



PROYEK AKHIR - VC 191845

**EVALUASI PERANCANGAN DAN STABILITAS
TEROWONGAN MRT PADA SEGMENT CP105-1 HINGGA
CP105-2 DENGAN BANTUAN *SOFTWARE* PLAXIS DAN
GEO5**

SATRIA NAUVAL FADHIL
NRP 10111610013081

Dosen Pembimbing 1
Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA
NIP 19501011 198203 1 002

Dosen Pembimbing 2
Prof. Ir. M. Sigit D, M.EngSc., Ph.D.
NIP 19630726 198903 1 003

PROGRAM SARJANA TERAPAN
DEPARTEMEN TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020



PROYEK AKHIR - VC 191845

**EVALUASI PERANCANGAN DAN STABILITAS
TEROWONGAN MRT PADA SEGMENT CP105-1 HINGGA
CP105-2 DENGAN BANTUAN *SOFTWARE* PLAXIS DAN
GEO5**

**SATRIA NAUVAL FADHIL
NRP 10111610013081**

**Dosen Pembimbing 1
Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA
NIP 19501011 198203 1 002**

**Dosen Pembimbing 2
Prof. Ir. M. Sigit D, M.EngSc., Ph.D.
NIP 19630726 198903 1 003**

**PROGRAM SARJANA TERAPAN
DEPARTEMEN TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL
FAKULTAS VOKASI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020**



FINAL PROJECT - VC 191845

***MRT TUNNEL DESIGN AND STABILITY EVALUATION
ON SEGMENTS CP105-1 TO CP105-2 WITH PLAXIS
AND GEO5***

SATRIA NAUVAL FADHIL
NRP 10111610013081

1st Supervisor
Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA
NIP 19501011 198203 1 002

2nd Supervisor
Prof. Ir. M. Sigit D, M.EngSc., Ph.D.
NIP 19630726 198903 1 003

***APPLIED UNDERGRADUATE PROGRAM
CIVIL INFRASTRUCTURE ENGINEERING DEPARTMENT
VOCATIONAL FACULTY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2020***

LEMBAR PENGESAHAN

**EVALUASI PERANCANGAN DAN STABILITAS
TEROWONGAN MRT
PADA SEGMENT CP105-1 HINGGA CP105-2 DENGAN
BANTUAN
SOFTWARE PLAXIS 2D DAN GEO5**

TUGAS AKHIR TERAPAN

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Terapan Teknik

Pada

Program Sarjana Terapan

Departemen Teknik Infrastruktur Sipil

Fakultas Vokasi

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

Surabaya, 22 Agustus 2020

Disusun Oleh :

MAHASISWA

Satria Nauval Fadhi

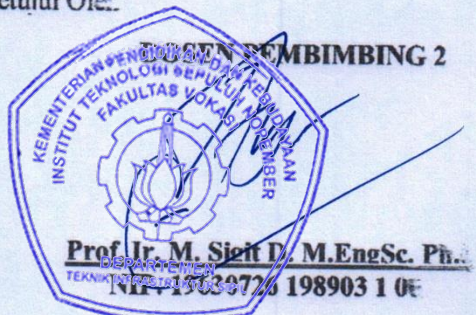
NRP. 1011161001308

Disetujui Oleh:

Dosen Pembimbing 1



Dosen Pembimbing 2



**EVALUASI PERANCANGAN DAN STABILITAS
TEROWONGAN MRT
PADA SEGMENT CP105-1 HINGGA CP105-2 DENGAN
BANTUAN
SOFTWARE PLAXIS DAN GEO5**

Nama Mahasiswa: Satria Nauval Fadhil

NRP: 10111610013081

Departemen: Teknik Infrastruktur Sipil FV-ITS

Dosen Pembimbing 1: Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA

NIP: 19501011 198203 1 002

Dosen Pembimbing 2: Prof. Ir. M. Sigit D, M.EngSc., Ph.D.

NIP: 19630726 198903 1 003

ABSTRAK

Proyek *Mass Rapid Transit (MRT)* Jakarta merupakan sebuah terobosan untuk menekan tingkat kemacetan dan meningkatkan perekonomian di Jakarta. Proyek ini terbagi menjadi 2 fase, dimana fase pertama dari Lebak Bulus menuju Bundaran Hotel Indonesia. Total jalur kereta yang dibangun pada fase 1 mencapai 16 km yang terdiri dari 10 km jalur layang yang terbagi menjadi 7 stasiun dan 6 km jalur bawah tanah yang terdiri dari stasiun.

Proyek MRT merupakan pembangunan terowongan bawah tanah pertama di Indonesia, terowongan ini terletak pada kedalaman 10m hingga 15m bergantung pada kondisi geologi daerah tersebut. Jenis tanah pada terowongan bawah tanah MRT adalah tanah lunak dengan lempung dan lanau, pada permukaan tanah juga terdapat banyak bangunan serta fasilitas umum lainnya. Dalam rangka menghindari adanya keruntuhan maka perlu diperhatikan stabilitas pada bukaan terowongan, stabilitas akibat adanya gaya *uplift*, angka keamanan, lendutan (*deflection*), dan penurunan (*settlement*) dari terowongan tersebut agar nantinya tidak terjadi keruntuhan yang dapat merugikan bahkan membahayakan masyarakat baik pengguna kereta MRT maupun

yang berada pada fasilitas umum di atasnya.

Dari pemodelan terowongan yang telah dilakukan terletak pada kedalaman 14.725 meter dengan jarak antar terowongan 15.1 meter, kondisi tanah sekitar berupa lempung keras dengan rata-rata SPT 40, kondisi muka air terbagi menjadi -5m, -2m, dan tepat pada permukaan tanah, kondisi beban permukaan dimodelkan dengan beban jalan dalam keadaan normal dan beban statis akibat gempa. Akibat kondisi terowongan yang tidak monolit maka titik join antar segmen menjadi hal yang kritis. Hasil pemodelan dengan menggunakan program bantu plaxis 2D bahwa semakin rendah muka air maka deformasi terowongan semakin besar dengan deformasi terbesar 14.59mm. Proses pengeboran menggunakan TBM menyebabkan penurunan tanah akibat adanya *volume loss* semakin besar seiring dengan kondisi muka air tanah yang rendah, didapati penurunan tanah terbesar 6.18mm pada pengeboran terowongan kedua. Semakin rendah muka air tanah menyebabkan peningkatan angka keamanan akibat adanya gaya angkat oleh air, dengan angka keamanan terbesar 1.935. Lendutan maksimal yang terjadi pada *longitudinal section* sebesar 9.8mm

Kata kunci : *tunnel stability, gaya uplift, volume loss, tunnel lining, soft soil*

***MRT TUNNEL DESIGN AND STABILITY EVALUATION
ON SEGMENTS CP105-1 TO CP105-2 WITH PLAXIS AND
GEO5***

Student's Name : Satria Nauval Fadhil

NRP : 10111610013081

Department : Civil Infrastructure Engineering FV-ITS

1st Supervisor : Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA

NIP : 19501011 198203 1 002

2nd Supervisor : Prof. Ir. M. Sigit D, M.EngSc., Ph.D.

NIP : 19630726 198903 1 003

ABSTARCT

Mass Rapid Transit (MRT) Jakarta project is a breakthrough to suppress the level of congestion and improve the economy in Jakarta. The project is divided into 2 phases, where the first phase extends from Lebak Bulus to Hotel Indonesia. The Total train lines built in Phase 1 reached 16 km consisting of 10 km of flyovers that are divided into 7 stations and 6 km of underground lines consisting of stations.

The construction of underground tunnels on the MRT project is the first time in Indonesia, the tunnel is located at a depth of 10m to 15m depending on the geological conditions of the area. Soil type in underground tunnel MRT is soft soil with clay and silt, on the ground surface there are also many buildings and other public facilities. In order to avoid the collapse, it is necessary to note the stability of the tunnel stability due to uplift, security factor, deflection, and the settlement of the tunnel so that there will be no collapse that can be detrimental even harm the community both users of MRT trains or who are at public facilities above.

From the tunnel modeling that has been done at a depth of 14,725 meters with a distance between the 15.1 meters tunnel, the condition of the surrounding soil is hard clay with average SPT 40, the water face condition is divided into -5m,-2m, and precisely on the ground surface, surface load condition is modelled with road

load in normal state and static load due to earthquake. Due to tunnel conditions that are not monolith then the join point between segments becomes critical. The results of modeling by using a 2D plaxis auxiliary program that the lower the water's level then the larger tunnel deformation with the largest deformation of 14.59 mm. The drilling process using TBM caused the settlement due to the volume of loss is getting bigger along with the low ground water condition, found the largest settlement is 6.18 mm in the second tunnel drilling. The lower level of groundwater is causation of increased safety factor due to uplift forces, with the largest safety factor is 1,935. Maximal deflection on longitudinal section is 9,8mm.

Keyword : *tunnel stability, buoyancy effect, volume loss, tunnel lining, soft soil*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penyusunan Proposal Tugas Akhir Terapan dapat terselesaikan dengan baik.

Melalui proyek akhir ini, penulis dapat mengajukan judul dan literatur untuk penyusunan tugas akhir sebagai syarat kelulusan bagi mahasiswa Program Studi Sarjana Terapan, Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Dalam pembuatan proposal ini, data-data yang diperoleh penulis adalah melalui data sekunder yang diperoleh langsung dari pihak proyek. Dalam penyusunan proposal tugas akhir ini, penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak, antara lain :

1. Allah SWT yang telah memberikan kemudahan, kelancaran, petunjuk, dan hikmah dalam menyelesaikan tugas akhir terapan ini.
2. Kedua orang tua dan seluruh keluarga besar penulis yang selalu memberikan dukungan serta doa yang tiada henti.
3. Bapak Dr. Mohamad Khoiri, S.T., M.T., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Infrastruktur Sipil FV ITS
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Indarto. DEA. sebagai dosen pembimbing I dan Bapak Prof. Ir. M. Sigit D. M.EngSc. Ph.D. sebagai dosen pembimbing II proyek akhir terapan yang memberikan banyak bantuan, saran dan kritik selama penyusunan proyek akhir.
5. Rekan-rekan dari Kabinet Katalisator HMDS yang telah memberikan dukungan dan pengalaman berharga.
6. Rekan-rekan dari SRD Katalisator HMDS yang telah memberikan dukungan dan semangat kepada saya.
7. DS37 selaku angkatan saya yang selalu memberikan dukungan dan selalu menemani selama penyusunan proyek akhir.

8. Rekan-rekan kontrakan yang selalu memberikan dukungan dan semangat kepada saya.
9. PT. MRT Jakarta yang telah membatu memberikan data untuk tugas akhir ini.
10. Serta pihak-pihak lainnya yang belum disebutkan oleh penulis.

Penyusunan tugas akhir ini masih banyak kekurangan dan belum sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan adanya kritik dan saran dari pihak pembaca sebagai masukan agar penyusunan tugas akhir nantinya dapat terselesaikan dengan baik dan sesuai harapan. Akhir kata, semoga tugas akhir ini dapat dijadikan referensi bagi mahasiswa lainnya dan dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, 17 Agustus 2020

Penyusun

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan.....	2
1.4. Manfaat.....	3
1.5. Manfaat Bagi Pembaca.....	3
1.6. Manfaat Bagi Penulis	3
1.7. Batasan Masalah.....	4
1.8. Lokasi Proyek.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Definisi Terowongan.....	7
2.2. Klasifikasi Terowongan.....	7
2.3. Terowonganada Tanah Lunak	9
2.4. Tunnel Boring Machine (TBM)	10
2.4.1. <i>Earth Pressure Balance</i> (EPB).....	11
2.5. Lining Terowongan	12
2.5.1. Momen Inersia <i>Lining</i>	14
2.6. Parameter Data Tanah	14
2.6.1. Klasifikasi Tanah.....	14
2.6.2. Korelasi Cu dengan N-SPT	15
2.6.3. Modulus Young	15
2.6.4. Koefisien Tekanan Tanah Diam.....	16
2.7. Distribusi Tegangan Pada Terowongan.....	16
2.8. Teori Mekanika Tanah	17
2.8.1. Tegangan Efektif	17
2.8.2. Tekanan Tanah dalam Keadaan Diam.....	18
2.8.3. Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb.....	19
2.9. Pembebanan Terowongan	21
2.9.1. Beban Tanah.....	21

2.9.2.	Beban Mati (Terowongan)	21
2.9.3.	Beban Tambahan (Surcharge)	21
2.9.4.	Beban Gempa	23
2.9.5.	Grouting.....	25
2.10.	Persyaratan Teknis Terowongan	26
2.10.1.	Deformasi	26
2.10.2.	Penurunan (settlement).....	26
2.10.3.	Lendutan (deflection)	29
2.10.4.	Stabilitas Terhadap Gaya Angkat.....	30
2.11.	Plaxis 2D	31
2.11.1.	Tahap Pemodelan Geometri	32
2.11.2.	Tahap Perhitungan.....	33
2.11.3.	Hasil Keluaran	34
2.11.4.	Karakteristik Material.....	35
2.11.5.	<i>Safety Factor</i>	39
2.12.	GEO5 - <i>Beams</i>	39
2.12.1.	<i>Settings</i>	40
2.12.2.	<i>Geometry</i>	41
2.12.3.	<i>Interface</i>	42
2.12.4.	<i>Location</i>	42
2.12.5.	<i>Soils</i>	43
2.12.6.	<i>Assigns</i>	44
2.12.7.	<i>Water</i>	44
2.12.8.	<i>Supports</i>	44
2.12.9.	<i>Load Cases</i>	45
2.12.10.	<i>Load</i>	46
2.12.11.	<i>Load Combinations</i>	46
2.12.12.	<i>Analysis</i>	46
BAB III	METODOLOGI	49
3.1.	Metodologi Pengerjaan Tugas Akhir.....	49
3.2.	Studi Literatur.....	50
3.3.	Pengumpulan Data.....	50
3.4.	Analisa Beban dan Korelasi Tanah	51
3.5.	Pemodelan dengan Plaxis	51
3.6.	Pemodelan dengan GEO5- <i>beam</i>	52

3.7.	Analisa Hasil	52
3.8.	Kesimpulan dan Saran	52
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMODELAN		55
4.1.	Data Sekunder Proyek	55
4.2.	Data Geoteknik	56
4.2.1.	Data Eksisting Tanah Dasar	56
4.2.2.	Parameter Tanah	57
4.2.3.	Data Kedalaman Terowongan	66
4.3.	Data Struktur	67
4.4.	Data Pembebanan	71
4.4.1.	Beban Jalan	71
4.4.2.	Beban Gempa	75
4.5.	Pemodelan <i>Cross Section</i>	76
4.5.1.	Pemodelan Lapisan Tanah	76
4.5.2.	Pemodelan Struktur	79
4.5.3.	Penyusunan Jaring Elemen	83
4.5.4.	Pemodelan Muka Air	83
4.5.5.	Tahap Perhitungan	83
4.5.6.	Ilustrasi Tahap Pemodelan	87
4.6.	Pemodelan <i>Longitudinal Section</i>	89
4.6.1.	Geometri	90
4.6.2.	<i>Interface</i>	91
4.6.3.	<i>Soils</i>	92
4.6.4.	<i>Assign</i>	92
4.6.5.	<i>Location</i>	93
4.6.6.	<i>Supports</i>	93
4.6.7.	<i>Loads Case</i>	93
4.6.8.	<i>Analysis</i>	93
4.7.	Penurunan Tanah (<i>settlement</i>)	94
BAB V ANALISA HASIL PEMODELAN		95
5.1.	Hasil Pemodelan <i>Cross Section</i>	95
5.1.1.	Deformasi	95
5.1.2.	Gaya Dalam	97
5.1.3.	Penurunan (<i>settlement</i>)	103
5.1.4.	Distribusi Tegangan Vertikal	105

5.2.	<i>Safety Factor</i>	106
5.3.	Hasil Pemodelan <i>Longitudinal Section</i>	107
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		109
6.1.	Kesimpulan.....	109
6.2.	Saran	110
DAFTAR PUSTAKA.....		111

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1. Lokasi Proyek.....	5
Gambar 1. 2. Denah Bore Hole	5
Gambar 2. 1. Terowongan Pada Batuan.....	8
Gambar 2. 2. Terowongan Pada Tanah Lunak	8
Gambar 2. 3. Terowongan Cut and Cover.....	9
Gambar 2. 4. TBM Proyek MRT	11
Gambar 2. 5. Konsep TBM Earth Pressure Balance	12
Gambar 2. 6. Pembagian Titik Acuan Terowongan	13
Gambar 2. 7. Ilustrasi Lining Terowongan	13
Gambar 2. 8. Distribusi Tegangan Pada Terowongan.....	17
Gambar 2. 9. Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb.....	20
Gambar 2. 10. Kriteria Gempa Pada Terowongan	24
Gambar 2. 11. Batas Tunnel Ovalization	26
Gambar 2. 12. Penurunan Tanah Akibat Volume Loss.....	28
Gambar 2. 13. Stabilitas Terowongan Akibat Gaya Uplift	31
Gambar 2. 14. Contoh Pemodelan Lapisan Tanah	32
Gambar 2. 15. Contoh Pemodelan Struktur Terowongan	33
Gambar 2. 16. Contoh Tahap Mesh Calculation	34
Gambar 2. 17. Contoh Tahap Flow Condition	34
Gambar 2. 18. Contoh Tahap Stage Construction.....	34
Gambar 2.19. Jendela Parameter Tanah Untuk Model Mohr- Coulomb.....	36
Gambar 2. 20. Jenis Pemodelan Drainage.....	37
Gambar 2. 21. Jendela Parameter Pelat (lining)	38
Gambar 2. 22. Menu Inti Pada GEO5-beams.....	40
Gambar 2. 23. Jendela Menu "Settings" (sumber: Dokumen Pribadi).....	41
Gambar 2. 24. Jendela Menu "Geometry"	41
Gambar 2. 25. Jendela Menu "Interface"	42
Gambar 2. 26. Jendela Menu "Location"	42
Gambar 2. 27. Parameter Tanah Pada Jendela Menu "Soils"	43
Gambar 2. 28. Memasukkan Jenis Tanah Pada Jendela Menu "Assigns"	44

Gambar 2. 29. Pengaturan M.A.T Pada Jendela Menu "Water" .	44
Gambar 2. 30. Pemilihan Perletakan Pada Jendela Menu "Supports"	45
Gambar 2. 31. Jendela Menu "Load Cases"	45
Gambar 2. 32. Jendela Menu "Load"	46
Gambar 2. 33. Jendela Menu "Analysis"	47
Gambar 3. 1. Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir.....	49
Gambar 4. 1. Tabel Hubungan Poisson's Ratio Terhadap Jenis Tanah.....	63
Gambar 4. 2. Gambar Desain Kedalaman Terowongan.....	66
Gambar 4. 3. Jarak BH 105-1 - BH 105-2.....	71
Gambar 4. 4. Kondisi Eksisting Jl. Jendral Sudirman.....	72
Gambar 4. 5. Hasil Pemodelan Geometri Terowongan Dengan Plaxis 2D	76
Gambar 4. 6. Pemodelan Tebal Lapisan Tanah.....	77
Gambar 4. 7. Memasukkan Parameter Tanah	77
Gambar 4. 8. Pemodelan Terowongan	79
Gambar 4. 9. Pembagian Segmen Lining Terowongan.....	80
Gambar 4. 10. Jendela Model Expoler Untuk Mengatur Elevasi Terowongan.....	81
Gambar 4. 11. Pemberian Sendi Pada Terowongan	81
Gambar 4. 12. Menu Create Line Load Untuk Pemodelan Beban	82
Gambar 4. 13. Jendela Model Expoler Untuk Mengatur Nilai Beban Permukaan.....	82
Gambar 4. 14. Kondisi Eksisting Tanah.....	87
Gambar 4. 15. Penggalian Terowongan Downtrack	87
Gambar 4. 16. Pemasangan Lining Terowongan Downtrack.....	88
Gambar 4. 17. Grouting Beton Terowongan Downtrack	88
Gambar 4. 18. Penggalian Terowongan Uptrack	88
Gambar 4. 19. Pemasangan Lining Terowongan Uptrack	89
Gambar 4. 20. Grouting Beton Terowongan Uptrack	89
Gambar 4. 21. Hasil Pemodelan Memanjang Terowongan Dengan GEO5-beam.....	90
Gambar 4. 22. Hasil 3D Pemodelan Memanjang Terowongan	

Dengan GEO5-Beam.....	90
Gambar 4. 23. Jendela Untuk Parameter Terowongan.....	91
Gambar 4. 24. Jendela Untuk Parameter Terowongan (Lanjutan)	91
Gambar 4. 25. Jendela Menu Interface.....	92
Gambar 4. 26. Jendela Menu Soils.....	92
Gambar 4. 27. Jendela Menu Assign.....	92
Gambar 4. 28. Jendela Menu Location.....	93
Gambar 4. 29. Jendela Menu Load Case.....	93
Gambar 4. 30. Jendela Menu Analysis.....	94
Gambar 5. 1. Pola Deformasi Pada Terowongan	95
Gambar 5. 2. Grafik Deformasi Pada Kondisi Non-Seismic.....	96
Gambar 5. 3. Grafik Deformasi Pada Kondisi Seismic.....	97
Gambar 5. 4. Pola Gaya Aksial Pada Terowongan	98
Gambar 5. 5. Grafik Gaya Aksial Terhadap M.A.T	99
Gambar 5. 6. Pola Gaya Geser Pada Terowongan	100
Gambar 5. 7. Grafik Gaya Geser Terhadap M.A.T	101
Gambar 5. 8. Pola Momen Pada Terowongan.....	101
Gambar 5. 9. Grafik Momen Terhadap M.A.T	102
Gambar 5. 10. Pola Deformasi Tanah	103
Gambar 5. 11. Grafik Penurunan Tanah Akibat Volume Loss .	104
Gambar 5. 12. Tegangan Vertikal Dengan Beban Permukaan (Fase Activate Surcharge Load).....	105
Gambar 5. 13. Tegangan Vertikal Tanpa Beban Permukaan (Fase Initian Condition)	105
Gambar 5. 14. Hasil Pemodelan Longitudinal Section Dengan GEO5.....	107

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Spesifikasi TBM.....	11
Tabel 2. 2. Faktor Beban Untuk Berat Sendiri	23
Tabel 2. 3. Faktor Beban Untuk Beban Tambahan	23
Tabel 2. 4. Faktor Untuk Beban Lajur "D".....	23
Tabel 2. 5. Hubungan Volume Loss Dengan TBM.....	27
Tabel 2. 6. Klasifikasi Kerusakan Berdasarkan Kemiringan dan Penurunan Bangunan.....	29
Tabel 2. 7. Koefisien Kekuatan Struktur	43
Tabel 4. 1. Hasil Uji SPT Bore Hole 105-1.....	56
Tabel 4. 2. N-SPT Desain Lempung	58
Tabel 4. 3. N-SPT Desain Pasir.....	58
Tabel 4. 4. Nilai Berat Isi Tanah Desain	58
Tabel 4. 5. Nilai Kuat Geser Undrained	59
Tabel 4. 6. Nilai Kuat Geser Efektif.....	59
Tabel 4. 7. Nilai Modulus Young Tanah.....	61
Tabel 4. 8. Nilai Koefisien Tanah Diam.....	62
Tabel 4. 9. Nilai Koefisien Permeabilitas.....	63
Tabel 4. 10. Resume Parameter Tanah.....	65
Tabel 4. 11. Geometri Lining	67
Tabel 4. 12. Mutu Bahan	67
Tabel 4.13. Resume Parameter Lining (Plaxis 2D).....	69
Tabel 4. 14. Resume Parameter Lining (GEO5)	70
Tabel 4. 15. Geometri Jalan (Asumsi).....	72
Tabel 4. 16. Data Parameter Jalan (Asumsi)	72
Tabel 4. 17. Resume Parameter Tanah (Plaxis 2D).....	78
Tabel 4. 18. Detail Geometri Lining	80
Tabel 4. 19. Model Muka Air Tanah.....	83
Tabel 4. 20. Tahap Stage Constructions	84
Tabel 4. 21. Tahap Aktivasi Bagian Pemodelan	85

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Jakarta merupakan kota yang memiliki jumlah penduduk yang sangat padat dan terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun, hal tersebut tidak terlepas dari daerah tersebut yang merupakan Ibukota dan pusat perekonomian di Indonesia. Karena jumlah penduduk yang terus meningkat tersebut maka jumlah kendaraan pribadi pun terus meningkat dan akhirnya menimbulkan kemacetan di Jakarta yang hingga saat ini masih menjadi permasalahan. Hal tersebut terjadi karena kurang adanya transportasi umum yang cukup memadai untuk masyarakat Ibukota.

Pada tanggal 10 Oktober 2013 berlangsung proyek *Mass Rapid Transit* (MRT) yang merupakan proyek pembangunan transportasi umum berupa Kereta Listrik yang bertujuan untuk meningkatkan pertumbuhan ekonomi dengan meningkatkan mobilitas masyarakat, pengurangan kemacetan, sehingga nantinya bisa menciptakan pertumbuhan ekonomi. PT. MRT membagi pembangunan menjadi 2 fase, pada fase 1 ini telah dibangun jalur kereta sepanjang 16 kilometer yang terdiri dari 10 kilometer jalur *elevated* yang terdiri dari 7 stasiun dan 6 kilometer jalur *underground* yang terdiri dari 6 stasiun.

Jalur bawah tanah atau *underground* merupakan pilihan yang tepat disaat Jakarta menjadi kota yang sangat padat akan penduduk dan memiliki permasalahan pada keterbatasan wilayah, namun pembangunan terowongan bawah tanah di Indonesia masih menjadi hal yang tidak biasa apalagi pada jenis tanah lunak yang merupakan jenis tanah pada proyek pembangunan stasiun bawah tanah ini, terowongan bawah tanah ini terletak pada kedalaman rentang 10m-15m dibawah permukaan tanah bergantung pada jenis tanah dan kondisi yang lain. Banyak hal yang harus di perhatikan dalam pembangunan terowongan bawah tanah agar tidak mempengaruhi struktur diatasnya maupun struktur terowongan itu

sendiri, pemahaman mengenai pencegahan kegagalan terowongan, optimasi aspek-aspek geoteknik, dan pemahaman mengenai proses yang terjadi pada tanah akibat penggalian terowongan bawah tanah.

Maka dalam Proyek Akhir ini penulis akan membahas mengenai “Evaluasi Perancangan dan Stabilitas Terowongan MRT pada Segmen CP105-1 Hingga CP105-2 Dengan Bantuan *Software* Plaxis 2D dan GEO5” dengan pokok bahasan menganalisa faktor-faktor yang yang memengaruhi stabilitas terowongan dan perilaku teknis dari terowongan bawah tanah, seperti deformasi pada dinding terowongan, penurunan permukaan tanah, *safety factor*, dan juga lendutan terowongan.

1.2. Rumusan Masalah

Seiring dengan pembangunan terowongan bawah tanah pada proyek ini, terowongan harus dibangun dibawah bangunan maupun jalanan umum, hal tersebut menjadi permasalahann yang timbul, antara lain :

1. Apakah faktor yang menyebabkan deformasi dan stabilitas terowongan
2. Bagaimana deformasi yang terjadi pada penampang terowongan (*cross section*)
3. Bagaimana penurunan permukaan tanah akibat adanya pengeboran terowongan
4. Bagaimana kondisi stabilitas atau *safety factor* pada terowongan
5. Bagaimana lendutan yang terjadi pada arah memanjang terowongan (*longitudinal section*)
6. Bagaimana cara pemodelan terowongan dengan program bantu Plaxis dan GEO5-*beam*

1.3. Tujuan

Secara umum Tugas Akhir ini akan melihat evaluasi stabilitas terowongan bawah tanah akibat adanya beban diatasnya menggunakan program Plaxis. Adapun maksud dan tujuan dari

Tugas Akhir ini adalah :

1. Mengetahui faktor apa saja yang memengaruhi stabilitas dan deformasi terowongan
2. Mengetahui pola dan besarnya deformasi yang terjadi pada penampang terowongan (*cross section*)
3. Mengetahui pola dan besarnya penurunan permukaan tanah akibat pengeboran terowongan
4. Mengetahui stabilitas atau *safety factor* terowongan
5. Mengetahui besarnya lendutan yang terjadi pada arah memanjang terowongan (*longitudinal section*)
6. Mengetahui bagaimana tahapan dalam pemodelan terowongan menggunakan program bantu Plaxis dan GEO5-*beam*

1.4. Manfaat

Penulisan proyek akhir ini dapat memberikan manfaat kepada pihak-pihak terkait, dalam hal ini adalah kontraktor serta penulis sendiri.

1.5. Manfaat Bagi Pembaca

Penulis dalam hal ini melakukan evaluasi stabilitas terowongan bawah tanah akibat beban di atasnya, maka nantinya dapat diketahui bagaimana metode yang tepat dalam proses pengeboran terowongan bawah tanah agar tidak mengganggu aktivitas sekitar. Sehingga pembaca dapat mengerti faktor apa saja yang mempengaruhi stabilitas terowongan bawah tanah dan dapat menentukan metode pelaksanaan yang tepat agar tidak mengganggu aktivitas sekitar.

1.6. Manfaat Bagi Penulis

Dalam hal ini penulis dapat mengaplikasikan ilmu yang diterima selama di bangku perkuliahan yang nantinya dapat diterapkan pada dunia nyata sehingga dapat bermanfaat untuk kemajuan bangsa.

1.7. Batasan Masalah

Dalam penulisan proyek akhir ini, penulis membatasi beberapa permasalahan sebagai berikut :

1. Lokasi yang ditinjau adalah CP105-1 sampai CP105-2.
2. Data tanah dasar yang digunakan adalah titik *Bore Hole 105-1*
3. Gaya dalam dan stabilitas pada terowongan didapatkan dari hasil pemodelan menggunakan program bantu Plaxis.
4. Lendutan pada arah memanjang terowongan didapatkan dari hasil pemodelan menggunakan program bantu GEO5-*beam*.
5. Tidak menghitung desain struktural terowongan (rencana penulangan)
6. Analisis tanah disederhanakan dengan menggunakan perilaku Mohr-Coulomb
7. Beban permukaan yang diperhitungkan hanya beban jalan
8. Data geoteknik diperoleh dari *Geotechnical Interpretative Report* milik PT. MRT Jakarta
9. Data dimensi terowongan diperoleh dari PT. MRT Jakarta
10. Analisa gempa yang digunakan hanya diasumsikan terjadi pada arah vertikal akibat adanya beban permukaan

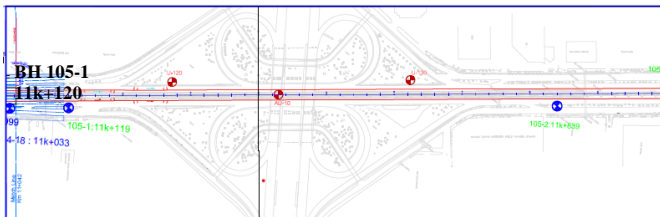
1.8. Lokasi Proyek

Proyek MRT fase 1 terbentang dari daerah lebak bulus hingga bundaran HI, pada penyelesaian proyek akhir ini diambil data terowongan bawah tanah pada segmen CP 105 yang terletak diantara stasiun istora senayan dan stasiun bendungan hilir.



Gambar 1. 1. Lokasi Proyek

(Sumber : <https://www.jakartamrt.co.id/>, diakses pada November 2019)



Gambar 1. 2. Denah *Bore Hole*

(sumber: Geotechnical Interpretative Report , PT. MRT Jakarta 2014)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Definisi Terowongan

Terowongan adalah struktur bawah tanah yang mempunyai panjang lebih dari lebar penampang galiannya. Pada umumnya terowongan tertutup di seluruh sisi kecuali di kedua ujungnya yang terbuka pada lingkaran luar. Terowongan merupakan rekayasa infrastruktur yang dapat dibuat menembus gunung, dibawah sungai, laut, atau dibawah tanah guna memenuhi keperluan transportasi, pengairan, pertahanan, penyimpanan, energy, dan lain sebagainya dalam menghadapi keterbatasan ruang dan lahan. Terowongan pada umumnya dibuat melalui berbanah dan bebatuan sehingga metode konstruksi pembuatan terowongan tergantung dari kedalaman tanah. Metode konstruksi yang lazim digunakan dalam pembuatan erowogan antara lain *Cut and Cover System*, *Pipe Jacking System (Micro Tunneling)*, *Tunnel Boring Machine (TBM)*, *New Austrian Method (NATM)*, dan *Immersed-Tube Tunneling System*.

Pada proses perencanaan terowongan haruslah mempertimbangkan beberapa aspek dan hal-hal yang diperlukan sesuai dengan fungsi terowongan, lokasi, dan kondisi lingkungan. Selain itu juga evaluasi menyeluruh terhadap kondisi keselamatan, efisiensi ekonomi, kemudahan konstruksi, ketahanan, dan pemeliharaan dalam masa layanannya.

2.2. Klasifikasi Terowongan

Paulus P Raharjo (2004) mengklasifikasikan terowongan berdasar material yang dipakai menjadi 3 jenis, yaitu:

1. Terowongan batuan (*Rock Tunnels*)

Terowongan batuan dibuat langsung pada batuan massif dengan cara pemboran atau peledakan. Pada umumnya terowongan ini lebih mudah dalam proses konstruksi daripada terowongan melalui tanah lunak, karena terowongan dengan batuan dapat berdiri sendiri

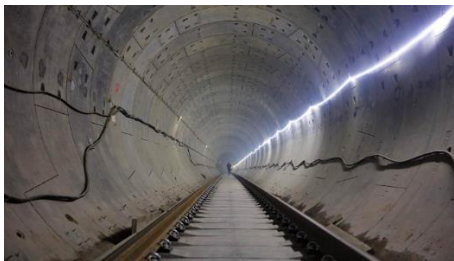
kecuali pada batuan yang mengalami retak (*fracture*)



Gambar 2. 1. Terowongan Pada Batuan

(sumber : <https://ilmubatugeologi.blogspot.com/>. diakses pada November 2019)

2. Terowongan melalui tanah lunak (*Soft Ground Tunnels*)
Terowongan melalui tanah lunak dibangun pada tanah lempung atau pasir atau batuan lunak (*soft rock*). Dikarenakan terowongan jenis ini sangat mudah runtuh apabila digali, maka diperlukan suatu dinding atau atap untuk penahan selagi proses penggalian. Umumnya digunakan pelindung (*Shield*) untuk memproteksi galian agar tidak runtuh, metode yang sering digunakan saat ini adalah *Shield Tunneling*, *Lining* langsung dipasang dibelakang *Shield* bersamaan dengan Bergeraknya *Tunnel Boring Machine*.



Gambar 2. 2. Terowongan Pada Tanah Lunak

(sumber : <https://news.cgtn.com/>. diakses pada November 2019)

3. Terowongan gali-timbun (*Cut and Cover Tunnel*)
 Terowongan ini dibuat dengan cara menggali cekungan (*trench*) kemudian dinding dan atap terowongan di konstruksikan di dalam galian. Kemudian galian ditimpun kembali dan seluruh struktur berada di bawah timbunan tanah.



Gambar 2. 3. Terowongan *Cut and Cover*

(sumber : <https://www.oasys-software.com/>. diakses pada November 2019)

2.3. Terowonganada Tanah Lunak

Pada perencanaan terowongan pada tanah lunak memiliki filosofi yang berbeda, istilah tanah lunak digunakan pada lapisan tanah yang *non-cohesive* seperti pasir kering dan kerikil, sampai tanah *cohesive* dan tanah lempung. Jenis tanah yang lunak menyebabkan rendahnya kemampuan untuk menahan berat sendiri (*stand-up time*) yang dapat menyebabkan tanah akan runtuh, pada kondisi muka air tanah berada diatas *stand-up time* ditentukan oleh kemampuan tarik menarik tanah dan kuat geser tanah, sedangkan pada kondisi dibawah muka air tanah maka angka permeabilitas yang menjadi penentu. Efek yang ditimbulkan dari air tanah juga mempengaruhi stabilitas terowongan jika berada dibawah muka air tanah. Fang (1994) mengatakan bahwa kedalaman minimal terowongan adalah $z/D \geq 1.5$, dimana z adalah kedalaman terowongan pada *axis level*, dan jarak antar tunnel $1.3D$ (*center to center*)

Penggalian terowongan akan mengubah kondisi tegangan terhadap kondisi tegangan awal, akibat adanya galian akan terjadi pelepasan tegangan yang menyebabkan redistribusi tegangan semula sehingga terjadi regangan dan deformasi, perubahan ini terjadi secara kontinu hingga mencapai titik keseimbangan yang baru. Perubahan keadaan tegangan yang disebabkan oleh penggalian terowongan tidak dapat terjadi tanpa adanya deformasi pada masa tanah. Meskipun menggunakan *lining* deformasi akan tetap terjadi, hal ini menyebabkan adanya penurunan tanah dari permukaan.

2.4. Tunnel Boring Machine (TBM)

Pada pembangunan terowongan bawah tanah kereta MRT Jakarta digunakan *Tunnel Boring Machine (TBM)* untuk mempermudah proses pelaksanaan, jenis bor yang dipilih adalah *Earth Pressure Balance (EPB)*, hal tersebut dikarenakan berdasar hasil riset jenis tanah di lokasi yang menunjukkan mayoritas tanah berjenis *silty clay*. Mesin bor ini memiliki panjang 11,955 meter dengan shield diameter 6,69 meter. TBM ini memiliki kecepatan rotasi 0,96 rpm dengan kemajuan pengeboran 12-18 meter per hari.

Mesin bor ini terdiri dari empat bagian, yaitu *cutter head*, *mixing chamber*, *screw conveyor*, dan *belt conveyor*. *Cutter head* adalah mata bor yang berputar simultan untuk menggerus tanah secara perlahan. Bagian ini dapat mengeluarkan cairan untuk membantu proses penggerusan tanah dengan berbagai tekanan permukaan yang berbeda. *Mixing Chamber* adalah tempat tanah hasil penggerusan terkumpul dan nantinya ada dikeluarkan oleh *Screw Conveyor* dan dilanjutkan dengan *Belt Conveyor* untuk dibawa dan dibuang diluar terowongan.

Selain menggerus tanah, alat bor ini juga bekerja untuk memasang segmen beton pada waktu yang bersamaan. Segmen beton ini yang nantinya akan membentuk dan menahan tekanan tanah dari luar terowongan. Setiap TBM bergerak maju sekitar 1,7 meter, mesin akan secara otomatis memasang segmen beton terowongan. Segmen ini memiliki ukuran lebar 1,5 meter dengan

diameter dalam terowongan 6,05 meter. Satu lingkaran cincin terowongan segmen dibentuk dari enam segmen, setelah satu cincin lingkaran terowongan terbentuk maka TBM akan kembali maju. Begitu seterusnya hingga proses pembuatan terowongan selesai.



Gambar 2. 4. TBM Proyek MRT

(sumber : <https://metro.tempo.co/>. diakses pada November 2019)

Tabel 2. 1. Spesifikasi TBM

(Sumber : <https://www.jakartamrt.co.id/>, diakses pada November 2019)

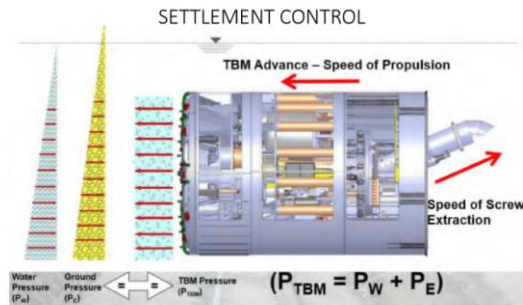
Shield diameter	6.69 m
Panjang	11.95 m
Kecepatan rotasi	0.96 rpm
Diameter tunnel (<i>inner</i>)	6.05 m
Kemajuan pengeboran	12-18 m/hari

2.4.1. *Earth Pressure Balance (EPB)*

Konsep dasar dari cara kerja TBM tipe Earth Pressure Balance ini adalah dengan memberikan gaya yang seimbang antara *face pressure* TBM dengan tekanan tanah dan tekanan air yang dilawan (Gambar 2.5), maka *excavation chamber* dan *screw conveyor* haruslah terkontrol agar tekanan yang diberikan tetap stabil. Jika tekanan yang diberikan kurang dari tekanan tanah atau biasa disebut *face loss* maka akan terjadi *settlement*, sebaliknya jika tekanan yang diberikan berlebihan maka akan menyebabkan tanah ekspansif. Pada saat yang bersamaan dengan pengeboran, *cutting face* akan menyempitkan zat aditif berupa *foam* yang bertujuan

untuk melunakan tanah disekitar, mencegah lempung menempel pada *cutter head* serta mencegah air masuk kedalam *excavation chamber*.

Setelah TBM bergerak maju sejauh 1.5 m maka akan dilakukan pemasangan segmen *lining*, setelah segmen terpasang maka TBM akan kembali bergerak maju. Namun pada saat ini maka akan terjadi gap antara TBM *shield* dengan *lining*, sehingga diperlukan adanya *injection liquid* untuk mengisi celah tersebut. Pada proyek MRT digunakan 2 jenis cairan, cairan A (cement, bentonite, stabilizer, water) + cairan B (sodium silicate) dimana kedua cairan tersebut dicampur dan menghasilkan cairan yang mampu berubah menjadi gel dalam waktu singkat serta mampu mengisi setiap celah yang ada sebelum berubah menjadi keras. Hal tersebut mampu mencegah *volume loss* sehingga penurunan dapat diminimalisir.



Gambar 2. 5. Konsep *TBM Earth Pressure Balance*
(sumber : Levent Ozdemir, *Balance (EPB) Mechanism*)

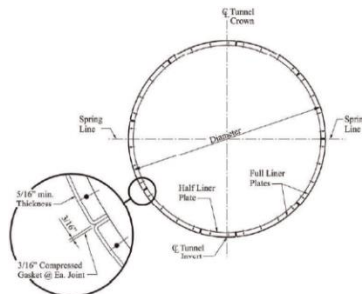
2.5. Lining Terowongan

Lining Menurut Koymbas (2005) lining adalah sebuah struktur berupa cangkang yang terbuat dari beton bertulang yang dipasang segera setelah dilakukan penggalian terowongan. Ada berbagai macam jenis lining terowongan berdasarkan cara pembuatannya adan material yang digunakan, salah satunya adalah beton pra-cetak. Ilustrasi pemasangan *lining* dapat dilihat pada

Gambar 2.7.

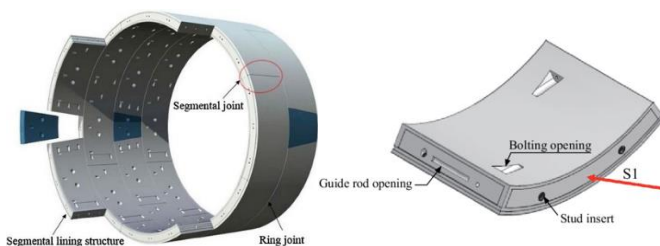
Dalam pemasangannya, lining dipisah menjadi beberapa segment, untuk memudahkan mobilisasinya. Segmen dipasang satu per satu menggunakan baut pada *radial joint* (*cross section joint*) dan *circumferential joint* (*longitudinal joint*). Pada umumnya lining pada terowongan memiliki tiga titik acuan, yaitu :

1. *Crown* yang merupakan bagian puncak dari *lining* pada terowongan
2. *Spring line* yang merupakan garis horizontal pada pusat *lining* terowongan
3. *Invert* yang merupakan bagian dasar dari *lining* terowongan



Gambar 2. 6. Pembagian Titik Acuan Terowongan

(sumber : Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnel-Civil Element,2009)



Gambar 2. 7. Ilustrasi Lining Terowongan

(sumber : Full-scale tests on bending behavior of segmental joints for large underwater shield tunnels,2018)

2.5.1. Momen Inersia *Lining*

Dalam kasus pengeboran *Tunnel* pada proyek MRT Jakarta untuk mempermudah proses pemasangan maka *lining* dibagi menjadi beberapa bagian yang terbuat dari material beton *precast*. Hal tersebut menyebabkan *lining* terowongan menjadi tidak monolit dan memengaruhi kekakuan dari *lining* tersebut. Sehingga perlu diperhitungkan momen inersia efektif dari *lining* tersebut, Muir Wood (1975) memberikan persamaan sebagai berikut:

$$I_e = I_j + I_s \left(\frac{4}{n}\right)^2 \quad (2.1)$$

Dengan :

I_e = Momen inersia efektif (kN/m⁴)

I_j = Momen inersia pada *lining joint* (kN/m⁴)

I_s = Momen inersia awal (kN/m⁴)

n = jumlah segmen (tidak termasuk *key*)

2.6. Parameter Data Tanah

2.6.1. Klasifikasi Tanah

Ukuran dari partikel tanah adalah sangat beragam dengan variasi yang cukup besar. Tanah umumnya dapat disebut sebagai kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*) atau lempung (*clay*) tergantung pada ukuran partikel tanah tersebut. Kerikil (*gravel*) adalah kepingan-kepingan dari batuan yang kadang-kadang juga mengandung partikel-partikel mineral quartz, feldspar dan mineral-mineral lainnya. Pasir (*sand*) sebagian besar terdiri dari mineral quartz dan feldspar, butiran dari mineral yang lain juga mungkin masih ada. Untuk lanau (*silt*) sebagian besar merupakan fraksi mikroskopis (berukuran sangat kecil) dari tanah yang terdiri dari butiran-butiran quartz yang sangat halus dan sejumlah partikel berbentuk lempengan-lempengan pipih yang merupakan pecahan dari mineral-mineral mika. Dan untuk lempung (*clay*) sebagian besar terdiri dari partikel mikroskopis dari submikroskopis (tidak dapat dilihat dengan jelas bila hanya dengan mikroskopis biasa)

yang berbentuk lempenganlempengan pipih dan merupakan partikel-partikel dari mika, mineral-mineral lempung, dan mineralmineral yang sangat halus lain. Untuk ukuran Pasir butirannya dengan diameter 2,0 sampai dengan 0,05 mm. sedangkan ukuran lanau butirannya dengan diameter 0,05 sampai dengan 0,002 mm. dan lempung butiran dengan diameter lebih kecil dari 0,002 mm.

2.6.2. Korelasi C_u dengan N-SPT

Terzaghi dan Peck (1967) memberikan sebuah pendekatan untuk memperkirakan nilai kuat geser *undrained* untuk tanah lempung berdasar nilai N-SPT.

$$C_u \text{ (kN/m}^2\text{)} \approx K N \quad (2.2)$$

Dimana nilai K adalah 6 dan nilai N merupakan nilai dari N-SPT desain.

2.6.3. Modulus Young

Modulus Young atau modulus elastisitas untuk tanah lempung merupakan sebuah nilai yang menunjukkan besarnya nilai elastisitas tanah yang merupakan perbandingan antara tegangan yang terjadi terhadap regangan. Bowles (1998) memberikan rentan nilai modulus elastisitas tanah berdasarkan jenis tanah, namun karena jarak antar nilai yang terlalu besar maka nilai modulus elastisitas tanah dapat di estimasi menggunakan nilai N-SPT atau nilai C_u , Bowles (1998) memberikan pendekatan empiris untuk mencari nilai E dengan menggunakan parameter C_u dapat dilihat pada Persamaan 2.3. Sedangkan untuk modulus young pada kondisi *drained* dapat dilihat pada Persamaan 2.4.

$$\begin{aligned} & \textit{Normally Consolidated clay} \\ E_u &= (200 \text{ to } 500) \times C_u \text{ (kPa)} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$E' = \frac{E_u}{1.2} \text{ (kPa)} \quad (2.4)$$

Sedangkan untuk mencari nilai Modulus Young *Drained* untuk pasir, Stroud (1974) memberikan pendekatan empiris untuk mencari nilai Modulus Young yang dapat dilihat pada Persamaan 2.5.

$$E' = 2N \text{ (MPa)} \quad (2.5)$$

2.6.4. Koefisien Tekanan Tanah Diam

Jaky (1948) memberikan persamaan untuk mencari nilai koefisien tanah diam

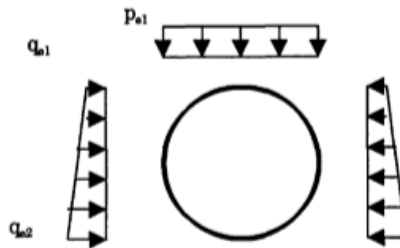
$$K_0 = 1 - \sin \emptyset \quad (2.6)$$

Dimana \emptyset merupakan nilai sudut geser tanah

2.7. Distribusi Tegangan Pada Terowongan

Akibat adanya beban atau tegangan baik dari permukaan maupun beban tanah dapat menyebabkan mengecilnya diameter *crowd* dan mengembangkan diameter horizontal dari terowongan. Akibat hal tersebut terowongan memberikan perlawanan untuk meminimalisir deformasi dan menyebabkan peningkatan momen lentur pada lining terowongan.

Kuesel (1969) menyatakan bahwa terdapat 2 faktor penting terbentuknya tekanan tanah lateral pasif, kekakuan aksial (EA) dan kekakuan letur (EI). Kekakuan aksial memiliki peranan yang lebih penting, dimana dengan angka kekakuan yang semakin besar maka tingkat efisiensi lining semakin besar, karena lining mampu menyalurkan gaya kompresih lebih baik.



Gambar 2. 8. Distribusi Tegangan Pada Terowongan
(sumber : Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining, 2000)

2.8. Teori Mekanika Tanah

2.8.1. Tegangan Efektif

Tanah yang mengalami tekanan mengakibatkan angka pori berkurang dan merubah sifat mekanis dari tanah yang lain. Tanah yang berada dibawah muka air akan dipengaruhi oleh gaya hidrostatik. Berat tanah yang terendam dibawah muka air tanah disebut dengan tanah efektif, sedangkan untuk tegangan yang terjadi disebut dengan tegangan efektif.

Tegangan efektif merupakan tegangan yang mempengaruhi kuat geser dan perubahan volume. Penurunan muka air tanah akan menyebabkan tegangan efektif menjadi semakin besar, dan sebaliknya. Apabila tegangan efektif mencapai nilai yang melebihi tegangan yang diterima tanah sebelumnya maka akan terjadi konsolidasi

Kekuatan geser suatu masa tanah merupakan perlawanan internal tanah per satuan luas terhadap keruntuhan atau pergeseran dalam tanah tersebut. Tegangan geser hanya dapat ditahan oleh butiran-butiran tanah. tegangan norma yang bekerja, ditahan oleh tanah melalui penambahan gaya antar butirannya. Pada tanah jenuh sempurna, air yang mengisi ruang pori dapat menahan tegangan normal dan akibatnya terjadi penambahan tekanan air pori.

Terzhagi (1923) memberikan persamaan tegangan efektif yang dinyatakan dengan Persamaan 2.12.

$$\sigma = \gamma_{sat} h + \gamma_w h \quad (2.7)$$

$$u = \sigma_w h \quad (2.8)$$

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.9)$$

$$\sigma' = (\gamma_{sat} h) - (\gamma_w h) \quad (2.10)$$

$$\sigma' = (\gamma_{sat} - \gamma_w) h \quad (2.11)$$

$$\sigma' = \gamma' h \quad (2.12)$$

Dimana :

σ' = Tegangan efektif (kN/m²)

σ = Tegangan normal (kN/m²)

u = Tekanan air pori (kN/m²)

γ_{sat} = Berat volume tanah jenuh (kN/m³)

γ_w = Berat volume air (kN/m³)

γ' = Berat volume tanah terendam (kN/m³)

h = Kedalaman titik tinjau (m)

2.8.2. Tekanan Tanah dalam Keadaan Diam

Pada kedalaman H dibawah permukaan tanah, suatu struktur tidak hanya terkena tekanan arah vertikal, namun juga tekanan horizontal.

Tekanan tanah diam adalah tekanan tanah yang terjadi akibat masa tanah pada struktur dalam keadaan seimbang, rasio tekanan tanah horizontal σ_h dengan tekanan tanah vertikal σ_v disebut dengan koefisien *at rest* (k_0), lihat Persamaan 2.15.

$$K_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (2.13)$$

$$\sigma_v = \gamma h \quad (2.14)$$

$$\sigma_h = K_0(\gamma h) \quad (2.15)$$

Dalam keadaan tanah terendam air sebagian nilai tekanan air pori juga diperhitungkan. Maka digunakan persamaan tekanan efektif vertikal tanah (σ'_v) dan tekanan efektif horizontal tanah (σ'_h) persamaan tekanan tanah horizontal pada kedalaman tertentu dibawah muka air dapat dilihat pada Persamaan 2.20.

$$\sigma'_v = \gamma h_1 + \gamma'(h_{i+1} - h_i) \quad (2.16)$$

$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v \quad (2.17)$$

$$\sigma_h = K_0 (\gamma h_i + \gamma'(h_{i+1} - h_i)) \quad (2.18)$$

$$u = \gamma_w (h_{i+1} - h_i) \quad (2.19)$$

$$\sigma_h = \sigma'_h + u \quad (2.20)$$

Dimana :

σ'_v = Tekanan efektif vertikal (kN/m²)

σ'_h = Tekanan efektif horizontal (kN/m²)

σ_h = Tekanan horizontal total (kN/m²)

h_i = Kedalaman titik tinjau i (m)

2.8.3. Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb

Untuk menganalisis masalah stabilitas tanah seperti daya dukung, stabilitas talud, dan tekanan tanah ke samping pada turap maupun tembok penahan tanah mula-mula kita harus mengetahui sifat ketahanan dari penggeser tanah tersebut. Kuat geser tanah merupakan perlawanan internal tanah tersebut per satuan luas terhadap keruntuhan atau pergeseran sepanjang bidang geser dalam tanah.

Menurut Mohr (1980) keruntuhan terjadi pada suatu material akibat kombinasi kritis antara tegangan normal dan geser, dan bukan akibat tegangan normal maksimal atau tegangan geser maksimal. Hubungan tegangan normal dan tegangan geser dinyatakan oleh Persamaan (2.21)

$$\tau = f(\sigma) \quad (2.21)$$

Dengan :

τ = Tegangan geser (kN/m²)

σ = Tegangan normal (kN/m²)

Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Dengan dasar

pengertian ini, bila tanah mengalami pembebanan akan ditahan oleh :

- Kohesi tanah yang tergantung pada jenis tanah dan kepadatannya
- Gesekan antar butir-butir tanah yang berbanding lurus dengan tegangan normal pada bidang gesernya

Coulomb (1776) mendefinisikannya pada persamaan (2.22)

$$\tau = c + \sigma (\tan \varphi) \quad (2.22)$$

Dengan :

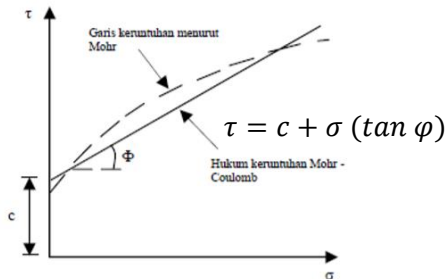
τ = Tegangan geser (kN/m^2)

σ = Tegangan normal (kN/m^2)

c = Kohesi tanah (kN/m^2)

φ = Sudut gesek dalam tanah ($^{\circ}$)

Kriteria keruntuhan/kegagalan Mohr-Coulomb terjadi apabila tegangan yang bekerja berada diluar/diatas garis kegagalan. Garis putus-putus menunjukkan garis keruntuhan sebenarnya menurut teori Mohr dengan fungsi lengkung, sedangkan garis linear menunjukkan pendekatan dari garis keruntuhan Mohr-Coulomb.



Gambar 2. 9. Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb

2.9. Pembebanan Terowongan

2.9.1. Beban Tanah

Terowongan bawah tanah akan mengalami beban akibat adanya tekanan tanah vertikal dan tekanan tanah horizontal, besarnya nilai tekanan bergantung dari jenis tanah dan kedalaman terowongan. Untuk tekanan air pori dapat diperhitungkan berdasar satu dari dua kondisi, yaitu:

- a) Tekanan air pori bekerja terpisah dengan tekanan tanah (tekanan tanah efektif)
- b) Tekanan air pori jadi satu dengan tekanan tanah (tekanan tanah total)

2.9.2. Beban Mati (Terowongan)

Beban mati merupakan berat terowongan (*lining*), dimana berat terowongan merupakan berat segmen *lining* per satuan panjang maka berat total *lining* harus dibagi dengan keliling dari *lining* tersebut, lihat Persamaan 2.23.

$$w = \frac{w_{tot}}{\pi D} \quad (2.23)$$

Dengan :

w = berat lining per satuan panjang (kN/m)

w_{tot} = Berat total lining (kN)

D = Diameter Terowongan (m)

2.9.3. Beban Tambahan (Surcharge)

Beban tambahan merupakan beban lain yang dapat menambah tekanan pada terowongan, beban permukaan atau beban tambahan diperhitungkan dan dimodelkan semirip mungkin dengan kondisi eksisting, seperti beban jalan dan beban bangunan. Pada kasus terowongan MRT segmen CP105-1 terletak diatas Jl. Jendral Sudirman yang memiliki beban tambahan berupa jalan raya selebar 65 m yang membentang hingga segmen CP105-2. mengacu

pada standar perencanaan terowongan MRT Jakarta, maka syarat beban tambahan minimal sebesar 10kN/m^2 .

Mengacu pada SNI 1725-2016, digunakan dua jenis beban yaitu beban permanen (berat sendiri, beban tambahan) dan beban lalu lintas atau beban lajur “D”.

1. Berat Sendiri

Merupakan berat sendiri dan berat dari elemen-elemen struktur yg dipikul, termasuk berat bahan. Adapun faktor pengali beban yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.2.

2. Beban Tambahan

Merupakan berat seluruh bahan yang membentuk suatu beban yang merupakan elemen nonstruktural. Faktor pengali beban tambahan dapat dilihat pada Tabel 2.3.

3. Beban Lajur “D”

Beban lajur “D” terdiri atas beban terbagi rata (BTR) dan beban garis terpusat (BGT). Faktor pengali beban dapat dilihat pada Tabel 2.4.

a) Intensitas Beban “D”

Beban terbagi rata (BTR) mempunyai intensitas q kPa dengan besar q bergantung pada bentang (L) yang dibebani.

$$\text{Jika } L \leq 30 \text{ m} : q = 9 \text{ kPa} \quad (2.24)$$

$$\text{Jika } L > 30 \text{ m} : q = 9 \left(0,5 + \frac{15}{L} \right) \text{ kPa} \quad (2.25)$$

b) Faktor Beban Dinamis (FBD)

Merupakan hasil interaksi antara kendaraan yang bergerak. Untuk bangunan terkubur tidak boleh diambil kurang dari 40%.

Tabel 2. 2. Faktor Beban Untuk Berat Sendiri
(sumber: SNI 1725:2016 Pasal 7.2)

Tipe beban	Faktor beban (γ_{MS})			
	Keadaan Batas Layan (γ_{MS}^S)		Keadaan Batas Ultimit (γ_{MS}^U)	
	Bahan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Baja	1,00	1,10	0,90
	Aluminium	1,00	1,10	0,90
	Beton pracetak	1,00	1,20	0,85
	Beton dicor di tempat	1,00	1,30	0,75
	Kayu	1,00	1,40	0,70

Tabel 2. 3. Faktor Beban Untuk Beban Tambahan
(sumber: SNI 1725:2016 Pasal 7.3)

Tipe beban	Faktor beban (γ_{MM})			
	Keadaan Batas Layan (γ_{MM}^S)		Keadaan Batas Ultimit (γ_{MM}^U)	
	Keadaan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Umum	1,00 ⁽¹⁾	2,00	0,70
	Khusus (terawasi)	1,00	1,40	0,80
Catatan ⁽¹⁾ : Faktor beban layan sebesar 1,3 digunakan untuk berat utilitas				

Tabel 2. 4. Faktor Untuk Beban Lajur "D"
(sumber: SNI 1725:2016 Pasal 8.3)

Tipe beban	Jembatan	Faktor beban (γ_{TD})	
		Keadaan Batas Layan (γ_{TD}^S)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{TD}^U)
Transien	Beton	1,00	1,80
	Boks Girder Baja	1,00	2,00

2.9.4. Beban Gempa

Dalam pemodelan terowongan terdapat 2 pemodelan gempa, *Ordinary Design Earthquake (ODE)* dan *Maximum Design Earthquake (MDE)*.

1. Ordinary Design Earthquake (ODE)

Kriteria dasar dari desain ODE adalah tidak terjadi kerusakan yang mengganggu operasional terowongan. pasca ODE lining terowongan kemungkinan akan terjadi gap antar segmen dan sedikit keretakan pada *lining*, namun tidak diperlukan adanya perbaikan. Menggunakan beban periode gempa 100 tahun.

2. Maximum Design Earthquake (MDE)

Kriteria utama dari desain MDE adalah terowongan

tidak diperbolehkan mengalami keruntuhan yang dapat membahayakan jiwa, semua kerusakan struktur harus terencana dan terkendali. Adanya gap antar segmen dan keretakan pada *lining* diperlukan adanya perbaikan. Menggunakan beban gempa periode ulang 1000 tahun.

Mengacu pada SNI 8460 tahun 2017 mengenai Persyaratan Perancangan Geoteknik, persyaratan gempa untuk terowongan dapat dilihat pada Gambar 2.10.

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"> • Tidak terjadi aliran air yang tidak terkendali • Deformasi tidak melebihi 0,5 dari tinggi jagaan • Deformasi pada filter tidak boleh melebihi 0,5 tebal filter • <i>Spillway</i> tetap berfungsi setelah terjadi gempa rencana 	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		

Gambar 2. 10. Kriteria Gempa Pada Terowongan
(sumber : SNI 8460:2017 Pasal 12.12.1)

Perencanaan terowongan menggunakan umur rencana 100 tahun dengan periode ulang 1000 tahun (MDE). Perhitungan beban gempa pada terowongan menggunakan metode pembebanan statis, dimana beban permukaan dikalikan dengan koefisien gempa setempat. Hal tersebut karena keterbatasan pada perhitungan gempa oleh Plaxis 2D, sehingga gempa hanya diasumsikan terjadi pada arah vertikal akibat adanya penambahan beban pada struktur

yang terletak diatas permukaan tanah.

$$Q_s = k \times q \quad (2.26)$$

Dimana :

Q_s = Beban akibat gempa (kN/m²)

k = Koefisien percepatan gempa

q = Beban permukaan (kN/m²)

2.9.5. Grouting

Grouting merupakan proses injeksi suatu cairan dengan tekanan untuk mengisi suatu celah yang kosong. Dalam pembangunan terowongan bawah tanah *grouting* adalah suatu hal yang penting dan kompleks, karena jenis cairan dan tekanan yang digunakan harus diperhitungkan terlebih dahulu.

Pada proyek MRT ini digunakan mesin TBM tipe EPB untuk melakukan pengeboran terowongan, dimana terdapat gap antara lebar *cutter head* dengan lebar terowongan, oleh sebab itu diperlukan adanya *grouting* untuk mengisi celah agar penurunan tanah dapat diminimalisir dan juga mencegah agar air tidak dapat meresap kedalam *lining* terowongan.

Tidak terdapat jeda waktu pada *grouting* dan tahap selanjutnya, setelah pengeboran mencapai jarak tertentu maka *lining* dari terowongan akan dipasang, setelah *lining* telah selesai dipasang TBM akan kembali bergerak maju dan seiring dengan Bergeraknya TBM maka *grouting* juga akan dilakukan untuk mengisi gap yang tercipta diantara tanah dan *lining* terowongan. Pada proyek MRT ini digunakan 2 jenis cairan, yaitu cairan A (*cement, bentonite, stabilizer, water*) dan cairan B (*sodium silicate*). Cairan beton berfungsi sebagai bahan pengisi utama celah dan sodium silicate berfungsi untuk mencegah aliran air dan mempercepat proses pengerasan beton agar penurunan tanah dapat diminimalisir. Tekanan *grouting* yang digunakan merupakan hasil *trial and error*.

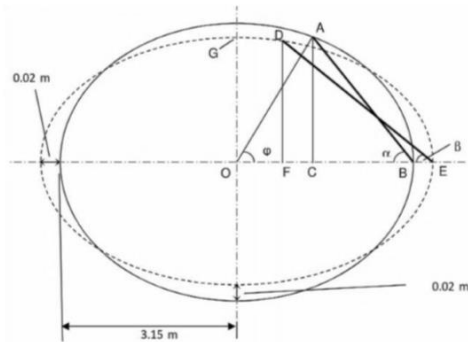
2.10. Persyaratan Teknis Terowongan

2.10.1. Deformasi

Deformasi adalah perubahan bentuk, ukuran, dan volume yang terjadi pada suatu struktur akibat adanya beban yang bekerja. Deformasi pada terowongan dapat representasikan sebagai perpindahan radial pada keliling terowongan. Deformasi yang terjadi sangat tidak seragam, hal tersebut terjadi karena perilaku terowongan terhadap tekanan tanah serta kekakuan pada sisi *crown* dan *invert* pada terowongan, *buoyancy effect* akibat adanya penggalian tanah, tekanan *grouting*, dll

Gonzalez dan Sagasetta (2001), Pinto dan Whittle (2006) membagi komponen deformasi pada terowongan menjadi 3 hal, penurunan seragam akibat *ground loss*, *tunnel ovalization* dan *vertical translation*.

Tunnel ovalization terjadi ketika sisi vertikal mengalami pemendekan dan sisi horizontal mengalami pelebaran, umumnya *tunnel ovalization* bertambah ketika tanah memiliki kekakuan yang rendah. Mengacu pada data proyek, didapati batas *ovalisation radius* pada terowongan dengan jari-jari efektif 3.15 m adalah sebesar 20mm.



Gambar 2. 11. Batas *Tunnel Ovalization*

(sumber : Bored Tunnel Design for Design Section CP105-1, PT. MRT)

2.10.2. Penurunan (settlement)

Penurunan permukaan tanah (*settlement*) akibat adanya

kehingalan volume tanah adalah hal yang menjadi perhatian besar terutama pada tanah lunak, *settlement* dapat memberikan dampak buruk pada bangunan atau struktur di sekitarnya. Salah satu hal yang dapat menyebabkan *settlement* adalah *ground loss*, hal tersebut merupakan hilangnya volume tanah akibat proses pengeboran terowongan. Terdapat 3 hal yang menyebabkan *ground loss*, yaitu *face losses*, *shield losses*, dan *tail losses*.

Peck (1969) memberikan persamaan untuk mengestimasi penurunan tanah maksimal yang terjadi akibat pengeboran terowongan bawah tanah dapat dilihat pada Persamaan 2.27, besarnya *volume loss* bergantung pada operator TBM dalam mengoperasikan tekanan dan kecepatan pengeboran Tabel 2.5.

$$S_{max} = \frac{V_L \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2}{2.5 i} \quad (2.27)$$

Dimana :

S_{max} = penurunan tanah maksimal

V_L = *Volume Loss* selama pengeboran

D = Diameter terowongan

i = Jarak titik penurunan

Tabel 2. 5. Hubungan *Volume Loss* Dengan TBM
(sumber : Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnel-Civil Element,2009)

Case	V_L (%)
Good practice in firm ground; tight control of face pressure within closed face machine in slowly raveling or squeezing ground	0.5
Usual practice with closed face machine in slowly raveling or squeezing ground	1.0
Poor practice with closed face in raveling ground	2
Poor practice with closed face machine in poor (fast raveling) ground	3
Poor practice with little face control in running ground	4.0 or more

Ranking W (1988) memberikan persamaan untuk mencari besarnya nilai i , dapat dicari menggunakan Persamaan 2.28.

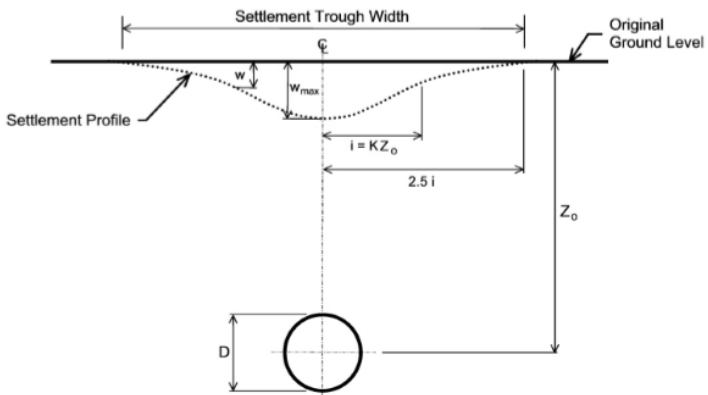
dimana nilai K merupakan koefisien tanpa dimensi, $K = 0.5$ untuk lempung dan $K = 0.25$ untuk tanah tanpa kohesi.

$$i = KZ_0 \quad (2.28)$$

Dimana :

K = Parameter penurunan (bergantung jenis tanah)

Z_0 = Kedalaman terowongan (*Axis Level*)



Gambar 2. 12. Penurunan Tanah Akibat *Volume Loss*

(sumber : Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnel-Civil Element,2009)

Selain penurunan akibat adanya kehilangan volume tanah, perlu juga dipertimbangkan pengaruh penurunan terhadap bangunan yang ada di sekitar.

Tabel 2. 6. Klasifikasi Kerusakan Berdasarkan Kemiringan dan Penurunan Bangunan

(sumber : SNI 8460:2017, Pasal 8.3.2.18)

Kategori Risiko	Kemiringan Bangunan Maksimum	Penurunan Bangunan Maksimum (mm)	Deskripsi Risiko
1	< 1/500	<10	Diabaikan: kerusakan dangkal tidak mungkin terjadi
2	1/500 hingga 1/200	10 hingga 50	Kecil: kerusakan dangkal dapat terjadi namun bukan kerusakan struktural yang signifikan
3	1/200 hingga 1/50	50 hingga 75	Sedang: kerusakan dangkal dengan kerusakan struktural pada bangunan diperkirakan terjadi, kemungkinan kerusakan pipa yang relatif kaku
4	> 1/50	> 75	Tinggi: kerusakan struktural bangunan dan pipa kaku atau pipa lainnya

2.10.3. Lentutan (deflection)

Jarak simpangan pada suatu obyek yang mengalami lentutan akibat adanya gaya atau beban yang bekerja pada obyek tersebut. Terdapat beberapa hal yang dapat mempengaruhi terjadinya defleksi, yaitu :

1. Kekakuan batang
Semakin kaku suatu batang maka lentutan yang terjadi pada batang tersebut akan semakin kecil
2. Besar kecil gaya
Gaya yang terjadi pada batang akan berbanding lurus dengan defleksi yang terjadi, semakin besar tegangan vertikal yang terjadi pada terowongan makan lentutan juga akan semakin besar. Jika gaya yang bekerja semakin kecil maka nilai lentutan juga akan semakin kecil
3. Jenis tumpuan
Jumlah reaksi dan arah pada tiap jenis tumpuan berbeda-beda. Semakin banyak reaksi dari tumpuan yang melawan gaya dari beban maka defleksi yang terjadi pada tumpuan rol lebih besar dari tumpuan sendi, dan defleksi yang terjadi pada tumpuan sendi lebih besar dari tumpuan jepit
4. Jenis beban

Jenis beban terbagi menjadi dua yaitu beban merata dan beban terpusat. Pada beban merata maka lendutan akan terjadi pada segala bagian namun bagian yang mengalami beban terbesar adalah yang mengalami lendutan terbesar, sedangkan pada beban terpusat lendutan akan terjadi pada titik dimana beban itu bekerja.

Mengacu pada *Civil Design Criteria* maka Standar minimal lendutan yang terjadi pada terowongan bawah tanah yaitu sebesar 25mm, dan perbandingan kemiringan maksimal pada terowongan adalah 1 vertikal : 2000 Horizontal

2.10.4. Stabilitas Terhadap Gaya Angkat

Pada terowongan dangkal yang terletak dibawah muka air tanah rawan mengalami gaya *uplift* akibat adanya tekanan hidrostatis oleh air (buoyancy). Faktor keamanan terhadap gaya ini adalah membandingkan gaya *uplift* (U) dengan gaya yang menahan (R). mengacu pada *Civil Design Criteria Revision 7A of Singapore LTA*, menyarankan rasio R/U tidak boleh kurang dari 1.2. Nilai R bisa dihitung dengan Persamaan 2.29. dan nilai U bisa dihitung dengan Persamaan 2.30.

$$R = \gamma' D \left(h_w + \frac{D}{2} - \frac{\pi D}{8} \right) + \gamma_b D (H - h_w) + 2S \left(H + \frac{D}{2} \right) \quad (2.29)$$

$$U = \gamma_w \frac{\pi D^2}{4} - W \quad (2.30)$$

$$SF = \frac{R}{U} \geq 1.2 \quad (2.31)$$

Dimana :

R = Gaya yang menahan

U = Gaya Uplift

W = Berat total terowongan(kN/m)

S = Rata-rata kuat geser tanah dari *axis level* terowongan hingga permukaan tanah

D = Diameter terowongan (m)

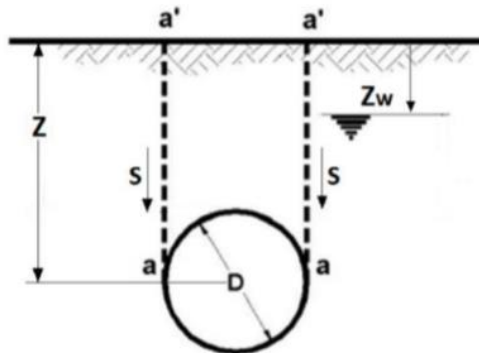
H = Jarak *axis level* terowongan hingga permukaan tanah

γ' = Berat volume efektif tanah (kN/m^3)

γ_w = Berat volume air (kN/m^3)

γ_d = Berat volume tanah kering (kN/m^3)

h_w = Jarak muka air ke permukaan tanah (m)



Gambar 2. 13. Stabilitas Terowongan Akibat Gaya Uplift
(sumber : Civil Design Criteria for Road Tunnel and Rail Transit System, 2019)

2.11. Plaxis 2D

Plaxis merupakan program berbasis metode elemen hingga untuk membantu analisis deformasi, stabilitas dan aliran air tanah dalam berbagai rekayasa geoteknik. Dengan plaxis 2D kondisi sesungguhnya dapat dimodelkan dalam regangan bidang (*plane stress*) maupun aksi-simetri. Program bantu ini memberikan layanan antarmuka grafis yang mudah digunakan serta dipahami oleh pengguna.

Pada Tugas Akhir ini digunakan model *Mohr Coulomb* yang merupakan model elastis-plastis yang terdiri dari beberapa parameter yaitu, Modulus Young (E), angka *poisson* (ν), kohesi (c), sudut geser (ϕ), dan parameter lainnya di sesuaikan dengan permodelan yang dilakukan.

2.11.1. Tahap Pemodelan Geometri

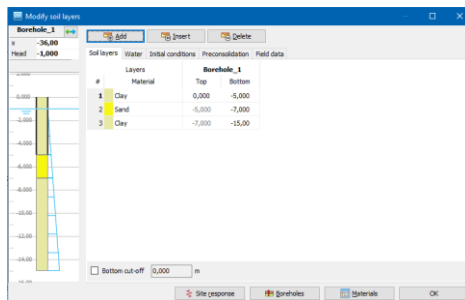
Pembuatan sebuah model elemen hingga menggunakan Plaxis 2D dimulai dengan pembuatan geometri dari model yang merupakan representasi dari masalah tanah yang akan dianalisis. sebuah model geometri terdiri dari titik-titik, garis-garis dan klaster-klaster yang di masukkan oleh pengguna. Terdapat 2 tahap utama dalam pemodelan geometri pada Plaxis 2D, yaitu:

1. *Soil*

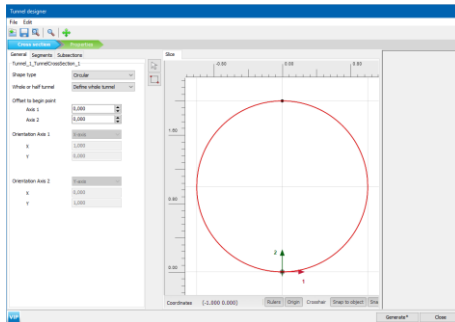
Lapisan tanah, kondisi muka air tanah, kondisi awal lapisan tanah dapat di tetapkan pada tahap ini, deskripsi dan detail dari material tanah juga diperlukan pada tahap ini. Untuk catatan bahwa lapisan tanah hanya bisa dirubah pada tahap ini.

2. *Structure*

Perwujudan dari struktur seperti dinding, pelat, dinding terowongan, *pile*, ataupun gaya (beban) seperti beban merata, beban terpusat, interaksi tanah-struktur, dll dapat ditetapkan pada tahap ini. Untuk cacatan bahwa struktur dan beban hanya dapat dirubah pada tahap ini.



Gambar 2. 14. Contoh Pemodelan Lapisan Tanah (sumber: Dokumen Pribadi)



Gambar 2. 15. Contoh Pemodelan Struktur Terowongan
(sumber: Dokumen Pribadi)

2.11.2. Tahap Perhitungan

Tahap proses perhitungan didefinisikan sebagai tahap *Calculation* yang ditandai dengan label berwarna hijau. Pada tahap ini perwujudan seperti lapisan tanah, struktur dan beban, tidak dapat dirubah lagi. Namun untuk parameter material dan nilai beban masih dapat dirubah. Terdapat 3 tahap utama dalam Tahap Perhitungan pada Plaxis 2D, yaitu:

1. *Mesh*

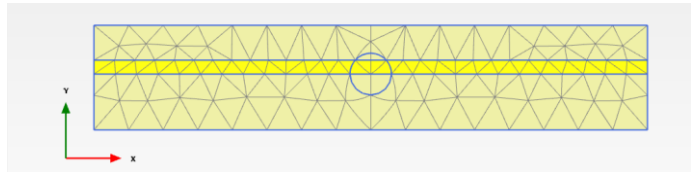
Pada tahap ini titik-titik dari pemodelan geometri dihubungkan dan akan dihasilkan jaring elemen hingga. Geometri tidak dapat dirubah lagi pada tahap ini, jika terjadi perubahan maka prosedur jaring elemen hingga perlu dilakukan kembali.

2. *Flow Conditions*

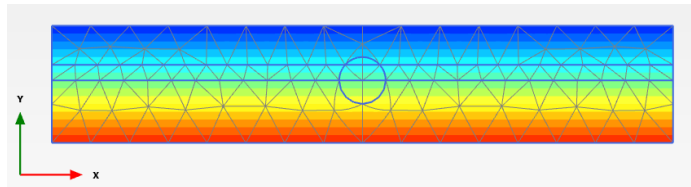
Selain pada tahap “soil”, kondisi muka air tanah pada tahap ini dapat dirubah sesuai dengan keinginan pengguna.

3. *Staged Construction*

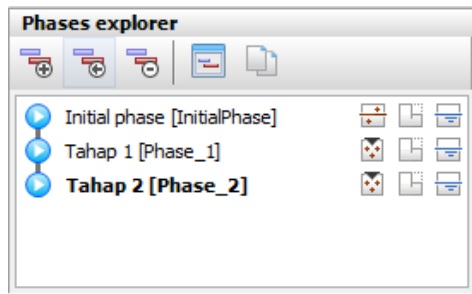
Pada tahap ini perhitungan akan dilakukan, bagian dari geometri seperti tanah, struktur dan beban dapat diaktifkan dan non-aktifkan menyesuaikan dengan kondisi yang merepresentasikan tahapan pada masalah tanah yang akan dianalisis.



Gambar 2. 16. Contoh Tahap *Mesh Calculation*
(sumber: Dokumen Pribadi)



Gambar 2. 17. Contoh Tahap *Flow Condition*
(sumber: Dokumen Pribadi)



Gambar 2. 18. Contoh Tahap *Stage Construction*
(sumber: Dokumen Pribadi)

2.11.3. Hasil Keluaran

Setelah tahap pemodelan, penyusunan jaring elemen, dan tahap perhitungan selesai, maka hasil keluaran dari permasalahan yang dianalisis dapat dilihat. Beberapa hasil keluaran yang dapat dilihat diantaranya adalah deformasi, tegangan, gaya-gaya dalam.

2.11.4. Karakteristik Material

Pada Plaxis 2D sifat material tanah dan material dari struktur dapat di masukkan pada label *material data sets*. Terdapat 4 pengelompokan berdasar jenis materialnya, *soil and interface, plate, geogrids, embreded beam rows and anchors*.

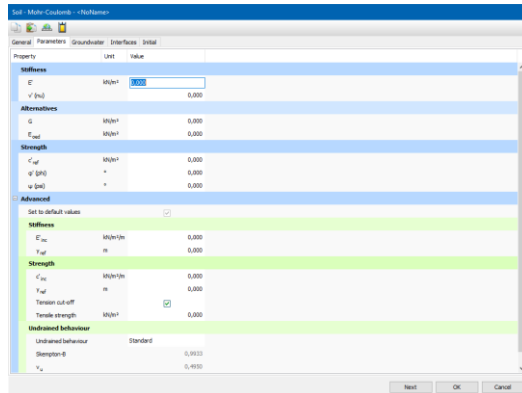
2.11.4.1. Model Material Tanah

Tanah dan batu cenderung berperilaku tidak linear jika terdapat beban, ketidak linieran perilaku tegangan-regangan ini dapat dimodelkan dengan beberapa pendekatan yang didukung oleh program bantu Plaxis 2D.

Terdapat beberapa macam model material, salah satunya adalah *Mohr-Coulomb Model (MC)*. Dengan model material ini maka kondisi elastik sempurna digunakan sebagai pendekatan pertama pada perilaku tanah secara umum. Model material ini direkomendasikan untuk digunakan pada analisa pertama, digunakan kekakuan rata-rata pada masing-masing lapisan tanah. karena yang digunakan adalah kekakuan rata-rata maka perhitungan cenderung cepat dan deformasi awal dapat diperkirakan.

Pada model material *Mohr-Coulomb Model (MC)* terdiri dari 5 parameter, yaitu :

1. E' : Modulus Young (kN/m^2)
2. ν' : *Poisson' Ratio* (-)
sebagai parameter kekakuan tanah
3. c'_{ref} : kohesi (kN/m^2)
4. ϕ : sudut geser ($^\circ$)
5. Ψ : sudut dilatasi ($^\circ$)
sebagai parameter daya dukung tanah



Gambar 2.19. Jendela Parameter Tanah Untuk Model *Mohr-Coulomb*
(sumber: Dokumen Pribadi)

2.11.4.2. Tipe Drainase

Pada prinsipnya semua model parameter pada Plaxis 2D bertujuan untuk merepresentasikan respon efektif tanah. hal yang penting pada tanah adalah tekanan air pori, tekanan pori secara signifikan mempengaruhi respon dari tanah. Plaxis 2D memberikan beberapa opsi untuk memperhitungkan dampak tekanan pori terhadap respon tanah, yaitu:

1. Perilaku *Drained*

Pada tipe drainase ini tidak akan dihasilkan tekanan air pori berlebih. Jenis ini digunakan untuk jenis tanah kering dan juga pada kondisi tanah yang terdrainase penuh karena tingginya nilai permeabilitas (pasir).

2. Perilaku *Undrained*

Tipe drainase ini digunakan pada kondisi tanah jenuh dimana air pori tidak dapat mengalir bebas, semua jenis tanah yang diberi perilaku *undrained* akan tetap meski berada diatas garis muka air tanah. terdapat 3 metode berbeda pada perilaku *undrained* ini

1. *Undrained (A)*

Pada metode ini tegangan efektif dianalisa

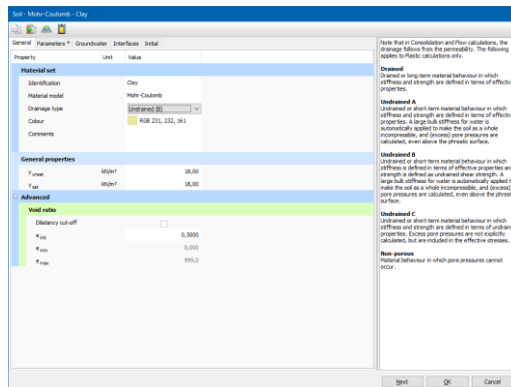
menggunakan parameter kekakuan dan daya dukung tanah. tekanan pori yang dihasilkan mungkin kurang akurat bergantung pada parameter.

2. *Undrained (B)*

Pada metode ini tegangan efektif dianalisa menggunakan parameter kekakuan dan daya dukung *undrained* tanah. tekanan pori yang dihasilkan mungkin sangat kurang akurat. Pada kasus metode ini nilai parameter $\phi = \phi_u = 0$, $\Psi = 0$, $S_u = c'$

3. *Undrained (C)*

Pada metode ini tegangan total akan dianalisa menggunakan semua parameter *undrained*. Tidak dihasilkan tegangan pori, namun nilai tegangan efektif dan tegangan pori akan digabungkan sebagai tegangan total. Pada kasus metode ini $\phi = \Psi = 0$.



Gambar 2. 20. Jenis Pemodelan *Drainage*
(sumber: Dokumen Pribadi)

2.11.4.3. Model Material Pelat

Sifat model dan parameter material pelat dapat dijalankan pada tahap ini, model pelat biasanya digunakan untuk melihat perilaku dari dinding tipis, pelat, dan cangkang tipis. Perilaku tipe material dapat dibedakan menjadi elastis dan elastoplastis. Secara umum karakteristik material pelat dibagi menjadi 3, yaitu sifat

umum, sifat kekakuan dan sifat kekuatan.

1. Sifat Umum

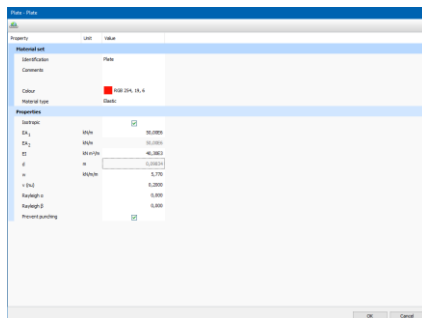
Pelat memiliki 2 sifat umum:

- a) d : merupakan tebal ekuivalen dalam satuan panjang yang dihitung secara otomatis melalui ratio parameter EA dan EI
- b) w : merupakan gaya persatuan panjang dan lebar pada arah datar, berat spesifik dari pelat dapat dimasukan secara manual.

2. Sifat Kekakuan

Pada perilaku elastis, beberapa parameter harus dimasukkan secara spesifik

- a) EA: pada perilaku elastis di arah mendatar, kekakuan axial (EA) harus spesifik. Pada model axisymmetric dan plane strain nilai EA merupakan kekakuan per satuan panjang
- b) EA₂: angka 2 menunjukkan arah dari nilai kekakuan aksial
- c) EI: pada perilaku elastis, kekakuan lentur (EI) harus spesifik. Pada model axisymmetric dan plane strain nilai EI merupakan kekakuan per satuan panjang
- d) ν (ν): Poisson's ratio



Gambar 2. 21. Jendela Parameter Pelat (*lining*)
(sumber: Dokumen Pribadi)

2.11.5. *Safety Factor*

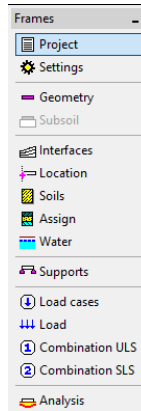
Pada program bantu Plaxis 2D *safety factor* atau angka keamanan didapatkan dari pendekatan parameter kuat geser dan juga c . Plaxis 2D akan menurunkan parameter tersebut hingga mencapai titik kegagalan atau keruntuhan, sehingga *safety factor* pada program bantu Plaxis 2D hanya memperhitungkan keruntuhan dari tanah dan tidak pada struktur.

$$\sum Msf = \frac{\tan_{\phi \text{ input}}}{\tan_{\phi \text{ reduced}}} = \frac{c_{\text{input}}}{c_{\text{reduced}}} = \frac{Su_{\text{input}}}{Su_{\text{reduced}}} = \frac{\text{Tensile Strength}_{\text{input}}}{\text{Tensile Strength}_{\text{reduced}}}$$

Prinsip hasil *safety factor* adalah kalkulasi dari mekanisme kegagalan tanah yang sesuai dengan $\sum Msf$

2.12. **GEO5 - Beams**

GEO5 merupakan sebuah program bantu dalam bidang geoteknik untuk membantu memecahkan berbagai macam permasalahan, di dalam GEO5 terdapat berbagai macam menu, seperti *Pile Group*, *Beam*, *Abutment*, *Slab*, *Slope Ability*, dll. Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini digunakan menu *GEO beam* untuk memodelkan *longitudinal section* dari terowongan, dimana nantinya terowongan akan dimodelkan sebagai balok yang ditempatkan pada kedalaman tertentu dari suatu lapisan tanah. terdapat beberapa menu inti pada *GEO5-beams*, seperti *settings*, *geometry*, *interface*, *soils*, *assign*, *water*, *supports*, *load cases*, *load* dan *analysis*.



Gambar 2. 22. Menu Inti Pada GEO5-beams
(sumber: Dokumen Pribadi)

2.12.1. *Settings*

Tahap awal pada pemodelan terwongan menggunakan GEO5-beams adalah melakukan penentuan dasar, seperti standar analisis, metode analisis dan koefisien-koefisiennya. Dalam analisa menggunakan program bantu ini terdapat 3 metode untuk mendefinisikan lapisan tanah Winkler-Pasternak ($C1$ dan $C2$).

1. *Input $C1$ and $C2$*

Pada metode ini parameter tanah ditentukan secara manual sebagai parameter masukan

2. *Calculation of $C1$ and $C2$*

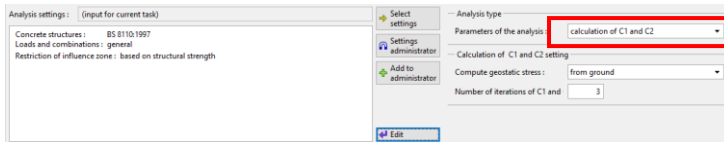
Pada metode ini lapisan tanah dihitung berdasar parameter input pada profil geologi. Tegangan geostatik dihitung melalui tanah yang telah dimasukkan.

3. *Input of E_{def} , ν , h_z*

Pada metode ini lapisan tanah dihitung menggunakan parameter modulus deformasi (E_{def}), poisson's ratio (ν) dan kedalaman (h_s)

Pada penyelesaian Tugas Akhir ini digunakan metode

“*calculation of C1 and C2*” karena lapisan tanah dapat diuraikan secara manual.

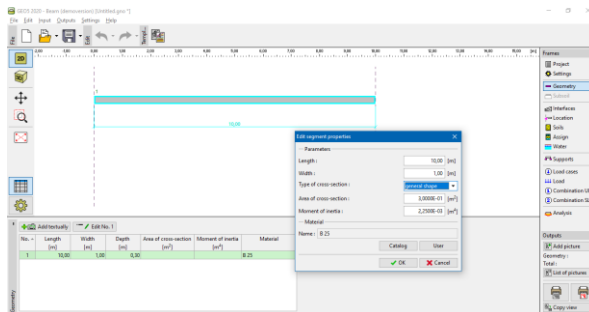


Gambar 2. 23. Jendela Menu "Settings"
(sumber: Dokumen Pribadi)

2.12.2. *Geometry*

Tahap selanjutnya pada pemodelan menggunakan *GEO5-beams* adalah pemodelan geometri. Pada menu ini pengguna dapat struktur dimana terdapat 2 pilihan, bentuk balok persegi dan bentuk umum. Pada pilihan balok persegi hanya dibutuhkan parameter panjang balok (L), lebar (B) balok dan tinggi (H). Sedangkan pada pilihan bentuk umum maka diperlukan parameter momen inersia (I) dan luas penampang (A) untuk mengasumsikannya menjadi balok.

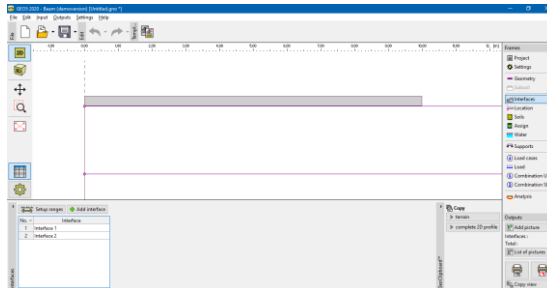
Untuk lebih detail mengenai material struktur maka pada menu “user” diperlukan parameter material seperti modulus elastis (E_c), modulus geser (G), dan berat jenis material (γ).



Gambar 2. 24. Jendela Menu “Geometry”
(sumber: Dokumen Pribadi)

2.12.3. *Interface*

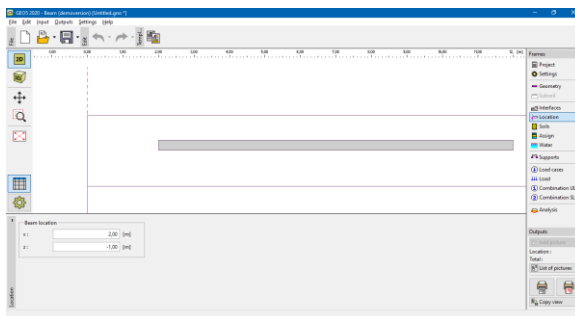
Menu “*interface*” berfungsi untuk mendeskripsikan kondisi lapisan tanah berdasarkan kondisi eksisting. Pada menu ini pengguna dapat memasukkan panjang lapisan tanah (sumbu x) serta kedalaman tanah (sumbu z).



Gambar 2. 25. Jendela Menu “*Interface*”
(sumber: Dokumen Pribadi)

2.12.4. *Location*

Menu “*location*” berfungsi untuk menentukan letak dari balok sesuai dengan kondisi eksisting, pengguna diperintahkan untuk memasukkan jarak (sumbu x) dan kedalaman (sumbu z). titik acuan dari jarak adalah sisi ujung kiri balok dan titik acuan dari kedalaman adalah sisi bawah balok.



Gambar 2. 26. Jendela Menu “*Location*”
(sumber: Dokumen Pribadi)

2.12.5. Soils

Menu “soils” bertujuan untuk memodelkan berbagai jenis lapisan tanah sesuai dengan kondisi eksisting, terdapat beberapa parameter tanah yang diperlukan, yaitu :

1. Berat Volume Tanah (γ)
2. Poisson’s Ratio (ν)
3. Modulus Deformasi (E_{def})
4. Koefisien kekuatan struktur (m)

Merupakan koefisien yang merepresentasikan kekuatan tanah terhadap deformasi akibat adanya beban hingga beban mengalami kegalalan struktur. Nilai koefisien kekuatan struktur dapat dilihat pada Tabel 2.7

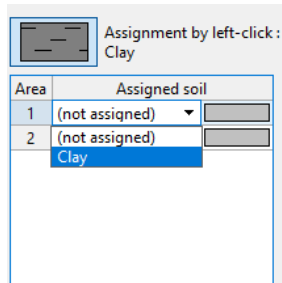
Tabel 2. 7. Koefisien Kekuatan Struktur
(sumber : *GEO5 – User’s Guide*,2018)

Type of fundamental soil	m
Very compressible fine soils class F1 -F8 - with deformation modulus $E_{def} < 4 \text{ MPa}$ - non overconsolidated - soft to hard consistency (all 3 attributes must be fulfilled), filling, made - ground secondary and tertiary sediments rocks class R1, R2	0.1
fine soils class F1 -F8, not belonging to coefficient $m = 0.1$ or 0.4 or 0.6 sands and gravels class S1, S2, G1, G2 under GWT rock class R3, R4	0.2
Sands and gravels class S1, S2, G1, G2 above GWT sands and gravels with clay, silt or fine soil admixture soils class S3, S4, S5, G3, G4, G5 rocks class R5, R6	0.3
eluvium of igneous and metamorphic rocks	0.4

Gambar 2. 27. Parameter Tanah Pada Jendela Menu “Soils”
(sumber: Dokumen Pribadi)

2.12.6. Assigns

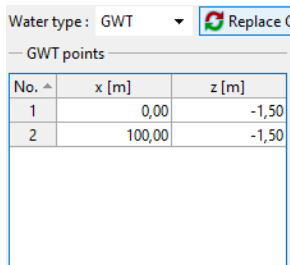
Menu “*assign*” bertujuan untuk memasukkan parameter tanah yang telah dibuat pada lapisan tanah pada pemodelan.



Gambar 2. 28. Memasukkan Jenis Tanah Pada Jendela Menu “*Assigns*”
(sumber: Dokumen Pribadi)

2.12.7. Water

Menu “*water*” bertujuan untuk memodelkan kondisi muka air tanah sesuai dengan kondisi eksisting yang akan dimodelkan, muka air tanah dimodelkan dengan memasukkan jarak (sumbu x) dan kedalaman (sumbu z)

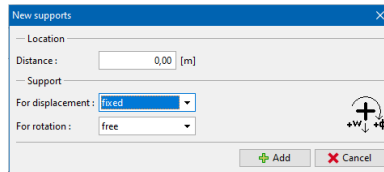


Gambar 2. 29. Pengaturan M.A.T Pada Jendela Menu “*Water*”
(sumber: Dokumen Pribadi)

2.12.8. Supports

Menu “*support*” bertujuan memberikan perletakan pada model balok yang telah dibuat, terdapat empat jenis perletakan

yang disediakan, yaitu *fixed*, *free*, *deformation* dan *spring*. Pengguna dapat meletakkan perletakan pada titik manapun (sumbu x) sesuai dengan kondisi eksisting dari struktur yang dianalisa.



Gambar 2. 30. Pemilihan Perletakan Pada Jendela Menu "Supports"
(sumber: Dokumen Pribadi)

2.12.9. Load Cases

Menu "*load cases*" bertujuan untuk memberikan kondisi pembebanan pada pemodelan, dalam hal ini load cases terbagi menjadi dua jenis beban, yaitu :

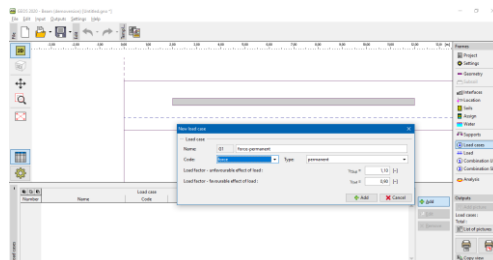
1. *Self-weight*

Merupakan berat sendiri dari balok (struktur) yang telah dimodelkan.

2. *Force*

Merupakan beban gaya pada balok (struktur) yang kemudian terbagi menjadi tiga jenis, yaitu :

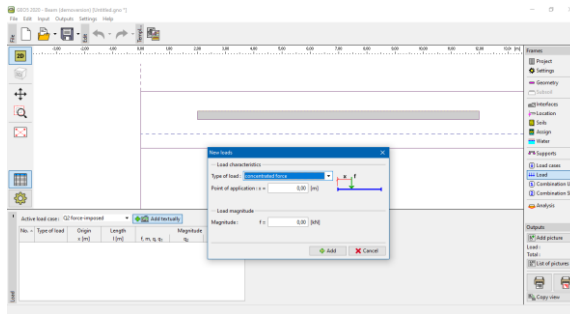
- a) *Permanent*
- b) *Accidental imposed*
- c) *Accidental*



Gambar 2. 31. Jendela Menu "Load Cases"
(sumber: Dokumen Pribadi)

2.12.10. Load

Menu “load” bertujuan untuk memasukkan besarnya beban pada kondisi beban yang telah dipilih sebelumnya. Untuk berat sendiri (*self-weight*) maka akan dihitung secara otomatis oleh program, sedangkan untuk beban gaya pengguna dapat memasukkan besarnya gaya secara manual. Terdapat empat jenis beban yang dapat dipilih, beban terpusat (*concentrated force*), momen terpusat (*concentrated moment*), beban merata (*dist. uniform on beam segmen*) dan beban trapezoidal (*dist. trapezoidal on beam segmen*).



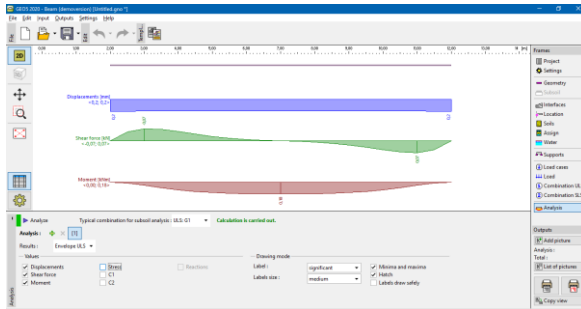
Gambar 2. 32. Jendela Menu “Load”
(sumber: Dokumen Pribadi)

2.12.11. Load Combinations

Pada kombinasi pembebanan terdapat dua jenis yang dapat dipilih untuk digunakan dalam permodelan, yaitu *ULS (Ultimate Limit State)* atau beban ultimit dan *SLS (Serviceability Limit State)* atau beban layan.

2.12.12. Analysis

Menu “analysis” bertujuan untuk menghitung hasil dari model yang telah dirancang. Keluaran dari program GEO5-beam dapat digunakan untuk melihat nilai *displacement*, *moment*, *shear force*, dll.

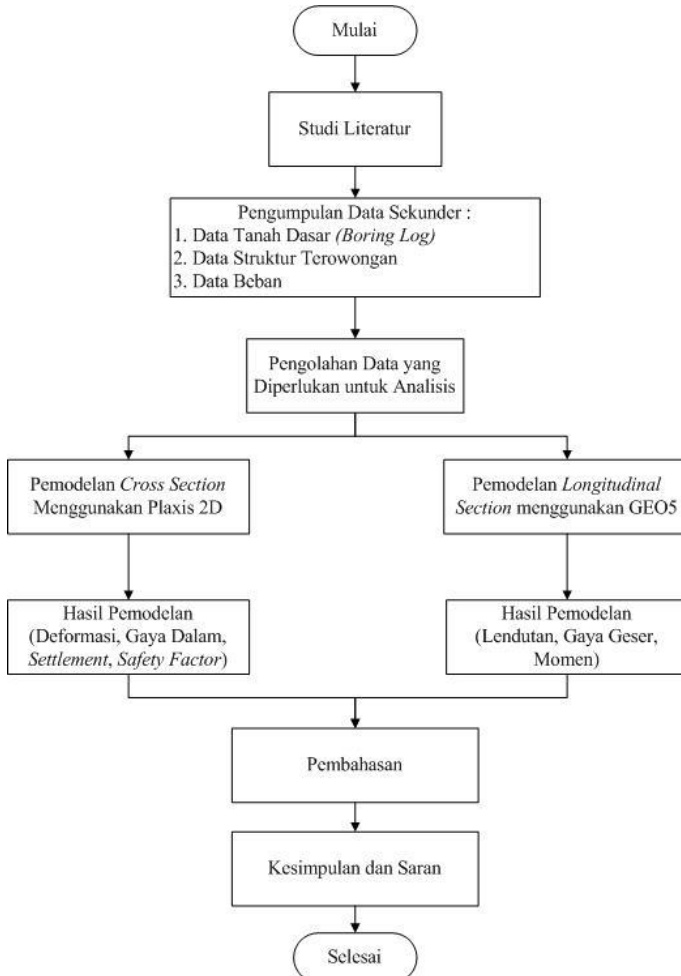


Gambar 2. 33. Jendela Menu "Analysis"
(sumber: Dokumen Pribadi)

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB III METODOLOGI

3.1. Metodologi Pengerjaan Tugas Akhir



Gambar 3. 1. Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir
(sumber : dokumen pribadi)

3.2. Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan pada Tugas Akhir ini adalah dengan mengumpulkan referensi mengenai geoteknik terowongan baik dari peraturan yang berlaku, buku, serta jurnal nasional maupun internasional

Referensi penunjang yang digunakan adalah :

1. SNI 8460-2017, Persyaratan Perencanaan Geoteknik
2. Buku Terjemahan Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid I, Braja M. Das
3. Buku Terjemahan Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 2, Braja M. Das.
4. Jurnal “*Tunnel Face Stability Analysis in Soft Ground in Urban Tunneling by EPB Shield*”, Javad Mohammadi.
5. *Geotechnical Interpretative Report*, SOJW
6. *Bored Tunnel Design for Design Section CP 105-1, SOWJ*
7. *Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining, Official Report of the International Tunneling Association*
8. *Civil Design Criteria for Road And Rail Transit Systems*
9. *Standard Specifications for Tunneling-2006 : Shield Tunnels, Japan Society of Civil Engineers*
10. *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil Elements, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration*

3.3. Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Data Tanah Dasar (Boring Log)

- Terlampir dalam Lampiran
- 2. Data *Statigraphy* Tanah
Terlampir dalam Lampiran
- 3. Gambar Desain Kedalaman Terowongan
Terlampir dalam Lampiran
- 4. Gambar Detail *Lining* Terowongan
Terlampir dalam Lampiran
- 5. Gambar Beban Permukaan
Terlampir dalam Lampiran

3.4. Analisa Beban dan Korelasi Tanah

Beban yang di terima oleh terowongan adalah beban dari tanah yang merupakan tegangan tanah vertikal, horizontal, beban terowongan itu sendiri, dan beban tambahan (*surchage*). Beban tambahan yang digunakan merupakan beban merata jalan, karena pada permukaan tanah terdapat Jalan Jendral Sudirman selebar 65 meter yang membentang sepanjang segmen CP 105-1 hingga CP 105-2. nilai tersebut didapat dari peraturan.

Beban gempa yang diterima oleh terowongan dimodelkan dengan hasil kali beban permukaan dengan koefisien gempa daerah Jakarta, hal tersebut karena untuk perhitungan beban gempa pada tanah yang lebih detail harus menggunakan *Plaxis Dynamic*.

Data tanah yang diperoleh dari pihak MRT terdapat hasil N-SPT dan hasil tes tanah, untuk data hasil tes tanah yang tidak ada maka akan digunakan korelasi dari nilai N-SPT untuk mendapatkan parameter lain yang dibutuhkan. Data tersebut nantinya akan di inputkan pada *software* *Plaxis 2D* dan *Geo5*.

3.5. Pemodelan dengan Plaxis

Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini penulis menggunakan program bantu *Plaxis 2D* untuk menyelesaikan pemodelan *Cross Section* terowongan. Semua jenis tanah akan dimodelkan ke dalam model Mohr-Coulomb dan dianalisis dengan perilaku terdrainase untuk lempung dan drainase untuk pasir. Semua tanah dimodelkan setelah geometri tanah dibuat dengan menggunakan *geometry line*

yang membentuk ruang-ruang yang disebut dengan cluster. Dalam memodelkan tanah tersebut, diperlukan parameter-parameter, yaitu E' , ν , c , dan ϕ . Analisa yang dilakukan meliputi kondisi eksisting dari terowongan saat ini.

Struktur dinding terowongan atau *lining* merupakan dinding penahan yang mampu menahan tekanan tanah vertikal dan horizontal yang kemudian akan di analisa gaya dalam, deformasi, dan stabilitas terhadap gaya *uplift* yang terjadi pada terowongan. Besarnya gaya dalam, deformasi, dan stabilitas yang terjadi kemudian akan di cocokkan dengan standar yang digunakan.

3.6. Pemodelan dengan GEO5-beam

Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini penulis menggunakan program bantu GEO5 untuk menyelesaikan pemodelan *longitudinal Section* terowongan. Kondisi tanah sepanjang segmen CP 105-1 hingga CP 105-2 hanya dimodelkan sesuai dengan lapisan tanah pada segmen CP 105-1. Kemudian terowongan dimodelkan sebagai balok yang membentang sepanjang 720 meter.

Besarnya beban permukaan merupakan hasil distribusi beban yang didapat dari program bantu Plaxis 2D, hal tersebut dikarenakan pada program bantu GEO5 beban permukaan tidak bisa diletakkan pada permukaan tanah, namun langsung mengenai permukaan balok.

Besarnya nilai momen, gaya geser, dan lendutan maksimal akan dianalisa dan di cocokkan dengan standar yang digunakan

3.7. Analisa Hasil

Hasil dari analisis berupa tabel hitungan, dan grafik akan ditampilkan. Pembahasan akan membahas mengenai stabilitas dan gaya-gaya dalam yang terjadi pada terowongan disebabkan kondisi-kondisi yang dialami terowongan.

3.8. Kesimpulan dan Saran

Dengan evaluasi yang telah dilakukan, maka akan dilakukan kontrol terhadap stabilitas terowongan MRT sehingga

mendapatkan hasil berupa analisa dan pembahasan. Setelah itu akan ditarik kesimpulan sesuai dengan kontrol yang telah dilakukan berhubungan dengan Stabilitas terowongan bawah tanah MRT

“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMODELAN

4.1. Data Sekunder Proyek

Data yang digunakan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini terdiri dari :

1. Data Geoteknik
 - a) Data Tanah
Dalam Tugas Akhir ini digunakan data tanah dasar (*Boring Log*) *Bore Hole 105-1* yang terletak pada STA. 11k+120. Data *Boring Log* tersebut terdiri dari deskripsi lapisan tanah dan nilai uji SPT (*Standard Penetration Test*)
 - b) Kedalaman Terowongan
Dalam Tugas Akhir ini kedalaman terowongan pada titik CP 105-1 terletak pada kedalaman 14.725 meter (*Tunnel Axis*) pada kondisi tanah DC1 dan DC2
2. Data Struktur
Dalam proyek ini dinding terowongan menggunakan *lining* beton *precast* yang dibagi menjadi 5 segmen dengan bentang tiap 1.5 meter untuk mempermudah pemasangan.
3. Data Pembebanan
 1. Beban Jalan
Dalam proyek ini terdapat beban jalan selebar 65 m yang diasumsikan sebagai perkerasan kaku.
 2. Beban Gempa
Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini beban gempa diasumsikan sebagai beban jalan dikali dengan koefisien percepatan gempa pada daerah Jakarta. Beban gempa hanya diasumsikan terjadi hanya pada arah vertikal akibat adanya beban permukaan saja.

4.2. Data Geoteknik

4.2.1. Data Eksisting Tanah Dasar

Pada *Contract Package* CP105 segmen TBM pertama ini terdapat 5 titik uji SPT tanah, maka digunakan titik *Bore Hole* 105-1 yang digunakan sebagai acuan dari penyelesaian Proyek Akhir ini, hal tersebut karena keterbatasan data yang dimiliki dan pada titik *Bore Hole* 105-1 dianggap memiliki N-SPT yang paling buruk, karena untuk perencanaan haruslah digunakan data tanah yang paling buruk sebagai acuan dari perencanaan. Untuk lebih detail dapat dilihat pada Lampiran 6.

Berikut ini adalah data deskripsi lapisan tanah dan N-SPT dari hasil uji SPT (*Standard Penetration Test*) tanah dasar *Bore Hole-CP105-1* pada STA. 11k+120 :

Tabel 4. 1. Hasil Uji SPT *Bore Hole* 105-1
(sumber : *Geotechnical Interpretative Report*, PT. MRT Jakarta)

Layer No.	Depth (m)	Soil Type	Soil Description	N-SPT Value	Soil Stratum
0	0.00 - 2.50	Test Pit			
1	2.50 - 9.00	Silty CLAY	silty CLAY , homogenous, 3% fine gravel, brown, firm, high plasticity, moist	6 - 10	AC1a
2	9.00 - 11.50	silty SAND	silty fine to medium SAND , lensed, brown, weak cementation, loose, moist	9	AS1a
3	11.5 - 16.00	CLAY	CLAY , homogenous, brown, stiff, medium plasticity, moist	15 - >50	DC1
4	16.00 - 17.50	Sandy CLAY	sandy CLAY , 10% sand, homogenous, dark grey, hard, low plasticity, moist	>50	DC2

Layer No.	Depth (m)	Soil Type	Soil Description	N-SPT Value	Soil Stratum
5	17.50 - 20.50	CLAY	CLAY , homogenous, dark grey, firm, medium plasticity, moist	23	DC1
6	20.50 - 22.00	Sandy CLAY	sandy CLAY , 20% sand, homogenous, brown, hard, low plasticity, moist	>50	DC2
7	22.00 - 25.00	SAND	SAND , homogenous, dark, grey, strong cementation, dense, moist	>50	DS2
8	25.00 - 27.00	clayley fine sand	sandy CLAY , 5-10% sand, dark grey, hard, low plasticity, moist	37 - 42	DC2

4.2.2. Parameter Tanah

Parameter data tanah yang digunakan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini merupakan data eksisting dari *Geotechnical Interpretative Report* MRT Jakarta, sehingga tidak diperlukan korelasi maupun perhitungan parameter dari nilai N-SPT tanah.

4.2.2.1. N-SPT Desain

Berdasarkan hasil dari beberapa *Bore Hole* sepanjang segmen. Untuk jenis tanah lempung di daerah dekat permukaan tanah biasanya menunjukkan nilai N-SPT 1-9 kemudian berubah menjadi N-SPT 10-19, secara umum perbedaan ini menunjukkan tidak adanya peningkatan N-SPT secara bertahap, sehingga untuk N-SPT tersebut dibagi menjadi 2 strata AC1a dan AC1b. Untuk lempung menengah (DC1) biasanya menunjukkan nilai N-SPT 20-30. Strata lempung DC2 diklasifikasikan sebagai lempung kaku dengan N-SPT >40. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Sedangkan untuk jenis tanah pasir strata AS1a dan AS1b

diklasifikasikan berdasar nilai N-SPT AS1a 1-9 dan AS1b 10-19, sedangkan untuk strata pasir DS1 dan DS2 diklasifikasikan berdasar kerapatan butiran, cukup rapat untuk DS1 dan sangat rapat untuk DS 2. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada Tabel 4.3

Tabel 4. 2. N-SPT Desain Lempung
(sumber : *Geotechnical Interpretative Report*, PT. MRT Jakarta)

Stratum	N-Value (range)	N-Value (Design)
AC1a	1 - 9	5
AC1b	10 - 19	15
DC1	20 - 39	25
DC2	40 - >50	45

Tabel 4. 3. N-SPT Desain Pasir
(sumber : *Geotechnical Interpretative Report*, PT. MRT Jakarta)

Stratum	N-Value (range)	N-Value (Design)
AS1a	1 - 9	5
AS1b	10 - 19	13
DS1	20 - 39	31
DS2	40 - >50	50

4.2.2.2. Berat Isi Tanah

Mengacu pada data proyek maka nilai berat isi tanah (γ) yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4. Nilai Berat Isi Tanah Desain
(sumber : *Geotechnical Interpretative Report*, PT. MRT Jakarta)

Soil Stratum	γ sat	γ unsat
	kN/m ³	kN/m ³
AC1a	16	16
AC1b	16	16
DC1	18	18
DC2	18	18

Soil Stratum	γ sat	γ unsat
	kN/m ³	kN/m ³
AS1a	18	18
AS1b	18	18
DS1	18	18
DS2	18,5	18,5

4.2.2.3. Kuat Geser *Undrained*

Mengacu pada *Terzaghi and Peck* (1967) korelasi antara N-SPT dengan nilai kuat geser dapat dicari dengan persamaan (x.x), hasil kuat geser *undrained* dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5. Nilai Kuat Geser *Undrained*
(sumber : *Geotechnical Interpretative Report*, PT. MRT Jakarta)

Soil Stratum	Description	Cu
		(Kpa)
AC1a	<i>Very Soft Clay or Silt</i>	30
AC1b	<i>Firm to Stiff Clay or Silt</i>	90
DC1	<i>Stiff to Very Stiff Clay or Silt</i>	150
DC2	<i>Stiff to Hard Clay or Silt</i>	270

4.2.2.4. Kuat Geser Efektif

Mengacu pada data proyek, maka nilai kuat geser efektif ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6. Nilai Kuat Geser Efektif
(sumber : *Geotechnical Interpretative Report*, PT. MRT Jakarta)

Soil Stratum	Description	ϕ'	c'
		°	kPa
AC1a	<i>Soft to Firm Clay or Silt</i>	28	5
AC1b	<i>Firm to Stiff Clay or Silt</i>	28	10
DC1	<i>Stiff to Very Stiff Clay or Silt</i>	32	15

Soil Stratum	Description	ϕ'	c'
		°	kPa
DC2	<i>Stiff to Hard Clay or Silt</i>	34	30
AS1a	<i>Loose Sand</i>	30	0
AS1b	<i>Medium Dense Sand</i>	32	0
DS1	<i>Medium Dense to Dense Sand</i>	34	0
DS2	<i>Dense to Very Dense Sand</i>	37	5

4.2.2.5. Modulus Young

Mengacu pada data proyek maka nilai Modulus Young pada tanah lempung dapat dicari menggunakan Persamaan 2.3. sedangkan untuk Modulus Young tanah lempung pada kondisi *drained* dapat dicari menggunakan Persamaan 2.4.

Untuk pasir maka digunakan pendekatan empiris oleh Stroud (1974) yang dapat dilihat pada Persamaan 2.5.

1. Modulus Young lempung

a) AC1a

$$\begin{aligned}
 E_u &= 250 \times C_u \\
 &= 250 \times 30 \\
 &= 7500 \text{ kPa} \\
 &= 7.5 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

b) DC1

$$\begin{aligned}
 E_u &= 400 \times C_u \\
 &= 400 \times 150 \\
 &= 60000 \text{ kPa} \\
 &= 60 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

c) DC2

$$\begin{aligned}
 E_u &= 400 \times C_u \\
 &= 400 \times 270 \\
 &= 108000 \text{ kPa} \\
 &= 108 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

2. Modulus Young pada kondisi *drained*

a) AC1a

$$\begin{aligned} E' &= E_u/1.2 \\ &= 7.5/1.2 \\ &= 6.25 \text{ MPa} \end{aligned}$$

b) DC1

$$\begin{aligned} E' &= E_u/1.2 \\ &= 60/1.2 \\ &= 50 \text{ MPa} \end{aligned}$$

c) DC2

$$\begin{aligned} E' &= E_u/1.2 \\ &= 108/1.2 \\ &= 90 \text{ MPa} \end{aligned}$$

d) AS1a= 2 x N

$$\begin{aligned} &= 2 \times 5 \\ &= 10 \text{ MPa} \end{aligned}$$

e) DS2= 2 x N

$$\begin{aligned} &= 2 \times 50 \\ &= 100 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Untuk lebih sederhananya, nilai dari Modulus Young dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7. Nilai Modulus Young Tanah
(sumber : *Geotechnical Interpretative Report*, PT. MRT Jakarta)

Soil Stratum	Description	Eu	E'
		Mpa	Mpa
AC1a	<i>Soft to Firm Clay or Silt</i>	7,5	6,25
AC1b	<i>Firm to Stiff Clay or Silt</i>	36	30
DC1	<i>Stiff to Very Stiff Clay or Silt</i>	60	50

Soil Stratum	Description	Eu	E'
		Mpa	Mpa
DC2	<i>Stiff to Hard Clay or Silt</i>	108	90
AS1a	<i>Loose Sand</i>		10
AS1b	<i>Medium Dense Sand</i>		26
DS1	<i>Medium Dense to Dense Sand</i>		50
DS2	<i>Dense to Very Dense Sand</i>		100

4.2.2.6. Koefisien Tekanan Tanah Diam

Mengacu pada data proyek maka nilai dari koefisien tekanan tanah diam dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8. Nilai Koefisien Tanah Diam
(sumber : *Geotechnical Interpretative Report*, PT. MRT Jakarta)

Soil Stratum	Description	K ₀
AC1a	<i>Soft to Firm Clay or Silt</i>	0,5
AC1b	<i>Firm to Stiff Clay or Silt</i>	0,5
DC1	<i>Stiff to Very Stiff Clay or Silt</i>	0,5
DC2	<i>Stiff to Hard Clay or Silt</i>	0,5
AS1a	<i>Loose Sand</i>	0,5
AS1b	<i>Medium Dense Sand</i>	0,5
DS1	<i>Medium Dense to Dense Sand</i>	0,5
DS2	<i>Dense to Very Dense Sand</i>	0,5

4.2.2.7. Koefisien Permeabilitas

Mengacu pada data proyek, maka nilai dari koefisien permeabilitas lempung dan pasir dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9. Nilai Koefisien Permeabilitas
(sumber : *Geotechnical Interpretative Report*, PT. MRT Jakarta)

Soil Stratum	Description	k
		m/s
AC1a	<i>Soft to Firm Clay or Silt</i>	0,0000005
AC1b	<i>Firm to Stiff Clay or Silt</i>	0,0000005
DC1	<i>Stiff to Very Stiff Clay or Silt</i>	0,0000005
DC2	<i>Stiff to Hard Clay or Silt</i>	0,0000005
AS1a	<i>Loose Sand</i>	0,00005
AS1b	<i>Medium Dense Sand</i>	0,00005
DS1	<i>Medium Dense to Dense Sand</i>	0,00005
DS2	<i>Dense to Very Dense Sand</i>	0,00005

4.2.2.8. Poisson's Ratio

Mengacu pada *Foundation Analysis and Design 5th Edition (1997)*, besaran nilai *Poisson's Ratio* memiliki korelasi untuk jenis-jenis lapisan tanah tertentu yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.

Type of soil	μ
Clay, saturated	0.4–0.5
Clay, unsaturated	0.1–0.3
Sandy clay	0.2–0.3
Silt	0.3–0.35
Sand, gravelly sand	–0.1–1.00
commonly used	0.3–0.4
Rock	0.1–0.4 (depends somewhat on type of rock)
Loess	0.1–0.3
Ice	0.36
Concrete	0.15
Steel	0.33

Gambar 4. 1. Tabel Hubungan Poisson's Ratio Terhadap Jenis Tanah
(sumber : *Foundation Analysis and Design 5th Edition, 1997*)

Maka untuk tanah lempung digunakan nilai *Poisson's Ratio* sebesar 0.3, sedangkan untuk pasir digunakan nilai *Poisson's Ratio* 0.3.

4.2.2.9. Ringkasan Parameter Tanah

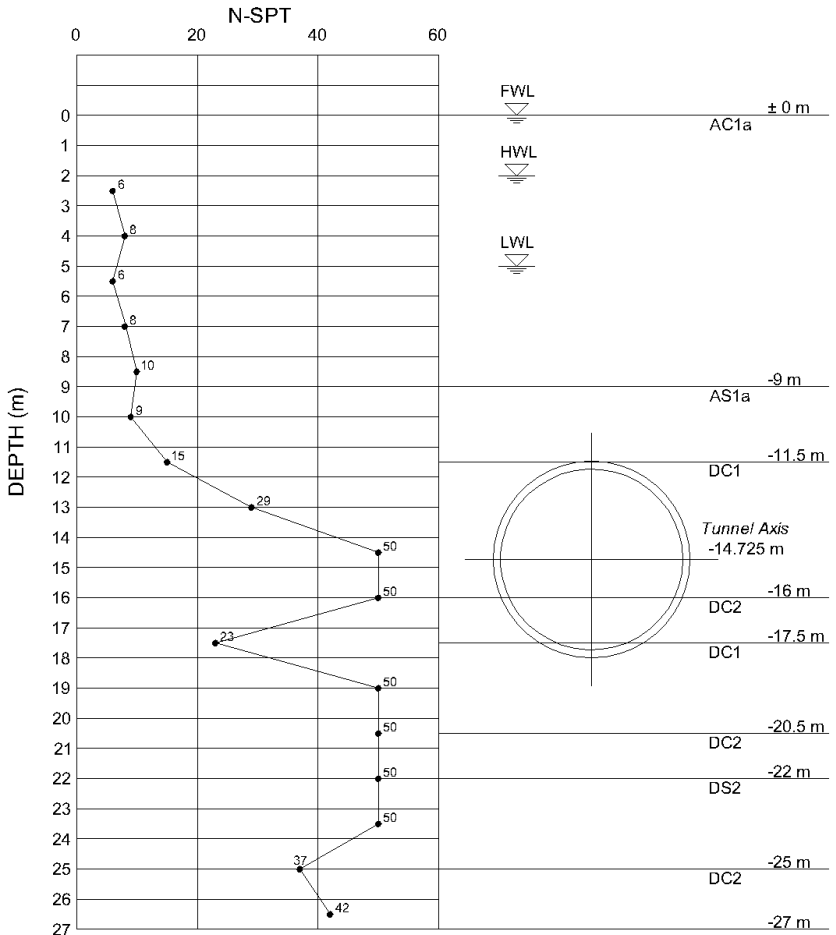
Untuk lebih ringkasnya, maka nilai parameter tanah yang digunakan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Jenis Tanah	Kode Tanah	SPT	SPT (Design)	Berat Volume Tanah (γ)	Kuat Geser <i>Undrained</i> (C_u)	Sudut Gesek Dalam (ϕ')	Kohesi (c')	Modulus Young <i>Undrained</i> (E_u)	Modulus Young <i>Drained</i> (E')	Permeability (k)	Koefisien <i>at Rest</i> (K_0)
		N	N	kN/m ³	kPa	°	kPa	MPa	MPa	m/s	
Clay	AC1a	5-9	5	16	30	28	5	7,5	6,25	0,0000005	0,5
	DC1	20-40	25	18	150	32	15	60	50	0,0000005	0,5
	DC2	>40	45	18	270	34	30	108	90	0,0000005	0,5
Sand	AS1a	1-9	5	18	-	30	0	-	10	0,00005	0,5
	DS2	>40	50	18,5	-	37	5	-	100	0,00005	0,5

Tabel 4. 10. Resume Parameter Tanah
(sumber : Dokumen Pribadi)

4.2.3. Data Kedalaman Terowongan

Mengacu pada data proyek, kedalaman terowongan pada segmen CP105-1 adalah sedalam 14.725 meter (*Axis Level*) tepat berada pada jenis tanah lempung menengah dan lempung keras (DC1 dan DC2), untuk lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2. Gambar Desain Kedalaman Terowongan
(sumber: Dokumen Pribadi)

4.3. Data Struktur

Struktur dinding terowongan (*Lining*) merupakan bagian penting terowongan untuk menahan adanya tekanan tanah baik vertikal maupun horizontal, mengacu pada data proyek terdapat data geometri *lining* (Tabel 4.11) dan mutu bahan (Tabel 4.12).

Tabel 4. 11. Geometri *Lining*
(sumber : Dokumen Pribadi)

No	Item	Ukuran	Satuan
1	Tebal <i>Lining</i> , (t_s)	250	mm
2	Diameter Dalam (D_d)	6,05	m
3	Diameter Luar (D_l)	6,55	m
4	Kedalaman <i>Tunnel</i> (Z_o)	14,725	m
5	Panjang Segmen <i>Lining</i> (L)	1,5	m

Tabel 4. 12. Mutu Bahan
(sumber : Bored Tunnel Design for Design Section CP105-1, *PT. MRT*)

No	Item	Details	Ukuran	Satuan
1	Mutu Beton (f_{cu})	C60	60	Mpa
2	Mutu Baja Tulangan (f_v)	BJTS40	390	MPa
3	Bolts (p_t)	M24 Grade 8.8	560	MPa

Dalam pemodelan terowongan baik menggunakan Plaxis 2D maupun GEO5 masih terdapat beberapa parameter yang perlu dicari terlebih dahulu, maka diperlukan perhitungan untuk mencari parameter tersebut.

1. Dalam pemodelan *Lining* dengan program bantu Plaxis 2D diperlukan parameter EA, EI, ν dan w , maka :
 - a) Mutu beton dikonversikan dari kubus menjadi silinder

$$f_c = 0.83 \times f_{cu}$$

$$= 0.83 \times 60$$

$$= 49.8 \text{ MPa}$$
 - b) Luas *Lining* (A) per satuan jarak, dimana jarak (b) = 1 m.

$$\begin{aligned}
 A &= b \times t_s \\
 &= 1 \times 0.25 \\
 &= 0.25 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

- c) Momen inersia awal (*gross*) per satuan jarak, dimana jarak (b) = 1 m

$$\begin{aligned}
 I_s &= \frac{1}{12} \times b \times t_s^3 \\
 &= \frac{1}{12} \times 1 \times 0.25^3 \\
 &= 0.001302 \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

- d) Momen inersia pada *joint*

$$I_j = 0.000382 \text{ m}^4 \text{ (dari data proyek)}$$

- e) Momen inersia efektif, lihat Persamaan 2.1.

$$\begin{aligned}
 I_e &= I_j + I_s \left(\frac{4}{n}\right)^2 \\
 &= 0.000382 + 0.001302 \left(\frac{4}{5}\right)^2 \\
 &= 0.001215 \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

- f) Modulus elastisitas beton

$$\begin{aligned}
 E_c &= 4700 \times \sqrt{f_c} \\
 &= 4700 \times \sqrt{49.8} \\
 &= 33167484 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

- g) Modulus kekakuan aksial (EA)

$$\begin{aligned}
 EA &= E_c \times A \\
 &= 33167484 \times 0.25 \\
 &= 8291871 \text{ kN/m}^2/\text{m}
 \end{aligned}$$

- h) Modulus kekakuan lentur (EI)

$$\begin{aligned}
 EI &= E_c \times I_e \\
 &= 33167484 \times 0.001215 \\
 &= 40295.3 \text{ kN/m}^2/\text{m}
 \end{aligned}$$

- i) Volume total lining per satuan panjang, dimana panjang (L) = 1 m

$$\begin{aligned}
 V &= (A_l - A_d) \times 1 \\
 A_l &= 0.25 \times \pi \times D_l^2 \\
 &= 0.25 \times \pi \times 6.55^2 \\
 &= 33.695 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_d &= 0.25 \times \pi \times D_d^2 \\
 &= 0.25 \times \pi \times 6.05^2 \\
 &= 28.748 \text{ m}^2 \\
 V &= (33.695 - 28.748) \times 1 \\
 &= 4.948 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

j) Berat total *lining*

$$\begin{aligned}
 w_{tot} &= Bf \text{ beton} \times V \\
 &= 24 \times 4.948 \\
 &= 118.752 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

k) Karena dalam parameter Plaxis 2D adalah berat *lining* per satuan panjang, maka berat total harus dibagi dengan keliling terowongan

$$\begin{aligned}
 w &= \frac{w_{tot}}{\pi \times D} \\
 &= \frac{118.752}{\pi \times 6.55} \\
 &= 5.77 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Tabel 4.13. Resume Parameter Lining (Plaxis 2D)
(sumber : Dokumen Pribadi)

Parameter	Detail	Satuan
Jenis Material	Beton	-
Pemodelan Material	<i>Plate</i>	-
Kekakuan Normal (EA)	8291871	kN/m ² /m
Kekakuan Lentur (EI)	40295,3	kN/m ² /m
Angka Poisson's (v)	0,2	-
Berat Lining (w)	5,77	kN/m

2. Dalam pemodelan *longitudinal section* menggunakan program bantu GEO5 diperlukan parameter lain yang harus dicari terlebih dahulu, yaitu :

a) Panjang balok

$$L = 720 \text{ m} \quad (\text{panjang segmen memanjang terowongan})$$

- b) Luas *lining*

$$A = A_l - A_d$$

$$= 33.695 - 28.748$$

$$= 4.948 \text{ m}^2$$
- c) Tinggi balok

$$H = \text{Diameter luar terowongan}$$

$$= 6.55 \text{ m}$$
- d) Lebar balok

$$B = \frac{A}{H}$$

$$B = \frac{4.948}{6.55}$$

$$B = 0.755 \text{ m}$$
- e) Modulus elastisita beton

$$E_c = 33167.484 \text{ MPa}$$
- f) Modulus Geser

$$G = \frac{E_c}{2(1+\nu)}$$

$$= \frac{33167.484}{2(1+0.2)}$$

$$= 13819.785 \text{ MPa}$$
- g) Momen inersia lingkaran (*lining*)

$$I = \frac{1}{4} \times \pi \times (r_l^4 - r_d^4)$$

$$= \frac{1}{4} \times \pi \times (3.275^4 - 3.025^4)$$

$$= 24.587 \text{ m}^4$$

Tabel 4. 14. Resume Parameter Lining (GEO5)
(sumber : Dokumen Pribadi)

Parameter	Detail	Satuan
Jenis Material	Beton	-
Pemodelan Material	<i>Beam</i>	-
Panjang Balok (L)	720,00	m
Lebar Balok (B)	0,76	m
Luas Lining (A)	4,9480	m ²
Momen Inersia (I)	24,59	m ⁴
Modulus Elastisitas Beton (Ec)	33167,48	Mpa

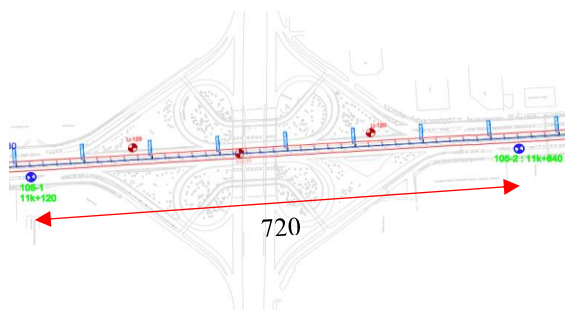
Parameter	Detail	Satuan
Modulus Geser Beton (G)	13819,79	MPa
BJ Beton Bertulang (Yc)	24	kN/m ³
Berat Total Lining (w)	118,7522	kN/m

4.4. Data Pembebanan

Pada penyelesaian Tugas Akhir ini terdapat 2 jenis pembebanan yang diterima oleh terowongan, yaitu beban permukaan berupa jalan selebar 65 meter dan juga beban gempa berupa beban jalan dikali dengan koefisien gempa daerah Jakarta

4.4.1. Beban Jalan

Mengacu pada data proyek tepat pada permukaan tanah terdapat jalan raya jendral sudirman selebar 65 meter yang membentang sepanjang 720meter. Untuk lebih detail dapat dilihat pada Gambar 4.3. karena dari data proyek hanya didapatkan panjang dan lebar jalan, maka untuk tebal lapisan dan parameter lain yang digunakan berupa asumsi.



Gambar 4. 3. Jarak BH 105-1 - BH 105-2
(sumber: Geotechnical Interpretative Report, PT. MRT Jakarta)



Gambar 4. 4. Kondisi Eksisting Jl. Jenderal Sudirman
(sumber: google maps)

Tabel 4. 15. Geometri Jalan (Asumsi)
(sumber: Dokumen Pribadi)

Jl. Jenderal Sudirman		
Jenis Lapisan Jalan	Perkerasan Kaku	
Lebar Jalan (B)	65	m
Lebar Jalan per 1 m (b)	1	m
Tebal Lapisan Jalan:	Asumsi	
- Tebal Lapis Aspal (t_a)	7,5	cm
- Tebal Lapis Beton (t_b)	20	cm
- Tebal Lapis Pondasi (t_p)	10	cm

Tabel 4. 16. Data Parameter Jalan (Asumsi)
(sumber: Dokumen Pribadi)

Data Parameter Jalan		
Mutu Beton Lapis Jalan (f_c')	35	MPa
Mutu Baja Tulangan (f_y)	400	MPa
Mutu Beton Lapis Pondasi (f_c')	5	MPa
Berat Jenis Beton (γ_{beton})	24	kN/m^3
Berat Jenis Aspal (γ_{aspal})	22	kN/m^3

1. Beban Sendiri (Perkerasan Kaku)

a) Berat Perkerasan Kaku

$$q = \gamma_{beton} \times \text{tebal lapisan}$$

$$q = 24 \times 0.2$$

$$q = 4,8 \text{ kN/m}^2$$

b) Beban Layan

$$q_s = \gamma_{MS}^S \times q$$

$$q_s = 1,0 \times 4,8$$

$$q_s = 4,8 \text{ kN/m}^2$$

c) Beban Ultimit

$$q_u = \gamma_{MS}^U \times q$$

$$q_u = 1,3 \times 4,8$$

$$q_u = 6,24 \text{ kN/m}^2$$

2. Beban Sendiri (Lapis Pondasi)

a) Berat Perkerasan Kaku

$$q = \gamma_{beton} \times \text{tebal lapisan}$$

$$q = 24 \times 0.1$$

$$q = 2,4 \text{ kN/m}^2$$

b) Beban Layan

$$q_s = \gamma_{MS}^S \times q$$

$$q_s = 1,0 \times 2,4$$

$$q_s = 2,4 \text{ kN/m}^2$$

c) Beban Ultimit

$$q_u = \gamma_{MS}^U \times q$$

$$q_u = 1,3 \times 2,4$$

$$q_u = 3,12 \text{ kN/m}^2$$

3. Beban Mati Tambahan (Aspal)

a) Berat aspal

$$q = \gamma_{aspal} \times \text{tebal lapisan}$$

$$q = 22 \times 0,075$$

$$q = 1,65 \text{ kN/m}^2$$

b) Beban layan

$$q_s = \gamma^S_{MS} \times 1,65$$

$$q_s = 1,0 \times 1,65$$

$$q_s = 1,65 \text{ kN/m}^2$$

c) Beban ultimit

$$q_u = \gamma^U_{MS} \times q$$

$$q_u = 1,4 \times 1,65$$

$$q_u = 2,31 \text{ kN/m}^2$$

4. Beban Lajur "D"

a) Beban Terbagi Rata (BTR)

$$q_{BTR} = 9 \times \left(0,5 \times \frac{15}{L}\right)$$

$$q_{BTR} = 9 \times \left(0,5 \times \frac{15}{720}\right)$$

$$q_{BTR} = 4,68 \text{ kN/m}^2$$

b) Beban Layan

$$q_s = q_{BTR} \times \gamma^S_{TD}$$

$$q_s = 4,68 \times 1,0$$

$$q_s = 4,68 \text{ kN/m}^2$$

c) Beban Ultimit

$$q_u = q_{BTR} \times \gamma^U_{TD}$$

$$q_u = 4,68 \times 1,8$$

$$q_u = 8,44 \text{ kN/m}^2$$

d) Beban Garis Terpusat (BGT)

$$q_{BGT} = FBD \times p_{BGT}$$

$$q_{BGT} = 1,4 \times 49$$

$$q_{BGT} = 24,95 \text{ kN/m}^2$$

e) Beban Layan

$$q_s = q_{BGT} \times \gamma_{TD}^s$$

$$q_s = 24,95 \times 1,0$$

$$q_s = 24,95 \text{ kN/m}^2$$

f) Beban Ultimit

$$q_u = q_{BGT} \times \gamma_{TD}^u$$

$$q_u = 24,95 \times 1,8$$

$$q_u = 44,91 \text{ kN/m}^2$$

5. Beban Bus

a) Beban Bus Bermuatan

$$q_{bus} = 15 \text{ kN/m}^2$$

6. Total Beban Layan

$$q_{S \text{ tot}} = 53,48 \text{ kN/m}^2$$

7. Total Beban Ultimit

$$q_{U \text{ tot}} = 80,00 \text{ kN/m}^2$$

4.4.2. Beban Gempa

Pada penyelesaian Tugas Akhir ini digunakan beban gempa statis, dimana beban gempa diasumsikan sebagai beban pada arah vertikal saja yang berupa beban permukaan dikali dengan koefisien percepatan gempa. Mengacu pada data PT. MRT maka didapati koefisien percepatan gempa pada periode ulang 1000th (PGA) 0.264.

1. Beban Gempa Ultimit

$$Q_s = PGA \times q_{U \text{ tot}}$$

$$Q_s = 0.264 \times 80,00$$

$$Q_s = 21,12 \text{ kN/m}^2$$

2. Beban Permukaan Total Akibat Gempa

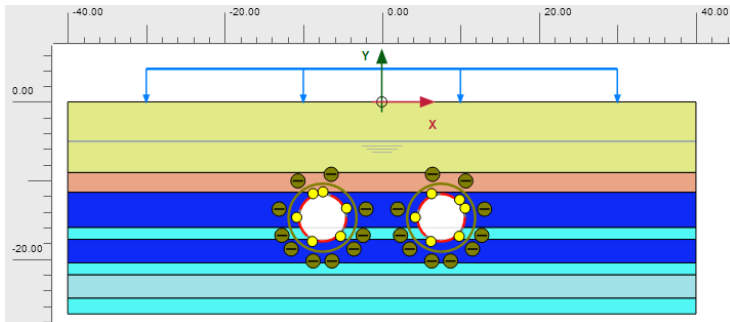
$$Q = Q_s + q_{U\ tot}$$

$$Q = 21,12 + 80,00$$

$$Q = 101,12\ kN/m^2$$

4.5. Pemodelan *Cross Section*

Setelah data parameter tanah yang diperlukan sudah diperoleh, maka pemodelan *cross section* atau penampang terowongan menggunakan program bantu Plaxis 2D dapat dilakukan. Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, digunakan kasus terowongan kembar sedalam 14.725 meter sesuai dengan kondisi pada terowongan MRT Jakarta. Pengeboran dilakukan menggunakan mesin TBM tipe EPB (*Earth Pressure Balance*), dengan dinding terowongan *precast* yang terdiri dari 5 segmen + 1 key. Pada pemodelan *cross section* ini terbagi menjadi tahapan pemodelan lapisan tanah, pemodelan struktur, pemodelan muka air, dan tahap perhitungan atau tahap konstruksi terowongan.



Gambar 4. 5. Hasil Pemodelan Geometri Terowongan Dengan Plaxis 2D
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

4.5.1. Pemodelan Lapisan Tanah

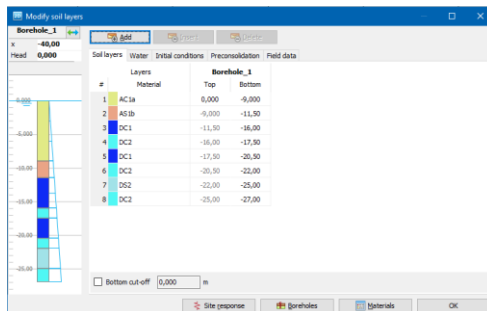
Setelah data parameter tanah yang dibutuhkan telah terkumpul, maka tahap selanjutnya adalah memodelkan lapisan tanah beserta parameter-parameter dari jenis tanah tersebut. Untuk parameter tanah yang akan di input pada Plaxis 2D dapat dilihat

pada Tabel 4.17.

Berikut adalah tahapan untuk memodelkan lapisan tanah pada program bantu Plaxis 2D.

1. Tebal Lapisan Tanah

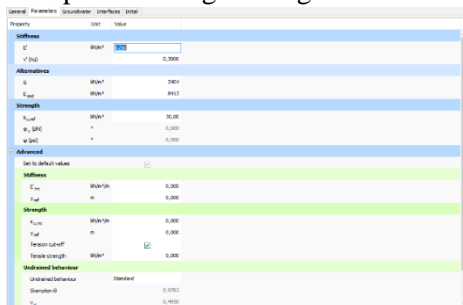
Tebal lapisan tanah dimodelkan berdasar kondisi eksisting dari proyek.



Gambar 4. 6. Pemodelan Tebal Lapisan Tanah
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

2. Material

Parameter tanah dimasukkan sesuai dengan data yang dapat dilihat pada Tabel 4.15. Kemudian parameter tanah di masukkan pada tiap lapisan tanah sesuai dengan jenis lapisan masing-masing.



Gambar 4. 7. Memasukkan Parameter Tanah
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Tabel 4. 17. Resume Parameter Tanah (Plaxis 2D)
(sumber : dokumen pribadi)

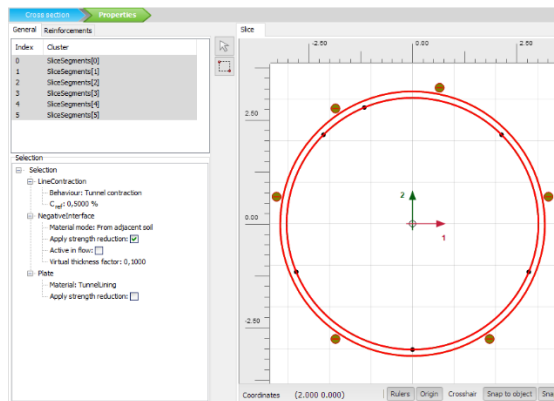
Layer No.	Depth	Layer Name	Soil Type	Material Model	Drainage Type	Gamma sat (γ_{sat})	Gamma unsat (γ_{unsat})	Modulus Young Drained (E')	Kuat Geser (Cu)	Sudut Geser Tanah (ϕ)	Angka Poisson's (ν)	Koefisien Permeabilitas
	m					kN/m ³	kN/m ³	Mpa	kPa	°		m/day
1	2.50 - 9.00	AC1a	Clay	M.C	Undrained B	16	16	6,25	30	-	0,3	0,00864
2	9.00 - 11.50	AS1a	Sand	M.C	Drained	18	18	10	-	30	0,3	0,864
3	11.5 - 16.00	DC1	Clay	M.C	Undrained B	18	18	50	150	-	0,3	0,00864
4	16.00 - 17.50	DC2	Clay	M.C	Undrained B	18	18	90	270	-	0,3	0,00864
5	17.50 - 20.50	DC1	Clay	M.C	Undrained B	18	18	50	150	-	0,3	0,00864
6	20.50 - 22.00	DC2	Clay	M.C	Undrained B	18	18	90	270	-	0,3	0,00864
7	22.00 - 25.00	DS2	Sand	M.C	Drained	18,5	18,5	100	-	37	0,3	0,864
8	25.00 - 27.00	DC2	Clay	M.C	Undrained B	18	18	90	270	-	0,3	0,00864

4.5.2. Pemodelan Struktur

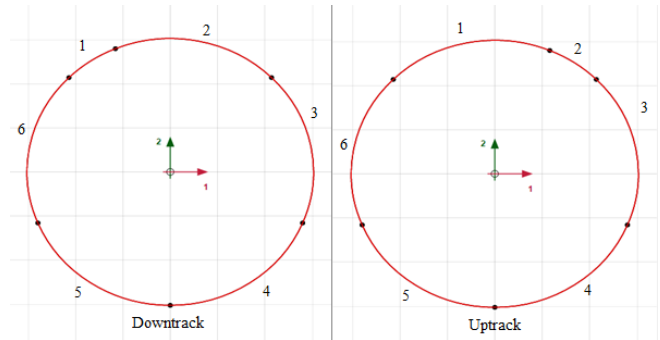
Setelah semua pemodelan tanah selesai maka tahap selanjutnya adalah memodelkan struktur dinding terowongan atau *lining* berupa pelat *precast* yang terbagi menjadi 6 segmen. Dan juga memodelkan beban permukaan berupa beban merata selebar 65 meter. Berikut adalah tahapan dalam pemodelan struktur *lining* dan beban permukaan

1. Pemodelan *Lining*

- a) *Lining* terowongan dimodelkan dengan model *Free Shape* dimana radius dan sudut tiap segmen dapat dimodelkan dengan bebas. *Lining* dimodelkan sebagai *Plate* yang kemudian diberi *Negative Interface* dimana struktur dan tanah berinteraksi secara langsung pada sisi luar *Lining*. Pada pelat *lining* diberi *line contraction* dimana ketika proses pengeboran akan terjadi *volume loss*. Untuk detail geometri *Lining* dapat dilihat pada Tabel 4.18.



Gambar 4. 8. Pemodelan Terowongan
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)



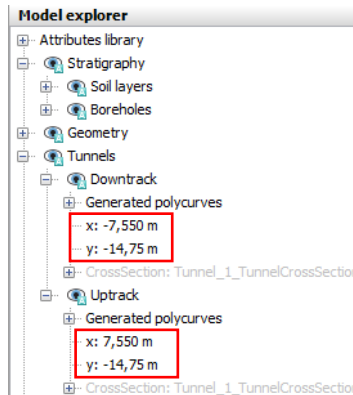
Gambar 4. 9. Pembagian Segmen Lining Terowongan
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Tabel 4. 18. Detail Geometri *Lining*
(sumber: Dokumen Pribadi)

Segment	Segment Type	Segment Angle (°)		Radius (m)
		Downtrack	Uptrack	
1	Arc	22,5	67,5	3,025
2	Arc	67,5	22,5	3,025
3	Arc	67,5	67,5	3,025
4	Arc	67,5	67,5	3,025
5	Arc	67,5	67,5	3,025
6	Arc	67,5	67,5	3,025

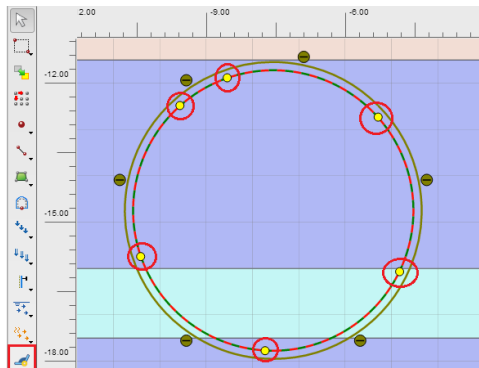
- b) Setelah geometri dari terowongan telah selesai dibuat maka selanjutnya adalah memasukkan parameter material pada tiap-tiap segmen *plate* atau *Lining* tersebut. Parameter *Lining* dapat dilihat pada Tabel 4.13.
- c) Setelah geometri dan parameter dari terowongan telah dimasukkan maka tahap selanjutnya adalah tekan tombol *generate* kemudian pilih titik dimana terowongan akan diletakkan, untuk lebih tepatnya peletakan terowongan agar lebih akurat dapat dilakukan secara manual pada jendela *Model*

Expoler, lihat Gambar 4.10.



Gambar 4. 10. Jendela *Model Expoler* Untuk Mengatur Elevasi Terowongan
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

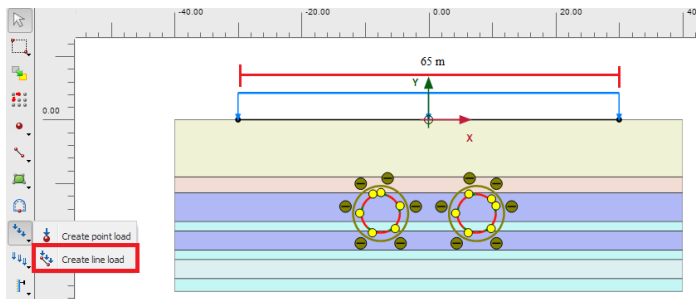
- d) Karena *lining* terowongan merupakan beton *precast* yang terbagi menjadi beberapa segmen, maka pada tiap sambungan antar segmen harus diberi sendi, lihat Gambar 4.11.



Gambar 4. 11. Pemberian Sendi Pada Terowongan
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

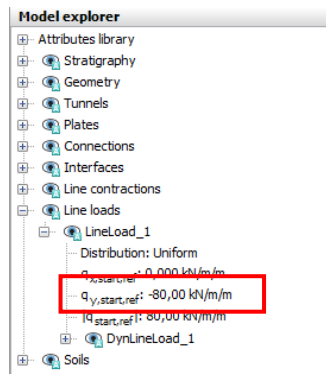
2. Pemodelan Beban Permukaan

Beban permukaan dimodelkan berupa beban merata sepanjang 65 meter, digunakan menu *create line load* untuk memodelkan beban merata, lihat Gambar 4.12. kemudian untuk besarnya beban dapat dimasukkan pada jendela *Model Explorer* pada bagian *Line Loads*. Nilai (-) menunjukkan beban ke arah kebawah, sedangkan (+) sebaliknya. Lihat Gambar 4.13.



Gambar 4. 12. Menu *Create Line Load* Untuk Pemodelan Beban

(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)



Gambar 4. 13. Jendela *Model Explorer* Untuk Mengatur Nilai Beban Permukaan

(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

4.5.3. Penyusunan Jaring Elemen

Setelah pemodelan tanah dan struktur telah selesai maka tahap selanjutnya adalah penyusunan jaring element. Pada menu *Mesh* pilih penyusunan jaring elemen atau *Generate Mesh* dan pilih *Element Distribution* menjadi *Medium*.

4.5.4. Pemodelan Muka Air

Setelah jaring elemen telah disusun, maka tahap selanjutnya adalah memasuki menu *Flow Condition* untuk memodelkan muka air tanah sesuai dengan desain. Pada penyelesaian Tugas Akhir ini terdapat beberapa model muka air tanah yang digunakan, dapat dilihat pada Tabel 4.19

Mengacu pada data proyek, maka dalam permodelan terowongan dalam kondisi gempa maka kondisi muka air yang digunakan hanya *HWL* dan *FWL* saja.

Tabel 4. 19. Model Muka Air Tanah
(sumber : *bored tunnel design for design section CP105-1*, PT. MRT)

No.	Deskripsi	Kondisi M.A.T
1	<i>High Water Level (HWL)</i>	2 m dibawah permukaan tanah
2	<i>Low Water Level (LWL)</i>	5 m dibawah permukaan tanah
3	<i>Flood Water Level (FWL)</i>	Di permukaan tanah

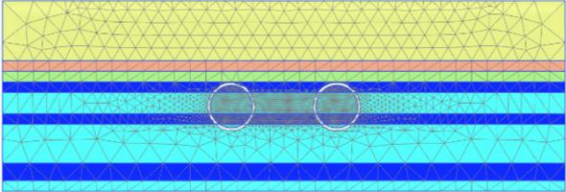
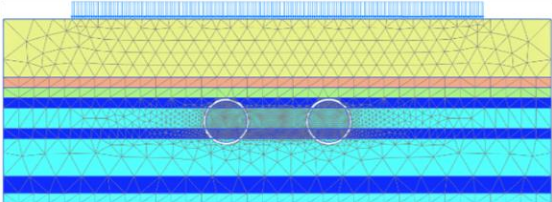
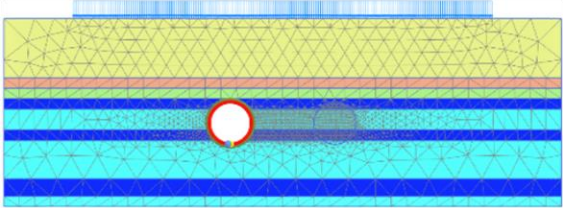
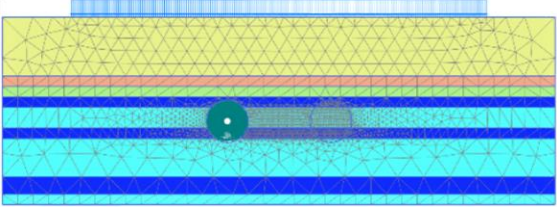
4.5.5. Tahap Perhitungan

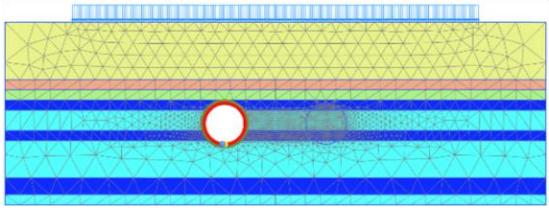
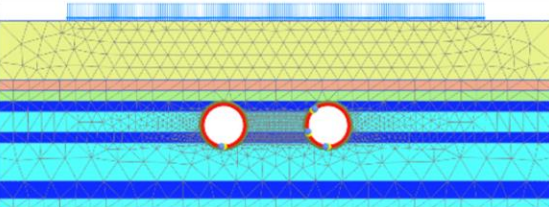
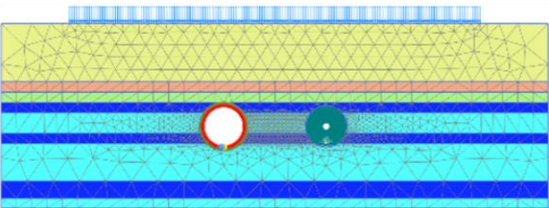
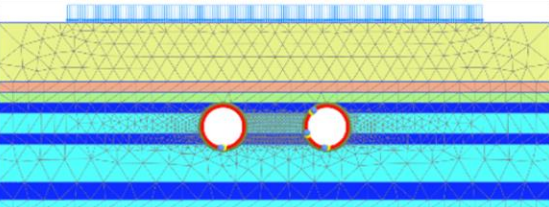
Setelah selesai pemodelan muka air tanah maka tahap selanjutnya adalah tahap perhitungan yang terletak pada menu *Stage Construction*. Pada tahap ini perhitungan dilakukan dengan cara mengaktifkan atau menonaktifkan bagian tanah ataupun struktur sesuai dengan tahapan konstruksi terowongan. Pada penyelesaian Tugas Akhir ini perhitungan terowongan dilakukan dengan penggalian terowongan *Downtrack* terlebih dahulu dan *Uptrack* setelahnya. Untuk lebih detail mengenai tahapan konstruksi maka dapat dilihat pada Tabel 4.20.

Tabel 4. 20. Tahap *Stage Constructions*
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

No	Calculation Phase	Description	Calculation Type
1	Initial Phase	Initial Condition	Plastic
2	Existing Load	Activate Surcharge Load	Plastic
3	Downtrack TBM Tunnel	1. Activate Tunnel Lining	Plastic
		2. Input Contraction Increment (0,5%)	Plastic
4	Grouting Downtrack	Input Grouting Pressure (250kN/m ²)	Plastic
5	Final Downtrack	Final Output of Downtrack Tunnel	Plastic
6	Uptrack TBM	1. Activate Tunnel Lining	Plastic
		2. Input Contraction Increment (0,5%)	Plastic
7	Grouting Uptrack Tunnel	Input Grouting Pressure (250kN/m ²)	Plastic
8	Final Uptrack	Final Output of Uptrack Tunnel	Plastic
9	Seismic Load	Input Seismic Load	Plastic
10	SF of Downtrack Tunnel	Safety Factor of Downtrack Tunnel	Safety
11	SF of Uptrack Tunnel	Safety Factor of Uptrack Tunnel	Safety
12	SF of Seismic Load	Safety Factor of Seismic Load	Safety

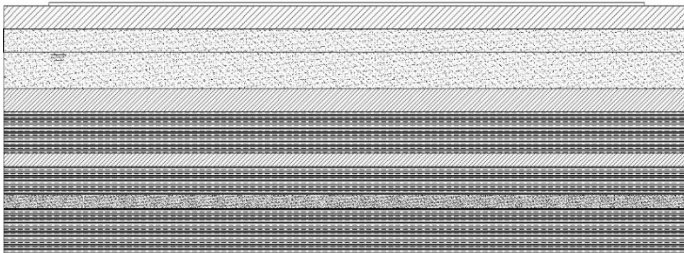
Tabel 4. 21. Tahap Aktivasi Bagian Pemodelan
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

No	Calculation Phase	Active Parts in Model
1	Initial Phase	
2	Existing Load	
3	TBM Downtrack	
4	Grouting Downtrack	

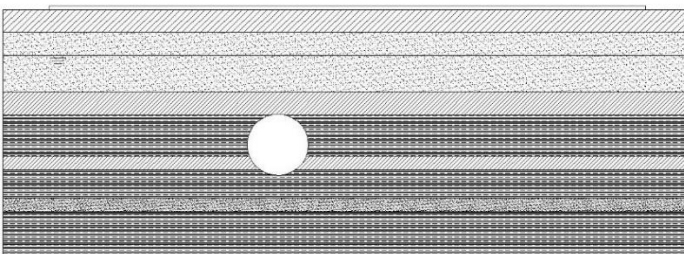
No	Calculation Phase	Active Parts in Model
5	Final Downtrack	
6	TBM Uptrack	
7	Grouting Uptrack	
8	Final Uptrack	

4.5.6. Ilustrasi Tahap Pemodelan

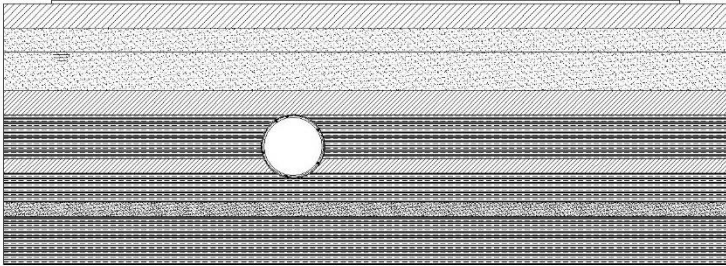
Berikut merupakan ilustrasi dari tahapan penggalian terowongan yang dimodelkan pada program bantu Plaxis 2D. Pada (Gambar 4.14) menunjukkan kondisi eksisting tanah dan juga beban permukaan berupa jalan selebar 65 meter, kemudian tahap selanjutnya penggalian terowongan *downtrack* (Gambar 4.15) menggunakan mesin TBM dengan diameter 6.7 meter, setelah dilakukan penggalian maka *lining* terowongan akan dipasang (Gambar 4.16). Karena lining terowongan memiliki diameter yang lebih kecil yaitu 6.55 meter, maka terdapat celah sebesar 7.5 cm pada tiap sisi antar tanah dan lining terowongan, untuk mengisi celah tersebut dilakukan *grouting* berupa cairan beton (Gambar 4.17) untuk meminimalisir adanya penurunan tanah. setelah pengeboran terowongan pertama telah mencapai jarak yang aman maka akan dilanjutkan dengan pengeboran terowongan *uptrack*.



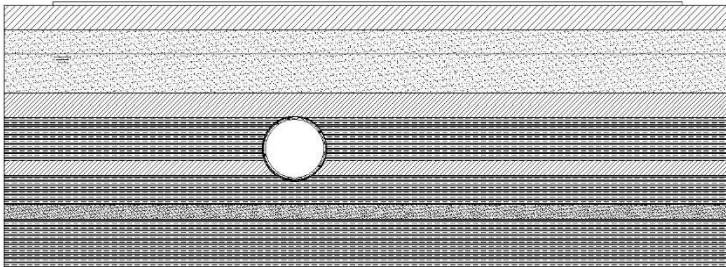
Gambar 4. 14. Kondisi Eksisting Tanah
(sumber: Dokumen Pribadi)



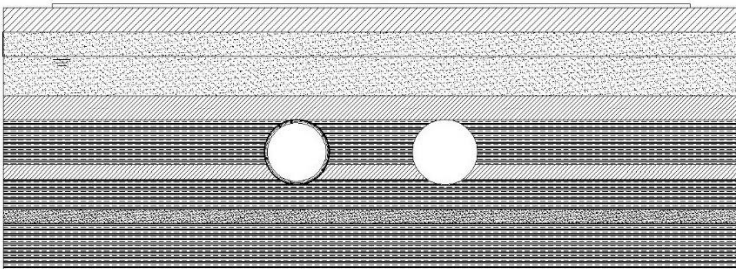
Gambar 4. 15. Penggalian Terowongan *Downtrack*
(sumber: Dokumen Pribadi)



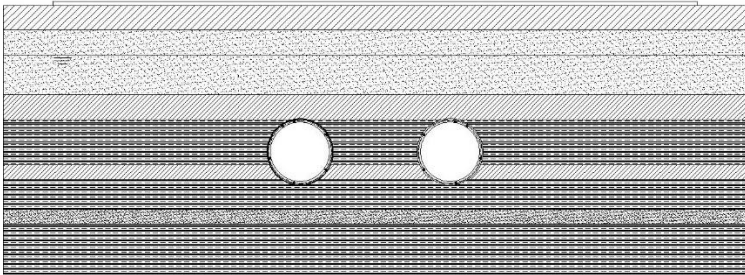
Gambar 4. 16. Pemasangan *Lining* Terowongan *Downtrack*
(sumber: Dokumen Pribadi)



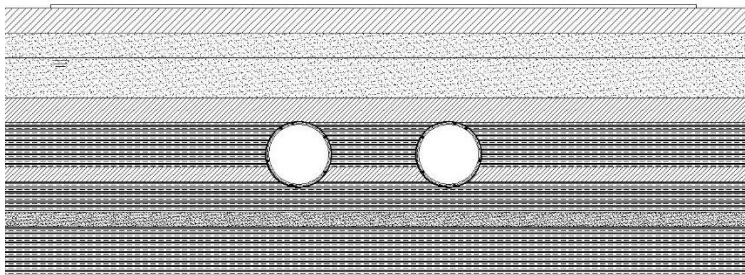
Gambar 4. 17. *Grouting* Beton Terowongan *Downtrack*
(sumber: Dokumen Pribadi)



Gambar 4. 18. Penggalan Terowongan *Uptrack*
(sumber: Dokumen Pribadi)



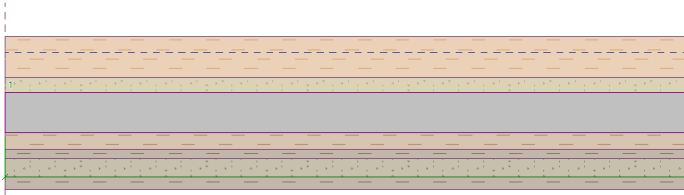
Gambar 4. 19. Pemasangan *Lining* Terowongan *Uptrack*
(sumber: Dokumen Pribadi)



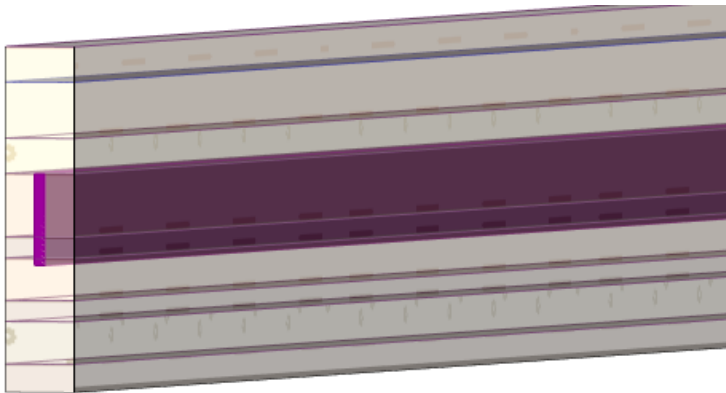
Gambar 4. 20. *Grouting* Beton Terowongan *Uptrack*
(sumber: Dokumen Pribadi)

4.6. **Pemodelan *Longitudinal Section***

Pada penyelesaian Tugas Akhir ini, pemodelan *long section* dari terowongan dilakukan menggunakan program bantu *GEOS beam*. Terowongan dimodelkan sebagai balok sepanjang 720m yang terletak pada kedalaman 14.725 meter (*axis level*). Lapisan tanah dimodelkan seperti parameter tanah pada *Bore Hole* CP105-1.



Gambar 4. 21. Hasil Pemodelan Memanjang Terowongan Dengan GEO5-*beam*
(sumber: Pemodelan GEO5-*beam*, 2020)



Gambar 4. 22. Hasil 3D Pemodelan Memanjang Terowongan Dengan GEO5-*Beam*
(sumber: Pemodelan GEO5-*beam*, 2020)

4.6.1. Geometri

Pada menu geometri maka terowongan dimodelkan sebagai balok dengan luas *lining* dan menggunakan momen inersia dari lingkaran (terowongan).

Dialog box titled "Edit segment properties" with the following fields and values:

- Length: 720,00 [m]
- Width: 0,76 [m]
- Type of cross-section: general shape
- Area of cross-section: 4,9480E-00 [m²]
- Moment of inertia: 2,4590E+01 [m⁴]
- Material Name: Lining

Buttons: Catalog, User, OK, Cancel.

Gambar 4. 23. Jendela Untuk Parameter Terowongan
(sumber: Pemodelan GEO5, 2020)

Dialog box titled "Editor of material - Concrete" with the following fields and values:

- Description of material Name: Lining

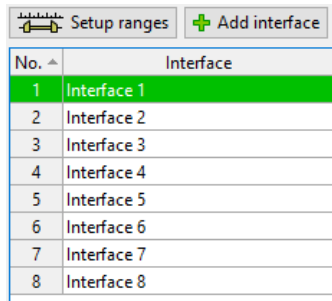
Characteristics of material		
General material characteristics		
Elasticity modulus	$E_c =$	33167,50 MPa
Shear modulus	$G =$	13819,80 MPa
Specific weight	$\gamma =$	24,00 kN/m ³

Buttons: OK, Cancel.

Gambar 4. 24. Jendela Untuk Parameter Terowongan (Lanjutan)
(sumber: Pemodelan GEO5, 2020)

4.6.2. *Interface*

Setelah geometri dan parameter dari balok telah selesai, maka selanjutnya adalah membuat lapisan tanah menggunakan menu *interface*. Lapisan tanah dimodelkan sesuai dengan kondisi pada *Bore Hole* CP105-1.

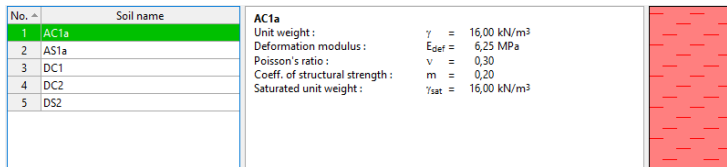


No. ^	Interface
1	Interface 1
2	Interface 2
3	Interface 3
4	Interface 4
5	Interface 5
6	Interface 6
7	Interface 7
8	Interface 8

Gambar 4. 25. Jendela Menu *Interface*
(sumber: Pemodelan GEO5, 2020)

4.6.3. *Soils*

Setelah tebal lapisan tanah telah selesai, maka tahap selanjutnya adalah membuat parameter tanah pada menu *soils*.



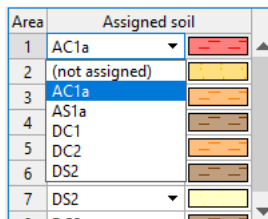
No. ^	Soil name	
1	AC1a	
2	AS1a	
3	DC1	
4	DC2	
5	DS2	

AC1a	Unit weight :	$\gamma = 16,00 \text{ kN/m}^3$
	Deformation modulus :	$E_{\text{def}} = 0,25 \text{ MPa}$
	Poisson's ratio :	$\nu = 0,30$
	Coeff. of structural strength :	$m = 0,20$
	Saturated unit weight :	$\gamma_{\text{sat}} = 16,00 \text{ kN/m}^3$

Gambar 4. 26. Jendela Menu *Soils*
(sumber: Pemodelan GEO5, 2020)

4.6.4. *Assign*

Tahap selanjutnya adalah memasukkan parameter tanah yang telah dibuat menggunakan menu *assign*.



Area	Assigned soil
1	AC1a
2	(not assigned)
3	AC1a
4	AS1a
5	DC1
6	DC2
7	DS2

Gambar 4. 27. Jendela Menu *Assign*
(sumber: Pemodelan GEO5, 2020)

4.6.5. Location

Pada tahap ini balok diletakkan pada elevasi sesuai dengan kondisi eksisting terowongan, dimana pada menu ini sisi bawah dari terowongan menjadi titik 0 dari balok. Sehingga elevasi yang digunakan adalah -17.75 m

The image shows a dialog box titled "Beam location". It contains two input fields. The first field is labeled "x :" and contains the value "0,00" followed by "[m]". The second field is labeled "z :" and contains the value "-17,75" followed by "[m]".

Gambar 4. 28. Jendela Menu *Location*
(sumber: Pemodelan GEO5, 2020)

4.6.6. Supports

Pada tiap ujung terowongan tidak diberi perletakan apapun.

4.6.7. Loads Case

Tahap selanjutnya adalah kombinasi pembebanan dimana terdapat 2 beban pada pemodelan, yaitu beban terowongan (G) dan beban permukaan (Q). Karena beban permukaan yang dimasukkan haruslah beban yang langsung mengenai balok, maka untuk nilai beban permukaan adalah hasil beban yang telah terdistribusi menjadi 34 kN/m².

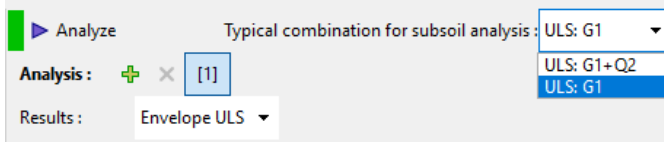
Number	Name	Load case		Load factor	
		Code	Type	7% _{Sup}	7% _{Inf}
> 1	G1 Beban Terowongan	Self-weight	Permanent	1,50	1,00
2	G2 Beban Permukaan	Force	Permanent	1,60	1,00

Gambar 4. 29. Jendela Menu *Load Case*
(sumber: Pemodelan GEO5, 2020)

4.6.8. Analysis

Tahap terakhir adalah analisis, pada tahap ini pemodelan akan dihitung agar didapati nilai penurunan, moment, dan gaya

geser pada terowongan.



Gambar 4. 30. Jendela Menu Analysis
(sumber: Pemodelan GEO5, 2020)

4.7. Penurunan Tanah (*settlement*)

Penurunan tanah maksimal akibat dari pengeboran tanah harus diperhitungkan agar tidak membahayakan bangunan atau struktur di sekitar, penurunan tanah maksimal akibat adanya pengeboran terowongan bawah tanah dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.27)

$$\begin{aligned}
 S_{max} &= \frac{0.5 \times \pi \times \left(\frac{6.55}{2}\right)^2}{2.5 \times 0.5 \times 14.725} \\
 &= 9.15 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

BAB V

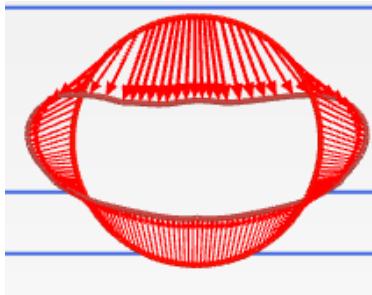
ANALISA HASIL PEMODELAN

5.1. Hasil Pemodelan *Cross Section*

Pemodelan penampang terowongan menggunakan program bantu Plaxis 2D bertujuan untuk mengetahui gaya dalam (gaya aksial, gaya geser, momen) terowongan, deformasi terowongan, angka keamanan saat penggalian terowongan, dan penurunan tanah pada permukaan akibat adanya penggalian terowongan. Setelah tahapan pemodelan mulai dari pemodelan lapisan tanah hingga tahap perhitungan, maka output dari pemodelan terowongan dengan program bantu Plaxis 2D dapat dilihat.

5.1.1. Deformasi

Hasil keluaran dari program bantu Plaxis 2D pada pemodelan terowongan menunjukkan pola deformasi terowongan seperti pada Gambar 5.1. Mengacu pada Gambar 2.11. maka deformasi maksimal pada terowongan adalah 20 mm.



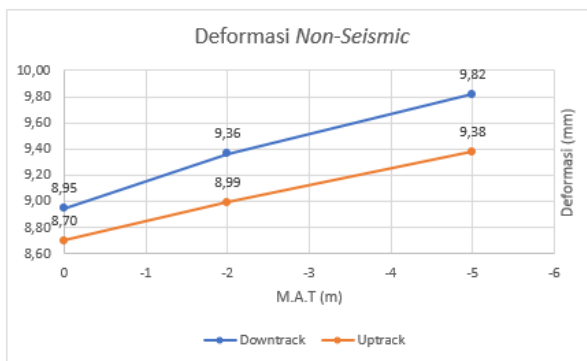
Gambar 5. 1. Pola Deformasi Pada Terowongan
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Tabel 5. 1. Hasil Deformasi Pada Kondisi *Non-Seismic*
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

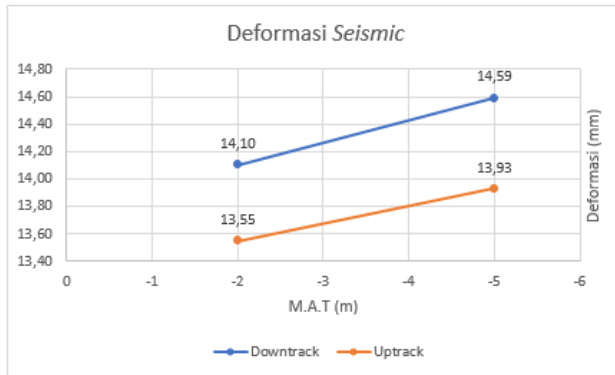
Deformasi Non-Seismic				
M.A.T	Fase Penggalian	Tunnel Downtrack	Tunnel Uptrack	Status
		mm	mm	≤ 20mm
5m BGL	Downtrack	9,82	-	OK
	Uptrack	9,45	9,38	OK
2m BGL	Downtrack	9,36	-	OK
	Uptrack	9,09	8,99	OK
FWL	Downtrack	8,95	-	OK
	Uptrack	8,76	8,70	OK

Tabel 5. 2. Hasil Deformasi Pada Kondisi *Seismic*
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Deformasi			
M.A.T	Terowongan	Deformasi	Status
		mm	≤ 20mm
5m BGL	Downtrack	10,82	OK
	Uptrack	10,80	OK
2m BGL	Downtrack	10,49	OK
	Uptrack	10,48	OK



Gambar 5. 2. Grafik Deformasi Pada Kondisi *Non-Seismic*
(sumber: Dokumen Pribadi)



Gambar 5. 3. Grafik Deformasi Pada Kondisi *Seismic*
(sumber: Dokumen Pribadi)

Dari tabel 5.1. dan 5.2. terlihat bahwa dalam kondisi beban *non-seismic* maupun *seismic*. Pada kondisi beban *non-seismic* didapati deformasi terbesar adalah pada muka air tanah -5 meter sebesar 9.82 mm, sedangkan pada kondisi beban *seismic* deformasi terbesar pada muka air tanah -5 meter sebesar 10.82 mm. semakin besar beban permukaan maka semakin besar pula tegangan yang diterima oleh terowongan sehingga nilai deformasi pada kondisi gempa menjadi lebih besar.

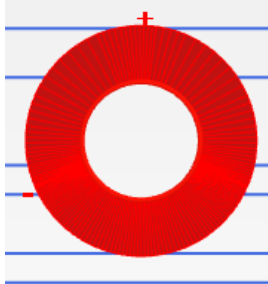
Dari hasil tersebut terlihat bahwa terowongan *downtrack* mengalami deformasi lebih besar daripada terowongan *uptrack*, Pola deformasi yang terbentuk terlihat bahwa pada sisi vertikal mengalami pemendekan, dan pada sisi horizontal mengalami pelebaran. Mengacu pada syarat minimal deformasi (Gambar 2.11) maka deformasi atau *tunnel ovalization* pada *tunnel downtrack* dan *uptrack* telah memenuhi persyaratan.

5.1.2. Gaya Dalam

Hasil keluaran pada program bantu Plaxis 2D dapat menunjukkan gaya dalam berupa gaya aksial, gaya geser, dan momen.

5.1.2.1. Gaya Aksial

Pola gaya aksial yang terjadi pada terowongan dapat dilihat pada Gambar 5.4.



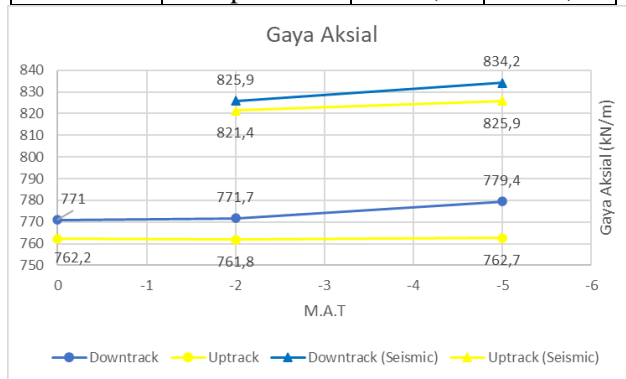
Gambar 5. 4. Pola Gaya Aksial Pada Terowongan
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Tabel 5. 3. Hasil Gaya Aksial Pada Kondisi *Non-Seismic*
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Axial Force Non-Seismic					
M.A.T	Fase Penggalan	Tunnel Downtrack		Tunnel Uptrack	
		Min.	Max.	Min.	Max.
5m BGL	Downtrack	-762,8	-751,5	-	-
	Uptrack	-779,4	-761,9	-762,7	-751,4
2m BGL	Downtrack	-761,8	-750,1	-	-
	Uptrack	-771,7	-775,4	-761,8	-750,7
FWL	Downtrack	-762,3	-751	-	-
	Uptrack	-771	-758,8	-762,2	-750,8

Tabel 5. 4. Hasil Gaya Aksial Pada Kondisi *Seismic*
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Axial			
M.A.T	Terowongan	Min.	Max
5m BGL	Downtrack	-834,2	-819,2
	Uptrack	-822,5	-804,4
2m BGL	Downtrack	-825,9	-812,2
	Uptrack	-821,4	-802,6

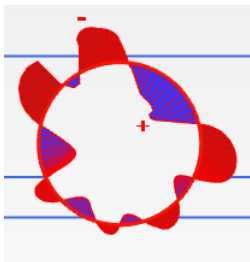


Gambar 5. 5. Grafik Gaya Aksial Terhadap M.A.T
(sumber: Dokumen Pribadi)

Pada kondisi muka air tanah yang variatif akan menyebabkan adanya perbedaan berat volume tanah (γ_{sat} dan γ_d) hal tersebut menyebabkan adanya perbedaan berat sendiri tanah pada tiap kondisi muka air tanah, dengan adanya hal tersebut maka berat yang diterima oleh terowongan akan berbeda di tiap kondisinya. Terlihat bahwa dengan semakin rendah muka air tanah maka gaya aksial yang diterima menjadi semakin besar.

5.1.2.2. Gaya Geser

Pola gaya geser yang terjadi pada terowongan dapat dilihat pada Gambar 5.5.



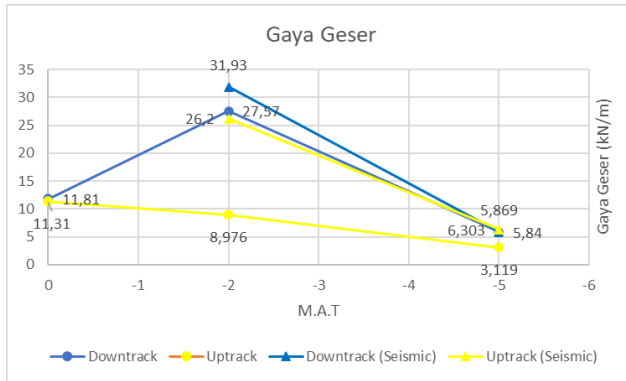
Gambar 5. 6. Pola Gaya Geser Pada Terowongan
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Tabel 5. 5. Hasil Gaya Geser Pada Kondisi *Non-Seismic*
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Shear Force Non-Seismic					
M.A.T	Fase Penggalian	Tunnel Downtrack		Tunnel Uptrack	
		Min.	Max.	Min.	Max.
5m BGL	Downtrack	-2,812	3,135	-	-
	Uptrack	-4,755	5,84	-3,119	2,814
2m BGL	Downtrack	-15,33	15,8	-	-
	Uptrack	-22,34	27,57	-8,719	8,976
FWL	Downtrack	-5,473	6,372	-	-
	Uptrack	-11,81	9,611	-11,31	5,909

Tabel 5. 6. Hasil Gaya Geser Pada Kondisi *Seismic*
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

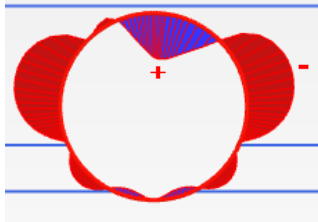
Shear			
M.A.T	Terowongan	Min.	Max.
5m BGL	Downtrack	-4,355	5,869
	Uptrack	-5,893	6,303
2m BGL	Downtrack	-24,58	31,93
	Uptrack	-23,83	-26,2



Gambar 5. 7. Grafik Gaya Geser Terhadap M.A.T
(sumber: Dokumen Pribadi)

5.1.2.3. Momen

Pola momen yang terjadi pada terowongan dapat dilihat pada Gambar 5.6.



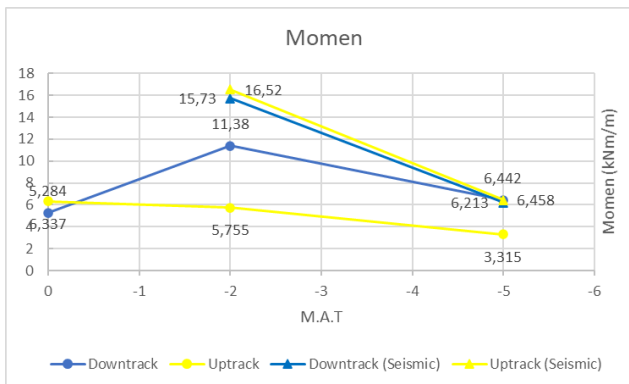
Gambar 5. 8. Pola Momen Pada Terowongan
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Tabel 5. 7. Hasil Momen pada Kondisi *Non-Seismic*
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Bending Momen Non-Seismic					
M.A.T	Fase Penggalian	Tunnel Downtrack		Tunnel Uptrack	
		Min.	Max.	Min.	Max.
5m BGL	Downtrack	-3,321	2,883	-	-
	Uptrack	-6,442	5,058	-3,315	2,887
2m BGL	Downtrack	-9,064	3,067	-	-
	Uptrack	-11,38	1,969	-5,755	2,944
FWL	Downtrack	-5,36	2,967	-	-
	Uptrack	-5,284	1,936	-6,337	2,943

Tabel 5. 8. Hasil Momen Pada Kondisi *Seismic*
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Bending			
M.A.T	Fase Penggalian	Min.	Max.
5m BGL	Downtrack	-6,213	3,991
	Uptrack	-6,352	6,458
2m BGL	Downtrack	-15,73	3,525
	Uptrack	-16,52	6,603



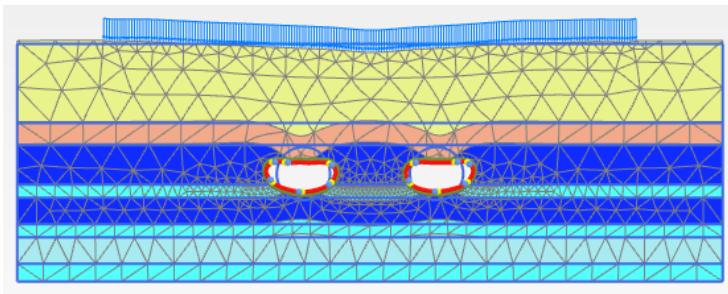
Gambar 5. 9. Grafik Momen Terhadap M.A.T
(sumber: Dokumen Pribadi)

Terlihat bahwa gaya dalam yang terjadi pada kondisi muka air tanah -2 meter memiliki gaya dalam yang besar, hal tersebut terjadi karena pada kondisi tersebut tanah mengalami pelemahan sehingga menyebabkan gaya dalam yang diterima oleh terowongan menjadi semakin besar.

Terutama momen yang terjadi pada terowongan dengan pemodelan terbagi menjadi beberapa segmen, hal tersebut menyebabkan kekuatan lentur dari terowongan menjadi lebih kecil, titik joint antar segmen menjadi bidang yang paling lemah sehingga diusahakan tidak adanya momen pada joint. karenanya perlu diperhatikan kesesuaian desain dan pelaksanaan konstruksi terowongan.

5.1.3. Penurunan (*settlement*)

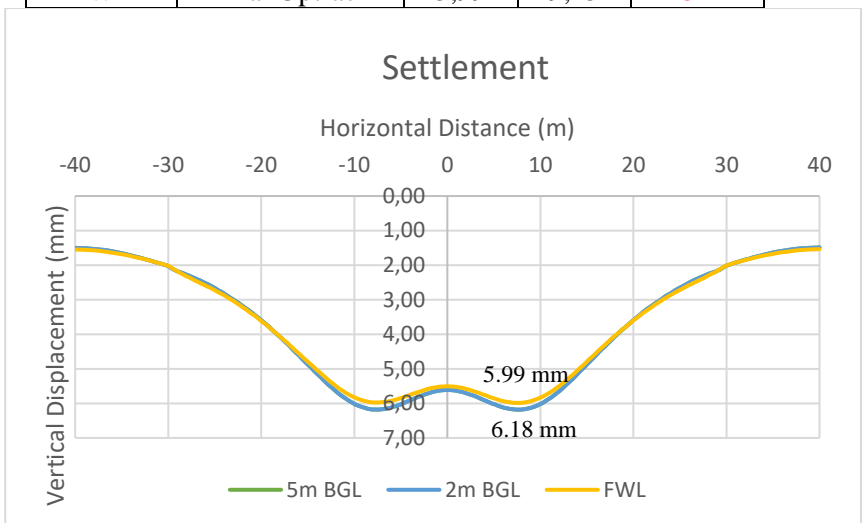
Hasil keluaran pada program bantu Plaxis 2D dapat menunjukkan pola penurunan pada permukaan tanah akibat adanya penggalian terowongan, pola penurunan dapat dilihat pada Gambar 5.7. Syarat penurunan maksimal pada permukaan tanah dapat dilihat pada Persamaan 2.26. dengan penurunan tanah maksimal sebesar 9.15 mm.



Gambar 5. 10. Pola Deformasi Tanah
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Tabel 5. 9. Hasil Penurunan Permukaan Tanah Akibat Penggalan Terowongan
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Ground Settlement Non-Seismic				
M.A.T	Fase Penggalan	Settlement		
		S	S_{max}	Status
		mm	mm	$S \leq S_{max}$
5m BGL	Final Uptrack	6,18	9,15	OK
2m BGL	Final Uptrack	6,18	9,15	OK
FWL	Final Uptrack	5,99	9,15	OK



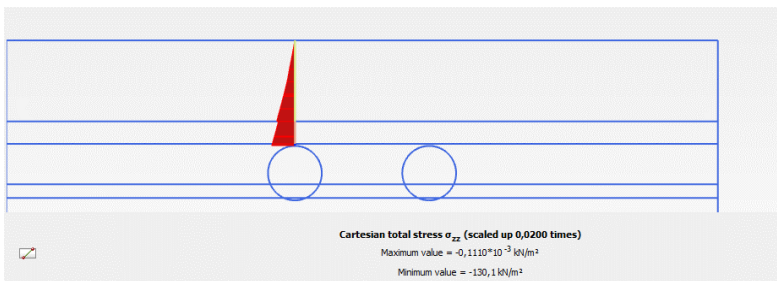
Gambar 5. 11. Grafik Penurunan Tanah Akibat Volume Loss
(sumber: Dokumen Pribadi)

Dari Gambar 5.8. terlihat bahwa penurunan permukaan tanah akibat *volume loss* terbesar terjadi pada kondisi muka air tanah -5 meter sebesar 6.18 mm, penurunan permukaan tanah terbesar terjadi pada pengeboran terowongan kedua atau terowongan *uptrack*, terlihat bahwa pola pusat penurunan permukaan tanah terjadi tepat diatas terowongan akibat adanya *volume loss* saat pengeboran terowongan. Mengacu pada Persamaan 2.27 maka didapat bahwa syarat maksimal penurunan

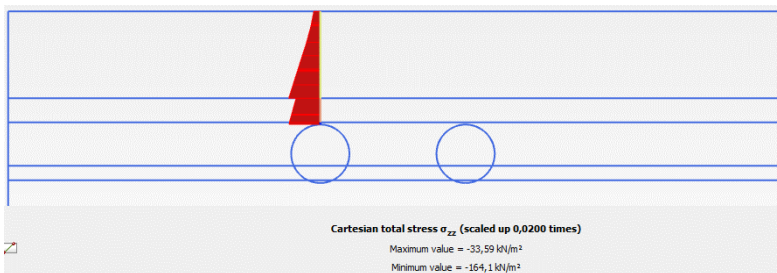
permukaan tanah akibat volume loss telah memenuhi persyaratan.

5.1.4. Distribusi Tegangan Vertikal

Hasil keluaran dari program bantu Plaxis 2D pada pemodelan terowongan dapat digunakan untuk melihat berapa besarnya beban permukaan yang mengenai terowongan akibat adanya distribusi beban. Besarnya distribusi beban permukaan didapat dari (σ_v saat ada beban – σ_v tidak ada beban), didapatkan besarnya distribusi tegangan adalah 34 kN/m^2 .



Gambar 5. 12. Tegangan Vertikal Dengan Beban Permukaan (*Fase Activate Surcharge Load*)
 (sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)



Gambar 5. 13. Tegangan Vertikal Tanpa Beban Permukaan (*Fase Initian Condition*)
 (sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Tabel 5. 10. Hasil Distribusi Beban Permukaan
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Distribusi Beban Permukaan				
No	M.A.T	Tegangan Awal	Tegangan Akibat Beban	Distribusi Tegangan
		σ_0	σ_1	$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_0$
		kN/m²	kN/m²	kN/m²
1	5 m BGL	130,1	164,1	34
2	2 m BGL	145,1	179,1	34
3	FWL	155,1	189,1	34

5.2. *Safety Factor*

Hasil keluaran dari program bantu Plaxis 2D pada pemodelan terowongan menunjukkan nilai *safety factor* seperti pada Tabel 5.11 dan Tabel 5.12.

Tabel 5. 11. Hasil Safety Factor Pada Kondisi *Non-Seismic*
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Safety Factor Non-Seismic		
M.A.T	Fase Penggalian	Safety Factor
		SF
5m BGL	Final Downtrack	1,935
	Final Uptrack	1,934
2m BGL	Final Downtrack	1,934
	Final Uptrack	1,933
FWL	Final Downtrack	1,933
	Final Uptrack	1,933

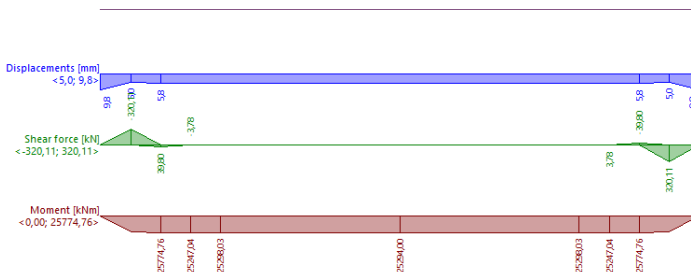
Tabel 5. 12. Hasil Safety Factor pada Kondisi Seismic
(sumber: Pemodelan Plaxis 2D, 2020)

Safety Factor		
M.A.T	Stage Constructions	Safety Factor
		SF
5m BGL	SF Gempa	1.53
2m BGL	SF Gempa	1,53

Dari Tabel 5.11 dan 5.12 dapat dilihat bahwa *tunnel* pertama atau *downtrack* selalu memiliki *safety factor* yang lebih besar daripada *tunnel uptrack*. Dapat diketahui pula bahwa semakin tinggi muka air maka *safety factor* akan semakin kecil, hal tersebut menunjukkan bahwa penggalian terowongan pertama (*downtrack*) memiliki keamanan terhadap keruntuhan lebih besar daripada terowongan kedua (*uptrack*).

5.3. Hasil Pemodelan Longitudinal Section

Pemodelan memanjang terowongan menggunakan program bantu GEO5 bertujuan untuk melihat besarnya lendutan, gaya geser, dan momen yang terjadi pada terowongan. Dalam pemodelan ini terowongan dimodelkan sebagai balok dengan luas dan momen inersia balok diasumsikan sebagai terowongan (lingkaran).



Gambar 5. 14. Hasil Pemodelan Longitudinal Section Dengan GEO5
(sumber: Pemodelan GEO5, 2020)

Tabel 5. 13. Rangkuman Hasil Pemodelan *Longitudinal Section*
(sumber: GEO5, 2020)

	Syarat	Nilai estimasi	status
Settlement	<25	9,8	OK
Differential Settlement	<1/1000	9,8/720000	OK
		1/73467	

Berdasar Tabel 5.13 maka dapat terlihat bahwa pemodelan memanjang (*longitudinal section*) menggunakan program bantu GEO5 menunjukkan bahwa dengan adanya perletakan sendi maka didapati penurunan sebesar 2.3mm sedangkan pada kondisi tanpa perletakan maka penurunan maksimal yang terjadi sebesar 8mm. dan perbedaan penurunan 1/73467, berdasar peraturan pada *civil design criteria* maka telah memenuhi persyaratan.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan uraian pembahasan dari Tugas Akhir ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. Faktor yang menyebabkan deformasi pada terowongan adalah perilaku terowongan dengan tanah disekitar, kekakuan tanah disekitar sisi crown dan invert, tekanan grouting, serta beban permukaan. Dan faktor yang memengaruhi stabilitas akibat gaya uplift adalah tekanan hidrostatik akibat posisi terowongan yang terletak dibawah muka air tanah.
2. Tinggi muka air tanah, besarnya beban permukaan, dan metode konstruksi terowongan memengaruhi besarnya deformasi yang terjadi pada terowongan. Semakin tinggi muka air menyebabkan deformasi semakin kecil, semakin besar beban permukaan akan menyebabkan deformasi bertambah, dan pengeboran terowongan pertama (*downtrack*) mengalami deformasi yang lebih dari terowongan kedua (*uptrack*). Titik krusial dari terowongan yang tidak monolit terletak pada *joint*.
3. Pengeboran terowongan dengan menggunakan TBM menyebabkan adanya penurunan permukaan tanah akibat *volume loss*. Penurunan tanah terbesar terjadi pada pengeboran terowongan kedua (*uptrack*) pada kondisi muka air tanah -5 meter dan -2 meter yaitu sebesar 6.18 mm.
4. Kondisi muka air tanah dan beban permukaan dapat memengaruhi *safety factor* akibat gaya uplift. *Safety factor* terbesar terjadi pada terowongan pertama (*downtrack*) dengan kondisi muka air tanah -5 meter dan kondisi *non-seismic*, didapati SF sebesar 1.935
5. Pada arah memanjang terowongan (*longitudinal section*) didapati hasil lendutan dengan perletakan sendi

menjadi lebih kecil, yaitu sebesar 9,8 mm dan perbedaan penurunan sebesar $1/73467$.

6. Pemodelan terowongan dengan program bantu Plaxis 2D dapat dilakukan dengan cara memodelkan lapisan tanah serta parameter tanah yang sesuai dengan kondisi eksisting, kemudian memodelkan geometri terowongan, setelah itu kondisi muka air dapat dimodelkan, selanjutnya tahapan perhitungan atau konstruksi berdasar kondisi eksisting dapat dilakukan, dan tahap terakhir adalah perhitungan dan hasil keluaran plaxis 2D.

6.2. Saran

1. Pemodelan terowongan dimodelkan menggunakan program bantu Plaxis 3D
2. Gaya dalam yang terjadi dibandingkan dengan kondisi gaya dalam eksisting
3. Dilakukan perhitungan struktur penulangan *lining* terowongan
4. Memperhitungkan stabilitas terowongan akibat adanya beban dinamis (*seismic condition*)
5. Diperhitungkan stabilitas terowongan akibat gaya uplift
6. Analisa gempa menggunakan beban gempa dinamis atau metode lain yang lebih realistis untuk menggambarkan kondisi sesungguhnya
7. Perlu dilakukan studi lebih dalam karena masih minimnya standar atau referensi yang ada di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Verruijt, "Geotechnique," *Buoyancy of Tunnel In Soft Soil*, pp. 513-515, 2008.
- [2] SOWJ, "Geotechnical Interpretative Report," Jakarta, PT. Mass Rapid Transit, Jakarta, 2014.
- [3] SOWJ, "Bored Tunnel Design for Design Section CP 105-1," Jakarta, PT. Mass Rapid Transit, Jakarta, 2014.
- [4] J. Fu, "International Journal of Geomechanics," *Analytical Prediction of Ground Movements due to a Nonuniform Deforming Tunnel*, 2015.
- [5] E. G. Document, *Civil Design Criteria for Road and Rail Transit System*, Singapore: Land Transport Authority, 2019.
- [6] N. H. Institute, *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels — Civil Elements*, U.S: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2009.
- [7] I. T. Association, "Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining," *Tunneling and Underground Space Technology*, 2000.
- [8] A. J. Yulianto, "Studi Perilaku Terowongan Bor di Bawah Fondasi Tiang Rakit Menggunakan Plaxis 8.6," 2016.
- [9] SNI 8460:2017 *Persyaratan Perancangan Geoteknik*, 2017.
- [10] "SNI 1725:2016 *Pembebanan Untuk Jembatan*," 2016.
- [11] "Plaxis 2D Reference Manual Connect Edition V20," 2019.

- [12] "Plaxis 2D Tutorial Manual Connect Edition V20," 2019.
- [13] J. S. o. C. Engineering, Standard Specification for Tunneling-2016 : Shield Tunnel, 2016.
- [14] A. Casasus, "Impact of underground construction and TBM tunnelling on surface Structures in Kolkata East-West Metro.," 2017.
- [15] J. E. Bowles, Foundation Analysis And Design, 1997.

BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Satria Nauval Fadhil, lahir di Malang, 7 Juni 1997, merupakan anak ke dua dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Swadarma Bhakti Sidoarjo, SD Al-Falah Assalam Sidoarjo, SMP Al-Falah Deltasari Sidoarjo, dan SMA Negeri 3 Sidoarjo. Penulis merupakan mahasiswa pada program studi Diploma IV Teknik Infrastruktur Sipil ITS pada tahun 2016 dengan mengambil konsentrasi studi pada bidang Geoteknik. Pada saat kuliah, penulis aktif dalam kegiatan organisasi, seperti : Himpunan Mahasiswa Diploma Sipil (HMDS) Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa (PSDM) tahun 2017/2018 (sebagai staff divisi kaderisasi) dan tahun 2018/2019 (sebagai kepala departemen), steering comitte kaderisasi 2017/2018. Selain itu penulis juga aktif dalam berbagai kegiatan yang pernah diadakan di ITS diantaranya seperti : ITS EXPO tahun 2017 (sebagai staff divisi perlengkapan) peserta pelatihan LKMM Pra-Tingkat Dasar (Pra-TD) tahun 2016 dan LKMM Tingkat Dasar (TD) Zephyr tahun 2017, dll. Penulis sempat mengikuti kegiatan kerja praktek di PT. WIKA Gedung pada proyek pembangunan apartemen Taman Sari Emerald Surabaya, Jawa Timur dan di PT. PP pada proyek pembangunan apartemen Gunawangsa Gresik, Jawa Timur. Berikut disertakan alamat email penulis: satrianauvalf@gmail.com

BORING NUMBER 105-01

PAGE 1 OF 2



PT. Tigenco Graha Persada
 Jl. Pahlawan Revolusi 100B Jakarta Timur 14340
 Telephone: (62) 21 86600710

PROJECT Additional Soil Investigation for CP-105

LOCATION Semanggi - Setiabudi

CLIENT SHIMIZU - OBAYASHI - WIKA - JAYA KONSTRUKSI JV

DATE STARTED _____ **COMPLETED** _____

DRILLER Muksin/Wasju

DRILLING METHOD Wash Boring

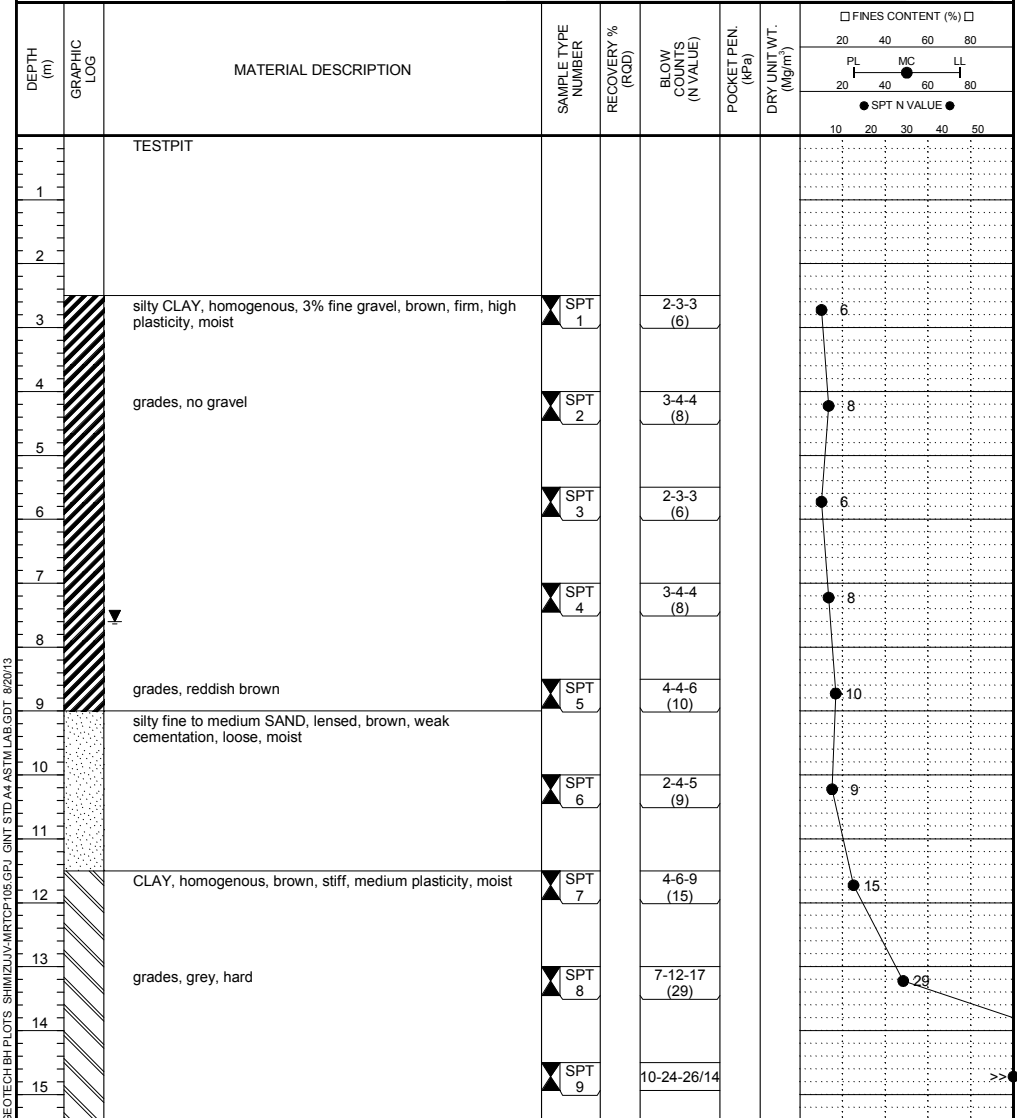
LOGGED BY Bambang Sugiri/Hirzan **CHECKED BY** Andrianto

REMARKS TBM 11+120

NORTHING,EASTING,ELEV. 9311978.038 , 700277.178 , 14.076 m

GROUND WATER LEVELS, AVERAGE: 7.60

DATE	START	END	DATE	START	END	DATE	START	END
27/06/2013	N/A. m	7.30 m	28/06/2013	7.90 m	N/A. m			



(Continued Next Page)

GEO TECH BH PLOTS SHIMIZU JV-MRTCP-105-GPJ GINT STD A4 ASTM LAB.GDT 8/2013

BORING NUMBER 105-01

PAGE 2 OF 2



PT. Tigenco Graha Persada
 Jl. Pahlawan Revolusi 100B Jakarta Timur 14340
 Telephone: (62) 21 86600710

PROJECT Additional Soil Investigation for CP-105

LOCATION Semanggi - Setiabudi

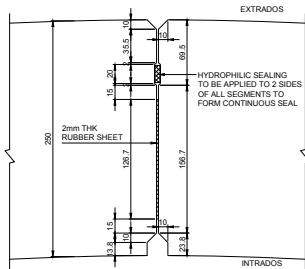
CLIENT SHIMIZU - OBAYASHI - WIKA - JAYA KONSTRUKSI JV



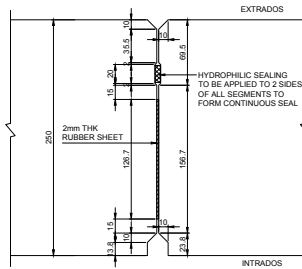
DEPTH (m)	GRAPHIC LOG	MATERIAL DESCRIPTION	SAMPLE TYPE NUMBER	RECOVERY % (ROD)	BLOW COUNTS (N VALUE)	POCKET PEN. (kPa)	DRY UNIT WT. (Mg/m ³)	FINES CONTENT (%)	
								PL	MC
16		CLAY, homogenous, brown, stiff, medium plasticity, moist <i>(continued)</i>	SPT 10		18-50/13			20	40
17		sandy CLAY, 10% sand, homogenous, dark grey, hard, low plasticity, moist						60	80
18		CLAY, homogenous, dark grey, firm, medium plasticity, moist	SPT 11		6-11-12 (23)			20	40
19					20	40			
20			SPT 12		10-19-31/11			20	40
21					20	40			
22		sandy CLAY, 20% sand, homogenous, brown, hard, low plasticity, moist	SPT 13		13-28-22/10			20	40
23					20	40			
24		SAND, homogenous, dark grey, strong cementation, dense, moist	SPT 14		20-50/10			20	40
25					20	40			
26		sandy CLAY, 5-10% sand, dark grey, hard, low plasticity, moist	SPT 16		9-15-22 (37)			20	40
27					20	40			
			SPT 17		11-17-25 (42)			20	40

Bottom of borehole at 27.00 meters.

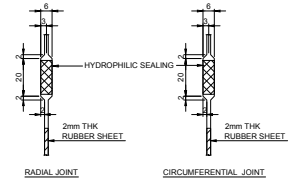
GEO TECH BH PLOTS SHIMIZU JV-MRTCP-105-GPJ GINT STD A4 ASTM LAB.GDT 8/2013



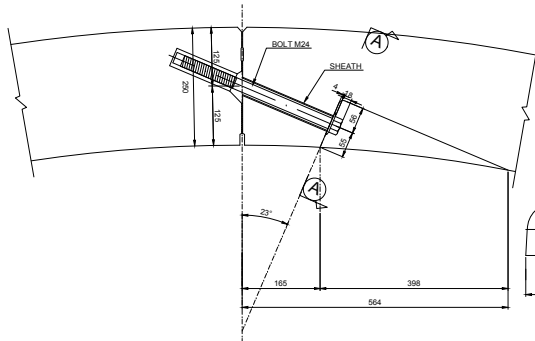
GOMETRY OF RADIAL JOINT
SCALE 1:2



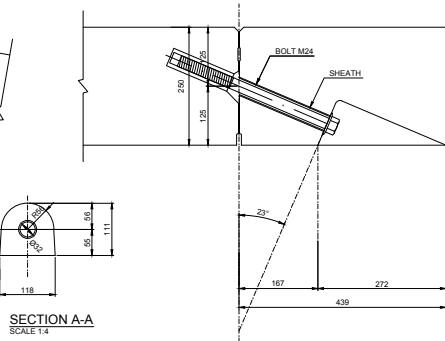
GEOMETRY OF CIRCUMFERENTIAL JOINT
SCALE 1:2



SEALING GROOVE
SCALE 1:1



BOLT CONNECTION DETAILS AT RADIAL JOINT
SCALE 1:4



BOLT CONNECTION DETAILS AT CIRCUMFERENTIAL JOINT
SCALE 1:4

PROPERTIES OF MATERIALS:

	SIZE	MATERIALS
ELECTOR HOLE		TO BE ADVISED IN CONSTRUCTION DESIGN
ELECTOR HOLE PLUG		TO BE ADVISED IN CONSTRUCTION DESIGN
SHEATH	L=244.3 t=3	PVC (POLYVINYL CHORIDE)
O-RING		CR (CHLOROPRENE RUBBER)
GRUMMET		TO BE ADVISED IN CONSTRUCTION DESIGN
M12 BOLT SOCKET		TO BE ADVISED IN CONSTRUCTION DESIGN

NOTES:

1. ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
2. PROPERTIES OF MATERIAL : CONCRETE(SEGMENTS): CHARACTERISTIC COMPRESSIVE CUBE STRENGTH OF CONCRETE AT 28 DAYS (f_{cu}) 60N/mm² REINFORCEMENT: CHARACTERISTIC YIELD STRESS (f_y) 300N/mm²
3. BOLTS, NUTS AND WASHERS SHALL BE GRADE 8.8 TO BS 5880-1:2008.
4. THE M12 BOLT SOCKET: SUS OR CERAMIC.

ENDORSED BY	KENJI KAJIKAWA
APPROVED BY	KAZUYA OSAKO
VERIFIED BY	KHO CHZA MAIN
DESIGNED BY	IRAWAN TANI INDONESIA-ADP/08-2012
DESIGNED BY	PAULUS P. RAHARDJO INDONESIA-ADP/08-2012

Engineers : **IMCMC**

Contractors : **Sowj**

Third Party Verifier : **CPG**

Engineers : **m** INDONESIA-ADP/08-2012

NOTICED BY	NAME	SIGNATURE
PRESIDENT DIRECTOR	DONO BOESTAM	
DIRECTOR OF CONSTRUCTION	M. NASYR	
PROJECT MANAGER	ALLAN TANDONIO	

Project Title :	CONSTRUCTION OF JAKARTA MASS RAPID TRANSIT PROJECT UNDERGROUND SECTION - CP 105 - 11K+043-13K+102
Drawing Title :	BORED TUNNEL SEGMENTAL LINING GENERAL ARRANGEMENT SHEET 3 OF 3
Scale :	AS SHOWN
Drawing No. :	5/BTN/SEG/0023
Rev. :	-
Status :	T
CDW File Name :	5BTNSEG0023.dwg

