dasar dari terowongan perisai

Lampiran A2. Metode Konstruksi Terowongan untuk kondisi perencanaan [9]

Kondisi		Terowongan Pegunung	Terowongan Perisai	Terowongan Buka dan Tutup
Desain kondisi	<b>Potongan Melintang</b>	Menggunakan potongan melintang tapal kuda. Bentuk Penampang acak memungkinkan untuk beberapa titik, tapi sebuah bentuk lengkung diinginkan pada bagian setengah ke atas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ditentukan oleh bentuk penampang dari mesin perisai, yaitu menggunakan penampangan melintang lingkaran.</li> <li>• Dengan pengecualian penggalan mesin khusus, hal tersebut mustahil untuk mengubah bentuk penampang melintangnya.</li> <li>• Dengan mesin penggali khusus, penampang melintang yang dapat dipakai juga yaitu seperti multi-circle dan persegi.</li> </ul>	Pada umumnya, digunakan sebuah penampang melintang persegi, namun bentuknya juga acak.
	<b>Struktur pendukung dan Lining</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menggunakan perkuatan baja, rockbolts, shotcrete sebagai pendukung.</li> <li>• Lining pada dasarnya terdiri dari beton polos dengan memukul tempat, namun dibebberapa kasus dimana tekanan tanah berlaku seperti ditekan oleh struktur beton.</li> <li>• Zona portal umumnya diatur dengan perkuatan penulangan untuk mencegah cracking karena penyusutan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beton bertulang rakitan dibuat oleh pabrik atau segmen baja dibagian belakang mesin terbuat untuk menjadi lining utama.</li> <li>• Dalam beberapa kasus, lining dibangun menggunakan beton polos atau beton bertulang pada lapisan lining kedua.</li> </ul>	Dasarnya adalah struktur kaku dengan baja atau beton bertulang.

Lampiran A3. Titik - titik Kesamaan Terowongan [9]

<b>Item</b>		<b>Titik fokus</b>
Fungsi terowongan		Apakah fungsi terowongan itu sama?
Kondisi Tanah	Kelas tanah	Apakah kelas tanah itu sama?
	Pembebanan topografi	Apakah topografi dan pembebanan itu mirip?
	Sifat tanah	Apakah spesies batuan dan usia geologi, kondisi air tanah dan lain-lain serupa?
Bentuk dan dimensi penampang		Bentuk dan dimensi penampang serupa?
Dampak terhadap lingkungan sekitar		Apakah nilai regulasi serupa
Pendekatan konstruksi setelah selesai		Jenis, hubungan posisi, skala dan lain-lain serupa

Lampiran A4. Daftar perencanaan dengan metode analitik [9]

<b>Metode Analisa</b>	<b>Desain Objek</b>	<b>Tujuan Analisis</b>
Metode analisis teoritis	Pendukung	Studi pendahuluan tentang analisis numerik Evaluasi stabilitas dukungan
Metode analisis FEM	Metode tambahan Lining	Memahami perilaku tanah selama penggalian Evaluasi stabilitas dukungan Konfirmasi efek metode tambahan Estimasi dampak lingkungan Memahami perilaku lapisan ekspansif gunung Mempertimbangkan pengaruh pendekatan konstruksi
Struktur kerangka analisis	Lining	Evaluasi stabilitas structural lapisan

Lampiran A5. Item Survei dan Pengukuran dalam Konstruksi dan Evaluasi Hasil [10]

<b>Penyelidikan dan pengukuran</b>	<b>Item detail</b>	<b>Evaluasi hasil</b>
<b>Kekuatan tanah</b>	Kecepatan pengeboran Menggunakan jumlah peledak Kecepatan penggalian (/hari)	Memastikan kondisi tanah
<b>Kondisi permukaan</b>	Jenis batuan, kualitas batuan, kondisi retak, kecepatan resonansi, pukul, tip.	Memastikan kondisi tanah Perdiksi kondisi depan permukaan
<b>Aliran air masuk</b>	Aliran air masuk dipermukaan, tekanan air permukaan, kondisi terdrainase.	Memastikan aliran air masuk
<b>Pengukuran A</b>	Penyelesaian pada puncak, konvergensi Situasi Konvergensi perpindahan	Memahami aksi tanah dan dukungan stabilitas
<b>Pengukuran B</b>	Kondisi geografis disekitar penggalian terowongan	Memahami aksi tanah dan dukungan stabilitas
<b>Pengaruh pendekatan konstruksi</b>	Perilaku permukaan tanah, tanah dan sekitarnya Struktur Perilaku portal	Memahami pengaruh pendekatan konstruksi dan permukaan tanah
<b>Kondisi cuaca</b>	Cuaca, temperature, jumlah curah hujan, estimasi gempa bumi	Memperkirakan kondisi kerusakan
<b>Air tanah disekitar area</b>	Aliran sungai, ketinggian air tanah	Memahami pengaruh penggalian
<b>Lingkungan kerja di terowongan</b>	Temperatur, kelembapan, jumlah konsentrasi ventilasi oksigen, konsentrasi debu, gas mudah terbakar dan metana, konsentrasi gas beracun.	Memahami lingkungan sekitar
<b>Lingkungan di sekitar area</b>	Kebisingan, getaran, suara frekuensi rendah, konsentrasi drainase	Memahami lingkungan sekitar area