



PROYEK AKHIR - VC191845

## ANALISA STABILITAS DAN DEFORMASI TEROWONGAN MRT JAKARTA *SECTION CP 105-3*

DISUSUN OLEH :

AHMAD ILMIAWAN PUTRA  
10111610013056

DOSEN PEMBIMBING 1

Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA  
NIP. 19901011 198208 1 002

DOSEN PEMBIMBING 2

Prof. Ir. M. Sigit Darmawan, M.Eng.Sc., Ph.D  
NIP. 19630726 198903 1 003

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



**PROYEK AKHIR - VC191845**

**ANALISA STABILITAS DAN DEFORMASI  
TEROWONGAN MRT JAKARTA *SECTION CP 105-3***

DISUSUN OLEH :

AHMAD ILMIAWAN PUTRA  
10111610013056

DOSEN PEMBIMBING 1

Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA  
NIP. 19901011 198208 1 002

DOSEN PEMBIMBING 2

Prof. Ir. M. Sigit Darmawan, M.Eng.Sc., Ph.D  
NIP. 19630726 198903 1 003

PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN

DEPARTEMEN TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL

FAKULTAS VOKASI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA 2020



**FINAL PROJECT - VC191845**

## **STABILITY AND DEFORMATION ANALYSIS OF MRT JAKARTA TUNNEL SECTION CP 105-3**

**AHMAD ILMIAWAN PUTRA**  
10111610013056

**1<sup>ST</sup> Advisor**

**Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA**  
NIP. 19901011 198208 1 002

**2<sup>ND</sup> Advisor**

**Prof. Ir. M. Sigit Darmawan, M.Eng.Sc., Ph.D**  
NIP. 19630726 198903 1 003

**APPLIED UNDERGRADUATE PROGRAM**

**DEPARTEMENT OF CIVIL INFRASTRUCTURE ENGINEERING**

**FACULTY OF VOCATIONAL**

**SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY**

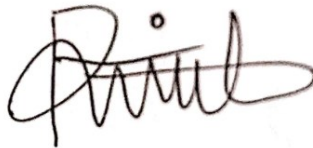
**SURABAYA 2020**

**LEMBAR PENGESAHAN**  
**ANALISA STABILITAS DAN DEFORMASI**  
**TEROWONGAN MRT JAKARTA SECTION CP 105-3**

**PROYEK AKHIR**

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Kelulusan pada  
Program Studi Sarjana Terapan (D4)  
Departemen Teknik Infrastruktur Sipil  
Fakultas Vokasi  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember



Disusun oleh :



**Ahmad Ilmiawan Putra**  
**NRP. 10111610013056**

Disetujui Oleh Dosen Pembimbing Proyek Akhir :

Dosen Pembimbing I



**Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA**  
**NIP. 1901011 198208 1 002**

Dosen Pembimbing II



**Prof. Ir. M. Sigit D., M.Eng., Sc. Ph.D.**  
**NIP. 19630726 198003 1 003**

SURABAYA  
AGUSTUS, 2020



## Berita Acara Sidang Proyek Akhir

Departemen Teknik Infrastruktur Sipil Fakultas Vokasi ITS

Semester Genap 2019-2020

Nomor BA :

Nomor Jadwal : **41**

Program Studi : D4 Teknik Sipil (TRPPBS)

Diinout oleh : Aan Fauzi, ST., MT.

Bahwa pada hari ini : Kamis, 06-Agt-2020

Pukul : 8:00 s/d 10:00

Di tempat : Online Meeting

Telah dilaksanakan sidang Proposal Tugas Akhir dengan judul:

ANALISA STABILITAS DAN DEFORMASI TEROWONGAN MRT JAKARTA SECTION CP 105-3

Yang dihadiri dan dipresentasikan oleh mahasiswa :

( Hadir / Tidak Hadir)

10111610013056 AHMAD ILMIAWAN PUTRA

Hadir

Yang dihadiri oleh dosen Pembimbing:

( Hadir / Tidak Hadir)

1 Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA.

Hadir

2 Prof. Ir. Muhammad Sigit Darmawan, M.EngSc., Ph.D.

Hadir

Yang dihadiri oleh dosen Penguii:

( Hadir / Tidak Hadir)

1 Mohamad Khoiri, ST., MT., Ph.D.

Hadir

2 Aan Fauzi, ST., MT.

Hadir

3 Dr. Moh. Muntaha, ST., MT.

Hadir

Bahwasanya musyawarah pembimbing dan penguii pada sidang provek akhir ini memutuskan:

10111610013056 AHMAD ILMIAWAN PUTRA

**LULUS, DENGAN REVISI MINOR**

Catatan / revisi / masukan :

Mohamad Khoiri, ST., MT., Ph.D.

a Kelengkapan buku TA, lampiran dll jadi satu file

b Visualisasi tahapan analisa plaxis ditampilkan

c

d

e

f

Aan Fauzi, ST., MT.

- a Analisa data tanah dijelaskan, data lapangan yg didapatkan dan lab.
- b Tinjauan pustaka, semua kutipan dimasukkan dalam daftar pustaka.
- c
- d
- e
- f

Dr. Moh. Muntaha, ST., MT.

- a Tahapan analisa, kronologis pembebanan dijelaskan.
- b Detail pemodelan plaxis dielaskan
- c Model Geo5 beam, asumsi model terowongan dijadikan beam dijelaskan.
- d
- e
- f

### Tindak lanjut :

Mahasiswa memperbaiki/merevisi Proyek Akhir sesuai dengan masukan di atas.

### Penutup :

Demikian Berita Acara Sidang Proyek Akhir ini dibuat sebagai panduan revisi oleh Mahasiswa.

### Lampiran :

Tempelkan screen capture peserta meeting online disini.



*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## ABSTRAK

### ANALISA STABILITAS DAN DEFORMASI TEROWONGAN MRT JAKARTA *SECTION* CP 105-3

Konstruksi terowongan MRT Jakarta merupakan konstruksi terowongan bawah tanah pada tanah lunak, dimana yang dikaji dalam penulisan proyek akhir ini yaitu stabilitas dan deformasi yang terjadi pada terowongan. Salah satu terowongan yang dijadikan analisa dalam penulisan proyek akhir ini yaitu terowongan MRT Jakarta *section* CP 105-3 pada STA 12+403 – STA 12+699 dengan panjang terowongan sebesar 296 meter yang terletak antara Stasiun Bendungan Hilir hingga Stasiun Setiabudi.

Dalam analisa deformasi dan stabilitas terowongan pada arah melintang, dilakukan dengan *software* PLAXIS 2D v.20 dan untuk analisa terowongan pada arah memanjang dilakukan dengan *software* GEO5-Program *Beam* untuk mengetahui penurunan pada struktur terowongan dalam arah memanjang.

Hasil analisis terowongan arah melintang dengan program PLAXIS 2D v.20 menunjukkan bahwa deformasi terbesar terjadi pada kedalaman muka air tanah 5 mbgl (LWL) baik pada tahapan konstruksi maupun pada kondisi seismik, sedangkan nilai stabilitas paling kecil terjadi pada kedalaman muka air tanah 0 mbgl (FWL). Hasil analisis terowongan arah memanjang dengan program GEO5 menunjukkan bahwa penurunan terbesar pada kombinasi beban ultimit (ULS) sebesar 14,6 mm dengan beda penurunan yang terjadi sebesar 7,9 mm. Dari keseluruhan hasil analisa yang telah didapatkan, dapat disimpulkan bahwa kedalaman muka air tanah sangat memengaruhi konstruksi terowongan baik dari segi deformasi dan stabilitas terowongan, sehingga kedalaman muka air tanah yang ada menjadi faktor yang sangat penting untuk dipertimbangkan dalam perencanaan konstruksi terowongan.

**Kata Kunci** : Deformasi, Stabilitas, dan Terowongan



*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## ***ABSTRACT***

### **STABILITY AND DEFORMATION ANALYSIS OF JAKARTA MRT TUNNEL SECTION CP 105-3**

The construction of the Jakarta MRT tunnel is the construction of underground tunnels on soft ground, which is reviewed in the writing of this final project namely the stability and deformation that occurs in the tunnel. One of the tunnels used for analysis in the final project was the Tunnel of MRT Jakarta section CP 105-3 at STA 12+403 – STA 12+699 with a tunnel length of 296 meters located between Bendungan Hilir Station and Setiabudi station.

In the analysis of deformation and the stability of tunnels in the transverse direction, is done with software PLAXIS 2D v.20 and for tunnel analysis in the elongated direction is done with the GEO5-Program Beam software to determine the settlement in the tunnel structure in an elongated direction.

The results of a transverse tunnel analysis with the PLAXIS 2D v. 20 program showed that the largest deformation occurred at 5 MBGL (LWL) ground water depth in both construction and seismic conditions, while the least stability value occurred at a groundwater depth of 0 mbgl (FWL). The results of an elongated tunnel analysis with the GEO5 program showed that the biggest settlement in the combination of ultimate loads (ULS) was 14.6 mm with a difference settlement occurring at 7.9 mm. From the overall results of analysis that has been obtained, it can be concluded that the depth of ground water is affecting the tunnel construction both in terms of deformation and the stability of the tunnel, so that the depth of the existing groundwater is a very important factor to consider in planning tunnel construction.

**Keywords** : Deformation, Stability, and Tunnel

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat serta hidayah-Nya sehingga penyusunan Proyek Akhir yang berjudul “**Analisa Stabilitas dan Deformasi Terowongan MRT Jakarta Section CP 105-3**” dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa laporan tugas akhir ini tidak akan terlaksana tanpa bantuan dan bimbingan dari beberapa pihak. Pada kesempatan ini saya selaku penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua serta keluarga-keluarga penulis.
2. Bapak M. Khoiri, ST., MT, selaku Kepala Departemen Teknik Infrastruktur Sipil.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA, selaku dosen pembimbing proyek akhir.
4. Bapak Prof. Ir. M. Sigit Darmawan, M.Eng. Ph.D, selaku dosen pembimbing proyek akhir.
5. Pihak PT. MRT Jakarta, selaku pemilik proyek (*owner*) pembangunan MRT Jakarta yang telah memberikan data proyek.
6. Keluarga Mahasiswa Manul selaku teman perkopian yang telah memberikan semangat kepada penulis.
7. Serta pihak-pihak lainnya yang belum disebutkan oleh penulis.

Surabaya, 6 Agusuts 2020

Penulis

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
ABSTRAK .....	iii
<i>ABSTRACT</i> .....	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	4
1.3. Tujuan.....	4
1.4. Manfaat.....	5
1.5. Batasan Masalah.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Terowongan.....	7
2.2. <i>Tunnel Boring Machine</i> (TBM).....	10
2.3. <i>Shaft</i> .....	12
2.4. <i>Lining</i> Terowongan .....	13
2.5. Teori Mekanika Tanah .....	16
2.6. PLAXIS 2D v.20 .....	19
2.7. GEO5 2020 - Program <i>Beams</i> .....	30
2.8. Pertimbangan Perancangan Terowongan .....	38
2.9. Desain Beban Terowongan.....	39

2.10. Perilaku Teknis Terowongan.....	42
2.11. Pengaruh Sekitar Daerah Konstruksi Terowongan.....	43
2.12. Penurunan Tanah .....	44
2.13. Stabilitas Terowongan .....	47
2.14. Persyaratan Deformasi Terowongan .....	48
2.15. Kriteria Penurunan Terowongan .....	49
<b>BAB III METODOLOGI .....</b>	<b>51</b>
3.1. <i>Flowchart</i> .....	51
3.2. Informasi Umum Proyek .....	55
3.3. Data Interpretasi Geoteknik .....	56
3.4. Data Struktur Terowongan .....	76
3.5. Data Bangunan Eksisting .....	88
3.6. Desain Beban.....	89
3.7. Profil TBM .....	95
3.8. Pemodelan Terowongan dengan PLAXIS.....	97
3.9. Pemodelan Terowongan dengan GEO5 .....	128
<b>BAB IV PEMBAHASAN .....</b>	<b>147</b>
4.1. Analisa Terowongan Pemodelan Plaxis .....	147
4.2. Analisa Terowongan Pemodelan GEO5.....	171
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>179</b>
5.1. Kesimpulan.....	179
5.2. Saran.....	180
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>181</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>185</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>	<b>219</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Proyek MRT Jakarta.....	2
Gambar 1. 2 Keruntuhan konstruksi terowongan.....	3
Gambar 2. 1 Terowongan gali dan tutup.....	8
Gambar 2. 2 Terowongan pegunungan.....	8
Gambar 2. 3 Terowongan perisai MRT Jakarta.....	9
Gambar 2. 4 TBM Antareja MRT Jakarta.....	10
Gambar 2. 5 TBM tipe <i>slurry shield</i> .....	11
Gambar 2. 6 TBM tipe EPB-S.....	12
Gambar 2. 7 <i>Shaft</i> terowongan.....	13
Gambar 2. 8 <i>Lining</i> terowongan.....	14
Gambar 2. 9 Segmen <i>ring</i> terowongan.....	15
Gambar 2. 10 Final <i>lining</i> terowongan.....	15
Gambar 2. 11 Tegangan vertikal akibat suatu beban.....	17
Gambar 2. 12 Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb.....	19
Gambar 2. 13 Model regangan bidang dan axi-simetri.....	20
Gambar 2. 14 Titik-titik nodal elemen.....	21
Gambar 2. 15 Model lapisan tanah PLAXIS 2D v.20.....	22
Gambar 2. 16 Model struktur PLAXIS 2D v.20.....	22
Gambar 2. 17 <i>Flow conditions</i> PLAXIS 2D v.20.....	23
Gambar 2. 18 Tahap perhitungan PLAXIS 2D v.20.....	24
Gambar 2. 19 Modulus elastisitas tanah ( $E_0$ dan $E_{50}$ ).....	25
Gambar 2. 20 Sudut geser tanah.....	26
Gambar 2. 21 Lembar " <i>Project</i> " GEO5-Beam.....	30
Gambar 2. 22 Tampilan lembar " <i>Setting</i> " GEO5-Beam.....	31
Gambar 2. 23 Model geometri balok GEO5-Beam.....	32
Gambar 2. 24 Model lapisan tanah GEO5-Beam.....	33
Gambar 2. 25 Model GWT GEO5-Beam.....	34
Gambar 2. 26 Model " <i>Support</i> " balok GEO5-Beam.....	34
Gambar 2. 27 Model beban GEO5-Beam.....	35
Gambar 2. 28 <i>Output</i> analisa model GEO5-Beam.....	36
Gambar 2. 29 Penurunan tanah akibat <i>volume loss</i> .....	45
Gambar 2. 30 Prediksi penurunan di atas terowongan.....	47
Gambar 2. 31 Stabilitas terowongan terhadap gaya <i>uplift</i> .....	48



Gambar 3. 1 <i>Flowchart</i> .....	52
Gambar 3. 2 Lokasi proyek terowongan CP-105 .....	55
Gambar 3. 3 Lokasi terowongan <i>section</i> CP 105-3 .....	56
Gambar 3. 4 Desain lokasi <i>section</i> terowongan CP 105 .....	58
Gambar 3. 5 Profil geologi terowongan <i>section</i> CP 105-3 .....	59
Gambar 3. 6 Data <i>borelog</i> BH 105-9 .....	60
Gambar 3. 7 Data N-SPT tanah lempung pada CP 105 .....	61
Gambar 3. 8 Data N-SPT tanah pasir pada CP 105 .....	62
Gambar 3. 9 Desain lapisan tanah <i>section</i> CP 105-3 .....	63
Gambar 3. 10 Data berat volume tanah pada CP 105 .....	64
Gambar 3. 11 Data kuat geser efektif tanah pada CP 105 .....	66
Gambar 3. 12 Geometri <i>lining</i> terowongan .....	77
Gambar 3. 13 Profil kedalaman terowongan CP 105-3 .....	78
Gambar 3. 14 Posisi join antar segmen <i>lining</i> terowongan .....	81
Gambar 3. 15 Detail penampang balok pemodelan GEO5 .....	87
Gambar 3. 16 Bangunan eksisting pada terowongan CP 105-3 ..	88
Gambar 3. 17 Tebal perkerasan lapisan jalan .....	89
Gambar 3. 18 Distribusi beban pada <i>crown</i> terowongan .....	92
Gambar 3. 19 Alur proses konstruksi terowongan .....	96
Gambar 3. 20 Analisis terowongan CP 105-3 dengan Plaxis .....	97
Gambar 3. 21 Basis pemodelan terowongan dengan Plaxis .....	98
Gambar 3. 22 Parameter-parameter pemodelan Plaxis .....	99
Gambar 3. 23 Informasi umum <i>project properties</i> Plaxis .....	100
Gambar 3. 24 Domain model geometri .....	101
Gambar 3. 25 Menu <i>input</i> geometri tanah pada Plaxis .....	102
Gambar 3. 26 Pemodelan geometri lapisan tanah .....	103
Gambar 3. 27 Menu input material tanah pada Plaxis .....	104
Gambar 3. 28 <i>Input</i> parameter tanah pada Plaxis .....	105
Gambar 3. 29 Hasil pemodelan tanah pada Plaxis .....	106
Gambar 3. 30 Menu " <i>Tunnel Designer</i> " Plaxis 2D v.20 .....	107
Gambar 3. 31 Pemodelan geometri terowongan .....	108
Gambar 3. 32 Membuat model segmen baru .....	109
Gambar 3. 33 Pemodelan segmen terowongan .....	110
Gambar 3. 34 Membuat data material <i>lining</i> .....	111
Gambar 3. 35 <i>Input</i> parameter <i>lining</i> terowongan .....	112

Gambar 3. 36	Pemodelan <i>negative interface</i> terowongan.....	113
Gambar 3. 37	<i>Input</i> nilai kontraksi lining terowongan.....	114
Gambar 3. 38	Model kedalaman terowongan.....	114
Gambar 3. 39	Penempatan terowongan pada model tanah.....	115
Gambar 3. 40	Pemodelan join <i>lining</i> .....	115
Gambar 3. 41	Hasil pemodelan terowongan pada Plaxis .....	116
Gambar 3. 42	Pemodelan beban permukaan pada Plaxis.....	116
Gambar 3. 43	Penyusunan jaringan elemen .....	117
Gambar 3. 44	Pemodelan MAT pada Plaxis .....	118
Gambar 3. 45	Tahap <i>initial phase</i> .....	119
Gambar 3. 46	Tahap perhitungan analisa pada Plaxis .....	119
Gambar 3. 47	Tahap kondisi eksisting .....	120
Gambar 3. 48	Deaktifasi klaster tanah di dalam terowongan....	121
Gambar 3. 49	Aktivasi properti <i>lining</i> .....	121
Gambar 3. 50	Pemodelan konstruksi terowongan <i>downtrack</i> ...	122
Gambar 3. 51	Tahap pemodelan kontraksi terowongan .....	122
Gambar 3. 52	Tahap pemodelan <i>grouting</i> .....	123
Gambar 3. 53	Tahap final terowongan <i>downtrack</i> .....	124
Gambar 3. 54	Tahap final terowongan <i>uptrack</i> .....	125
Gambar 3. 55	Pemodelan beban gempa pada Plaxis.....	125
Gambar 3. 56	Tahap perhitungan SF.....	126
Gambar 3. 57	<i>Ouput</i> pemodelan Plaxis.....	127
Gambar 3. 58	Analisis terowongan CP 105-3 dengan GEO5 ...	128
Gambar 3. 59	Basis pemodelan terowongan dengan GEO5 .....	129
Gambar 3. 60	Parameter-parameter pemodelan GEO5.....	130
Gambar 3. 61	Lembar " <i>frame project</i> " pemodelan GEO5 .....	131
Gambar 3. 62	Standar dan tipe analisis model GEO5 .....	132
Gambar 3. 63	Pemodelan balok pada GEO5.....	133
Gambar 3. 64	Hasil pemodelan balok GEO5 .....	134
Gambar 3. 65	Frame <i>interface</i> GEO5.....	134
Gambar 3. 66	<i>Input</i> data <i>interface</i> tanah pada GEO5 .....	135
Gambar 3. 67	<i>Input</i> data material tanah pada GEO5.....	136
Gambar 3. 68	Hasil pemodelan tanah pada GEO5.....	136
Gambar 3. 69	Pemodelan GWT pada GEO5.....	137
Gambar 3. 70	Pemodelan kedalaman balok pada GEO5 .....	138

Gambar 3. 71 Penetapan <i>load case</i> .....	139
Gambar 3. 72 Beban berat struktur balok pada GEO5 .....	140
Gambar 3. 73 Pemodelan beban permukaan pada GEO5 .....	141
Gambar 3. 74 Pemodelan beban gempa pada GEO5 .....	142
Gambar 3. 75 Pemodelan kombinasi beban pada GEO5 .....	143
Gambar 3. 76 Analisis pemodelan GEO5 .....	144
Gambar 3. 77 <i>Output</i> hasil pemodelan GEO5.....	145
Gambar 4. 1 Pola deformasi terowongan <i>downtrack</i> .....	147
Gambar 4. 2 Pola deformasi terowongan <i>uptrack</i> .....	148
Gambar 4. 3 Grafik deformasi terowongan non-seismik .....	150
Gambar 4. 4 Gaya momen terowongan <i>downtrack</i> .....	150
Gambar 4. 5 Gaya momen terowongan <i>uptrack</i> .....	151
Gambar 4. 6 Gaya geser terowongan <i>downtrack</i> .....	151
Gambar 4. 7 Gaya geser terowongan <i>uptrack</i> .....	152
Gambar 4. 8 Gaya aksial terowongan .....	152
Gambar 4. 9 Grafik gaya momen terowongan .....	154
Gambar 4. 10 Grafik gaya geser terowongan.....	154
Gambar 4. 11 Grafik gaya aksial terowongan .....	155
Gambar 4. 12 Pola deformasi terowongan <i>downtrack</i> seismik .	157
Gambar 4. 13 Pola deformasi terowongan <i>uptrack</i> seismik.....	158
Gambar 4. 14 gaya momen terowongan <i>downtrack</i> seismik.....	160
Gambar 4. 15 Gaya momen terowongan <i>uptrack</i> seismik .....	160
Gambar 4. 16 Gaya geser terowongan <i>downtrack</i> seismik .....	161
Gambar 4. 17 gaya geser terowongan <i>uptrack</i> seismik .....	161
Gambar 4. 18 Gaya aksial terowongan seismik .....	162
Gambar 4. 19 Deformasi akibat konstruksi <i>uptrack</i> .....	163
Gambar 4. 20 Gaya momen akibat konstruksi <i>uptrack</i> .....	164
Gambar 4. 21 Gaya geser akibat konstruksi <i>uptrack</i> .....	164
Gambar 4. 22 Penurunan tanah <i>ground level</i> kondisi LWL .....	166
Gambar 4. 23 Penurunan tanah <i>ground level</i> kondisi HWL .....	167
Gambar 4. 24 Penurunan tanah <i>ground level</i> kondisi FWL .....	167
Gambar 4. 25 Grafik angka keamanan tahap konstruksi.....	170
Gambar 4. 26 <i>Output</i> GEO5 kombinasi beban LC 1.....	172
Gambar 4. 27 <i>Output</i> GEO5 kombinasi beban LC 2.....	173
Gambar 4. 28 <i>Output</i> GEO5 kombinasi beban LC 3.....	174

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Nilai Koefisien m .....	37
Tabel 2. 2 Beban Permukaan Minimum.....	40
Tabel 2. 3 Persyaratan Gempa untuk Terowongan .....	41
Tabel 2. 4 Pengaruh Sekitar Daerah Kontruksi Terowongan.....	44
Tabel 3. 1 Rangkaian Pengujian <i>Soil Properties</i> .....	57
Tabel 3. 2 General Stratigrafi pada CP 105.....	57
Tabel 3. 3 Desain <i>Section</i> Terowongan CP 105 .....	58
Tabel 3. 4 Nilai N-SPT Desain pada CP 105 .....	62
Tabel 3. 5 Berat Volume Tanah pada CP 105 .....	65
Tabel 3. 6 Berat Volume Tanah ( $\gamma$ ) CP 105-3.....	65
Tabel 3. 7 Kuat Geser Efektif Tanah pada CP 105 .....	66
Tabel 3. 8 Kuat Geser Efektif Tanah CP 105-3.....	67
Tabel 3. 9 Kuat Geser Tanah <i>Undrained</i> CP 105-3 .....	68
Tabel 3. 10 Parameter Nilai Eu pada CP 105.....	68
Tabel 3. 11 Modulus Young <i>Undrained</i> Tanah Lempung .....	69
Tabel 3. 12 Modulus Young <i>Drained</i> Tanah Lempung .....	69
Tabel 3. 13 Modulus Young Tanah Pasir CP 105-3.....	70
Tabel 3. 14 Koefisien Tekanan Tanah <i>At-rest</i> CP 105-3.....	71
Tabel 3. 15 Koefisien Permeabilitas Tanah CP 105-3 .....	71
Tabel 3. 16 Jangkauan Nilai Banding Poisson .....	72
Tabel 3. 17 Nilai Rasio Poisson Tanah CP 105-3 .....	72
Tabel 3. 18 Koefisien Kekuatan Struktural Tanah CP 105-3 .....	73
Tabel 3. 19 Data Kedalaman Muka Air Tanah.....	73
Tabel 3. 20 Rangkuman Parameter Tanah Pemodelan Plaxis .....	74
Tabel 3. 21 Rangkuman Parameter Tanah Pemodelan GEO5.....	75
Tabel 3. 22 Data Geometri dan Material Terowongan.....	76
Tabel 3. 23 Data Kedalaman Terowongan CP 105-3.....	77
Tabel 3. 24 Detail Posisi Join <i>Lining</i> Terowongan .....	81
Tabel 3. 25 Rangkuman Parameter <i>Lining</i> Pemodelan Plaxis.....	82
Tabel 3. 26 Rangkuman Parameter <i>Lining</i> Pemodelan GEO5 .....	86
Tabel 3. 27 Data Properti Perkerasan Jalan Raya.....	89
Tabel 3. 28 Data Percepatan Puncak Gempa (PGA).....	90
Tabel 3. 29 Rangkuman Desain Beban Pemodelan Plaxis.....	91

Tabel 3. 30 Rangkuman Desain Beban Pemodelan GEO5 .....	94
Tabel 3. 31 Nilai Faktor Beban Pemodelan GEO5 .....	94
Tabel 3. 32 Desain Kombinasi Beban Pemodelan GEO5 .....	95
Tabel 3. 33 Data Profil Alat TBM MRT Jakarta.....	95
Tabel 3. 34 Gometri Lapisan Tanah Model Plaxis.....	102
Tabel 3. 35 Sudut Tiap Segmen <i>Lining</i> .....	108
Tabel 3. 36 Titik Koordinat Model Geometri Tanah GEO5 .....	135
Tabel 4. 1 Deformasi Terowongan Non-Seismik.....	148
Tabel 4. 2 Cek Deformasi Terowongan Non-Seismik .....	149
Tabel 4. 3 Gaya Momen Terowongan.....	151
Tabel 4. 4 Gaya Geser Terowongan.....	152
Tabel 4. 5 Gaya Aksial Terowongan.....	153
Tabel 4. 6 Tegangan-tegangan Antarmuka Terowongan .....	156
Tabel 4. 7 Deformasi Terowongan Kondisi Seismik .....	158
Tabel 4. 8 Cek Persyaratan Deformasi Kondisi Seismik .....	159
Tabel 4. 9 Gaya Momen Terowongan Seismik .....	160
Tabel 4. 10 Gaya Geser Terowongan Seismik .....	161
Tabel 4. 11 Gaya Aksial Terowongan Seismik .....	162
Tabel 4. 12 Perbandingan Gaya Momen .....	163
Tabel 4. 13 Deformasi <i>Downtrack</i> Akibat .....	164
Tabel 4. 14 Perbandingan Gaya Dalam Sebelum.....	165
Tabel 4. 15 Penurunan Tanah pada <i>Ground Level</i> .....	166
Tabel 4. 16 Cek Penurunan Tanah pada <i>Ground Level</i> .....	169
Tabel 4. 17 Cek Angka Keamanan Tahap Konstruksi .....	170
Tabel 4. 18 Cek Angka Keamanan Tahap Gempa .....	170
Tabel 4. 19 Rangkuman Hasil Pemodelan GEO5 .....	175
Tabel 4. 20 Beda Penurunan yang Terjadi .....	176

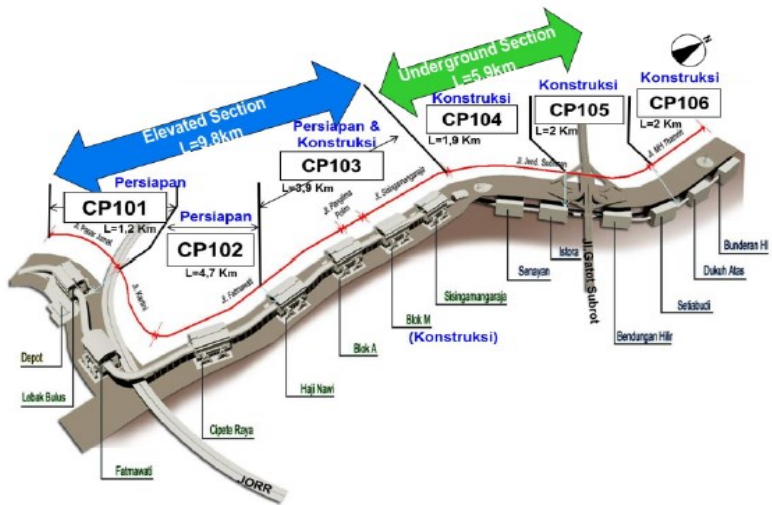
# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Proyek pembangunan MRT (*Mass Rapid Transit*) Jakarta atau lebih dikenal sebagai Moda Raya Terpadu menjadi solusi bagi Pemerintah Provinsi Jakarta yang merupakan daerah padat bangunan maupun padat penduduk untuk mengatasi permasalahan terkait meningkatnya angka kemacetan di Jakarta karena semakin banyaknya angka kepemilikan kendaraan pribadi, dengan adanya fasilitas MRT (*Mass Rapid Transit*) ini maka angka kemacetan dapat dikurangi, sehingga mobilitas masyarakat tidak terganggu yang nantinya akan berdampak pada jalannya perekonomian dan aspek-aspek yang lain.

Pembangunan proyek kereta MRT Jakarta fase 1 dimulai pada 10 Oktober 2013. Sebagian dari konstruksi jalur MRT Jakarta merupakan struktur layang (*elevated*) yang membentang  $\pm 10$  km dari wilayah Lebak Bulus hingga Sisingamangaraja. Dari rute tersebut, terdapat 7 Stasiun Layang, yaitu Lebak Bulus, Fatmawati, Cipete Raya, Haji Nawi, Blok A, Blok M dan Sisingamangaraja. Sementara Depo kereta api dibangun di area Lebak Bulus, berdekatan dengan stasiun awal atau akhir Lebak Bulus. Seluruh stasiun penumpang dan lintasan dibangun dengan struktur layang yang berada di atas permukaan tanah, sementara Depo kereta api dibangun di permukaan tanah (*on ground*). Konstruksi bawah tanah (*underground*) MRT Jakarta membentang  $\pm 6$  km, yang terdiri dari terowongan MRT bawah tanah dan enam stasiun MRT bawah tanah, yang terdiri dari Stasiun Senayan, Istora, Bendungan Hilir, Setiabudi, Dukuh Atas, Bundaran Hotel Indonesia dengan pembagian koridor paket pengerjaan terbagi menjadi tiga yaitu CP 104, CP 105 dan CP 106. (<http://www.jakartamrt.co.id/proyek-dan-perkembangan>)



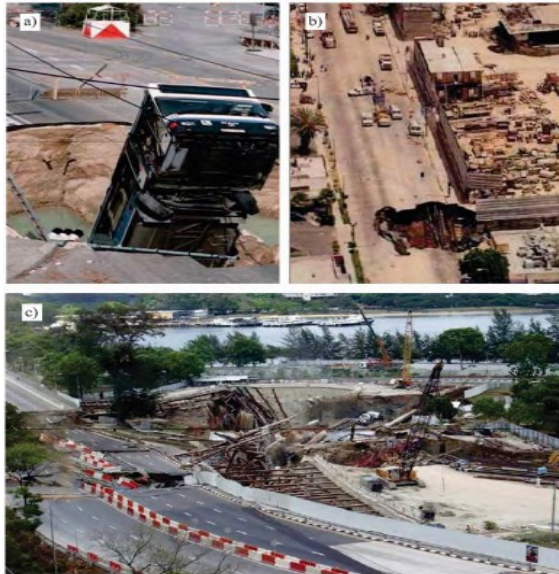
Gambar 1. 1 Proyek MRT Jakarta

(Sumber: Ground Response to Tunnel Construction for The Jakarta MRT, 2017)

Konstruksi terowongan MRT Jakarta merupakan konstruksi terowongan bawah tanah pada tanah lunak. Menurut Paulus P Rahardjo (2004) terowongan yang dibuat pada tanah lunak memiliki keuntungan tersendiri, karena definisi tanah lunak dalam hal ini adalah tanah yang dapat digali secara manual, sehingga memudahkan dalam proses penggalian. Akan tetapi tidak berarti tanpa resiko, tanah yang lunak memiliki rasio keruntuhan yang dapat dikatakan lebih besar dari batuan. Dengan demikian kajian stabilitas dan deformasi terowongan pada tanah lunak merupakan salah satu tahapan penting dalam perencanaan terowongan pada tanah lunak.

Material tanah lunak pada umumnya tidak dapat menahan berat sendiri dalam jangka waktu yang panjang (*stand-up time*). Tanah yang padat dapat memberikan kondisi yang menguntungkan karena struktur terowongan dapat dibiarkan tanpa disokong untuk

beberapa waktu sebelum pemasangan dinding terowongan yang permanen.



Gambar 1. 2 Keruntuhan konstruksi terowongan

(Sumber : Stability of Shallow Tunnel in Soils Using Analytical and Numerical Methods, 2013)

Salah satu bangunan terowongan yang dijadikan analisa dalam penulisan tugas akhir ini adalah bangunan bawah tanah (*underground*) yaitu terowongan MRT Jakarta *Section CP 105-3* dari STA 12+403 sampai dengan STA 12+699 dengan panjang terowongan sebesar 296 meter yang terletak antara Stasiun Bundungan Hilir hingga Stasiun Setiabudi. *Section* ini dikerjakan oleh SOWJ-JV (*Shimizu-Obayashi-Wijaya Karya-Jaya Konstruksi Joint Venture*) dengan proses pengeboran menggunakan alat TBM (*Tunneling Boring Machine*) tipe EPB-S (*Earth Pressure Balance-Shield*).



Analisa dalam tugas akhir ini dimaksudkan untuk mengetahui deformasi yang terjadi pada terowongan, penurunan yang terjadi pada permukaan tanah akibat konstruksi terowongan, serta stabilitas yang terjadi pada terowongan terhadap beban-beban yang bekerja dan kondisi tanah di sekitar terowongan. Dalam melakukan analisa, akan dilakukan pemodelan menggunakan *software* Plaxis 2D v.20 dan *software* GEO5-Program *Beam*. Program Plaxis digunakan untuk memodelkan terowongan pada arah melintang untuk mengetahui deformasi dan angka keamanan yang terjadi, sedangkan program GEO5 digunakan untuk memodelkan terowongan pada arah memanjang untuk mengetahui penurunan pada struktur terowongan dalam arah memanjang.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Pada tugas akhir ini, rumusan masalah sebagai berikut:

1. Apa saja faktor-faktor yang memengaruhi stabilitas dan deformasi terowongan?
2. Bagaimana deformasi yang terjadi pada terowongan arah melintang (*cross section*)?
3. Bagaimana penurunan permukaan tanah yang terjadi akibat konstruksi terowongan?
4. Bagaimana stabilitas yang terjadi pada terowongan?
5. Bagaimana penurunan terowongan yang terjadi pada arah memanjang (*longitudinal section*)?

## **1.3. Tujuan**

Berdasarkan rumusan masalah di atas, dapat dijelaskan tujuan penulisan proyek akhir ini sebagai berikut:

1. Mengetahui faktor-faktor apa sajakah yang memengaruhi stabilitas dan deformasi terowongan.
2. Menganalisa deformasi yang terjadi pada terowongan arah melintang (*cross section*)

3. Menganalisa penurunan permukaan tanah yang terjadi akibat konstruksi terowongan
4. Menganalisa stabilitas yang terjadi pada terowongan
5. Menganalisa penurunan yang terjadi pada terowongan arah memanjang (*longitudinal section*)

#### **1.4. Manfaat**

Penulis dalam hal ini melakukan analisa geoteknik pada konstruksi terowongan (*tunnel*) bawah tanah pada proyek MRT Jakarta *Section* CP 105-3 pada STA 12+403 sampai dengan STA 12+699 yaitu analisa stabilitas dan deformasi terowongan yang terjadi, sehingga manfaat yang didapat oleh penulis adalah dapat menganalisa permasalahan geoteknik yang terjadi pada terowongan bawah tanah, khususnya terowongan pada tanah lunak. Selain itu juga diharapkan dapat menambah khasanah ilmu pengetahuan di bidang geoteknik, terutama yang berhubungan dengan bidang perencanaan geoteknik terowongan yang masih minim literatur tentang bidang tersebut.

#### **1.5. Batasan Masalah**

Dalam penulisan proyek akhir ini, penulis membatasi beberapa permasalahan agar pembahasan dapat lebih fokus, batasan masalah sebagai berikut:

1. Tidak memperhitungkan saluran drainase dan sistim ventilasi pada terowongan.
2. Tidak memperhitungkan perencanaan biaya konstruksi (RAB).
3. Beban akibat rel kereta dan kereta di dalam terowongan diabaikan.
4. Tidak menghitung perencanaan tulangan untuk struktur *lining* terowongan.
5. Tidak membahas tentang penurunan Muka Air Tanah (MAT) yang terjadi akibat konstruksi terowongan.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

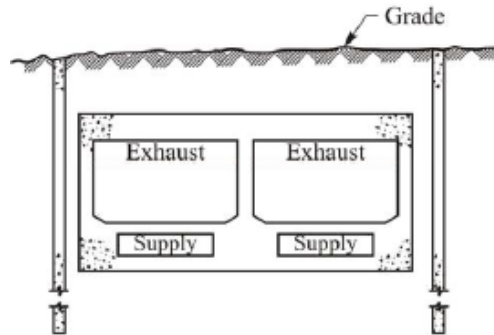
### 2.1. Terowongan

Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 34 Tahun 2006 tentang Jalan yang dimaksud dengan terowongan adalah jalan yang terletak di dalam tanah dan atau di dalam air. Terowongan jalan merupakan bangunan yang dibuat sebagai alternatif yang layak untuk menyeberangi sungai atau melintasi hambatan fisik seperti gunung, jalan raya, jalan kereta api, atau fasilitas lain, untuk memenuhi persyaratan lingkungan atau ekologi. Terowongan merupakan struktur bawah tanah yang mempunyai panjang lebih dari lebar penampang galiannya, dan mempunyai gradien memanjang kurang dari 15 %.

SNI 8460 tahun 2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik mengklasifikasikan bangunan terowongan menjadi tiga tipe yaitu terowongan gali dan tutup, terowongan pegunungan, dan terowongan perisai.

#### 1. Terowongan Gali dan Tutup (*Cut and Cover Tunnel*)

Terowongan gali dan tutup adalah terowongan yang digali dari permukaan tanah (*cut*) menggunakan sistem penahan tanah untuk membangun terowongan pada kedalaman yang diinginkan kemudian material galian dibawa kembali untuk digunakan sebagai penutup terowongan (*cover*). Pada dasarnya bentuk dari terowongan gali dan tutup ini adalah jenis terowongan dengan bentuk persegi panjang, namun terowongan ini dapat juga dibuat dengan bentuk yang lebih kompleks. Kedalaman *overburden* terowongan (jarak antara permukaan tanah terhadap titik atas terowongan) tidak ada batasan minimum dalam konstruksi. Kedalaman terowongan ini maksimum sekitar 40 meter dari permukaan tanah.



Gambar 2. 1 Terowongan gali dan tutup

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

## 2. Terowongan Pegunungan (*Mountain Tunnel*)

Terowongan pegunungan adalah terowongan yang dibangun dengan mengoptimalkan fungsi kemampuan dukungan alami batuan sekitarnya. Batuan distabilkan selama proses penggalian dengan beton semprot, baut batuan, penyangga baja dan perkuatan yang lain. Bentuk dari terowongan pegunungan pada umumnya adalah terowongan berbentuk tapal kuda atau terowongan lengkung setengah lingkaran.



Gambar 2. 2 Terowongan pegunungan

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

### 3. Terowongan Perisai (*Shield Tunnel*)

Terowongan perisai adalah terowongan yang dibangun menggunakan perisai (*shield*) sebagai penahan tanah saat proses penggalian. Sebuah perisai didorong dalam tanah untuk membuat terowongan. Lapisan luar dari perisai dan segmen berfungsi untuk mendukung dinding terowongan. Jenis perisai tertutup menstabilkan muka bidang galian menggunakan tanah atau cairan *slurry* untuk menahan tekanan tanah dan hidraulik. Bentuk dari terowongan perisai ini pada umumnya berbentuk lingkaran penuh maupun berbentuk oval.

Terowongan perisai pada umumnya diaplikasikan pada tanah lunak, namun pada akhir-akhir ini dengan metode yang sesuai terowongan perisai juga dapat diaplikasikan pada batuan keras. Kedalaman *overburden* terowongan minimal adalah setengah dari diameter luar perisai ( $0.5 D$ ) dan maksimal kedalaman *overburden* biasanya ditentukan berdasarkan tekanan air tanah.



Gambar 2. 3 Terowongan perisai MRT Jakarta  
(Sumber : MRT Jakarta Annual Report, 2016)

## 2.2. *Tunnel Boring Machine (TBM)*

*Tunnel Boring Machine (TBM)* adalah alat pengeboran terowongan yang berpenampang lingkaran yang memiliki mata bor atau pemotong di bagian depan (*cutter head*) yang berputar untuk menggerus tanah yang akan dibor dimana perisai yang ada pada TBM (*shield machine body*) digunakan untuk menahan tanah agar tidak terjadi keruntuhan pada muka bidang galian dan untuk menahan masuknya air tanah. Dalam pengeboran terowongan, prinsip kerja utama alat TBM adalah proses penggalian tanah, proses pemasangan *lining* (dinding terowongan), pembuangan tanah galian, dan proses Bergeraknya TBM.



Gambar 2. 4 TBM Antareja MRT Jakarta

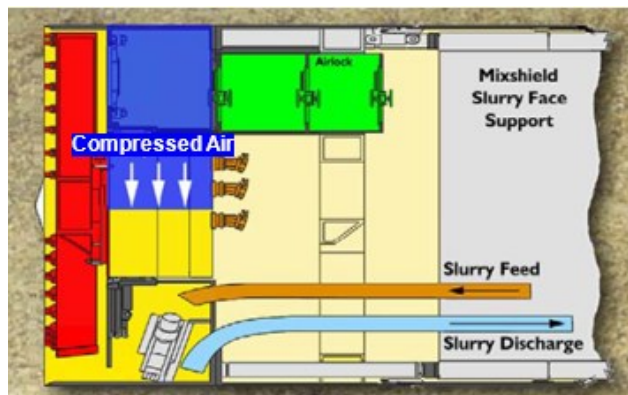
(Sumber : <https://sahlengineering.com/spesifikasi-mesin-bor-mrt-antareja-jakarta/>)

Berdasarkan metode kerja dalam proses penggalian tanah, jenis TBM dibagi menjadi dua yaitu *Slurry Shield Boring Machine* dan *Earth Pressure Boring Machine (EPB-S)*.

### 1. *Slurry Shield Boring Machine*

*Slurry Shield Boring Machine* menggunakan *slurry* (campuran bentonit dan air) yang bertekanan untuk

menyeimbangkan tekanan tanah dan air tanah pada muka bidang galian. Mesin ini menyalurkan tekanan secara hidraulik melalui lumpur kental yang terbentuk dari hasil galian yang terperangkap dalam *cutter chamber* dan bercampur dengan bentonit dan air melalui pipa *slurry* (*slurry feed pipe*). Dalam kasus ini, besarnya tekanan yang disalurkan dapat diatur dari pengukur tekanan dan keran kontrol dalam sistem pemipaan. Metode ini membutuhkan pengaturan tekanan yang lebih teliti dan hati-hati. Kekurangan dari metode ini adalah, perlunya instalasi pemisahan yang harus dibangun dan dioperasikan di permukaan untuk memisahkan *slurry* dari lumpur hasil galian.



Gambar 2. 5 TBM tipe *slurry shield*

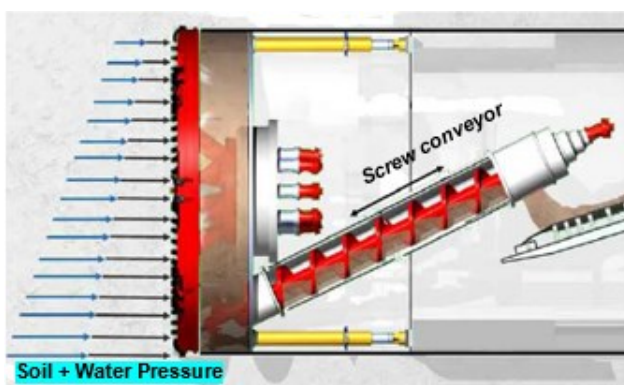
(Sumber : Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels-Civil Element, 2009)

## 2. EPB Shield Boring Machine

Prinsip kerja dari TBM tipe *Earth Pressure Balanced Shield* (EPB-S) adalah dengan menyeimbangkan antara tekanan tanah (*earth pressure*) dan air tanah pada muka bidang galian dengan tekanan di dalam *pressure chamber*. Berbeda



dengan *slurry shield*, tekanan disalurkan secara mekanis melalui butir-butir tanah dan mengalami reduksi akibat gesekan pada sepanjang *screw conveyor*. *Earth pressure* pada *cutter chamber* dikontrol dengan mengatur kecepatan pergerakan TBM dan kecepatan rotasi *screw conveyor* yang berbanding dengan jumlah lumpur galian yang dihisap untuk dikeluarkan dari *cutter chamber*. TBM tipe EPB dapat digunakan untuk menggali tanah lanau lunak dan lempung lunak.



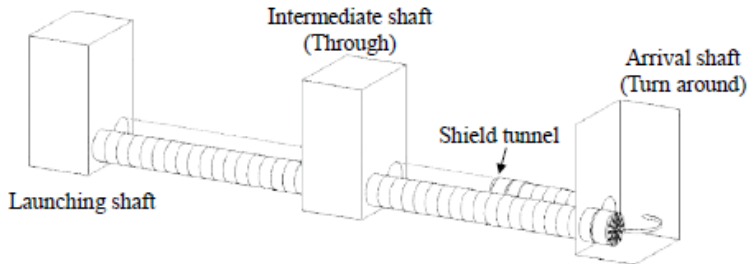
Gambar 2. 6 TBM tipe EPB-S

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

### 2.3. *Shaft*

*Shaft* atau bukaan vertikal adalah tempat yang digunakan dalam pelaksanaan konstruksi terowongan perisai sebagai tempat untuk membawa masuk alat TBM saat dimulainya pelaksanaan pengeboran terowongan, keluar saat selesai pengeboran, untuk memutar mesin TBM apabila dilakukan pengeboran disisi yang lain dan untuk merakit dan membongkar mesin TBM. *Shaft* juga digunakan sebagai jalan akses keluar-masuk proyek dan untuk membawa material lainnya seperti tanah hasil galian yang akan

dibuang menuju lokasi pembuangan yang telah disediakan oleh proyek. *Shaft* diklasifikasikan berdasarkan tujuannya yaitu *shaft* keberangkatan, *shaft* perantara, dan *shaft* kedatangan. *Shaft* pada umumnya juga digunakan sebagai bangunan stasiun bawah tanah untuk terowongan rel kereta.



Gambar 2. 7 *Shaft* terowongan

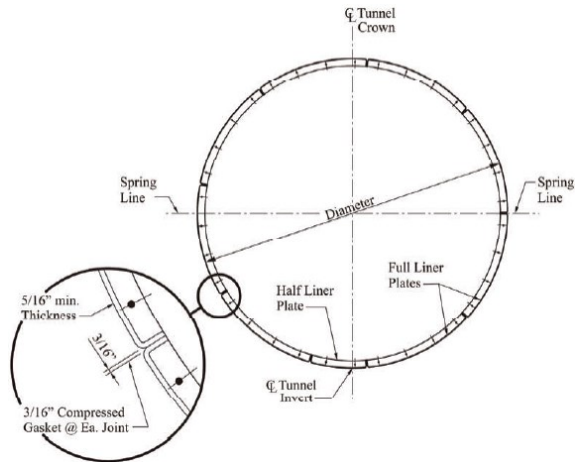
(Sumber : Standard Specifications for Tunneling: Shield Tunnel, 2016)

## 2.4. *Lining* Terowongan

Menurut Kolybas (2005) *lining* adalah sebuah struktur berupa cangkang (*shell*) yang terbuat dari beton bertulang yang dipasang segera setelah dilakukan penggalian terowongan. Ada berbagai macam jenis *lining* terowongan berdasarkan cara pembuatannya dan material yang digunakan, salah satunya adalah beton pra-cetak.

Pada umumnya, *lining* pada terowongan memiliki tiga titik acuan, yaitu:

1. *Crown* yang merupakan bagian atas atau puncak dari *lining* terowongan.
2. *Spring Line* yang merupakan garis horizontal pada pusat *lining* terowongan.
3. *Invert* yang merupakan bagian dasar (bawah) dari *lining* terowongan.



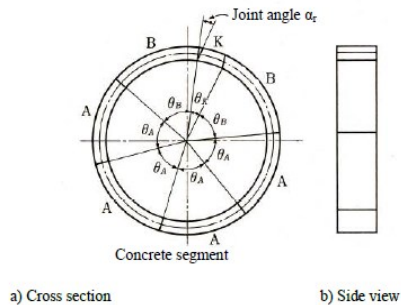
Gambar 2. 8 *Lining* terowongan

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

Sebuah *lining* terowongan (*full*) terdiri dari beberapa segmen-segmen yang membentuk sebuah *ring* terowongan dan susunan dari *ring* terowongan akan membentuk *final lining* terowongan (*longitudinal tunnel*).

a. Segmen *Ring* Terowongan

*Ring* terowongan yaitu susunan dari beberapa segmen-segmen yang pada umumnya terbuat dari beton pra-cetak yang membentuk sebuah *lining* atau dinding terowongan. Segmen *ring* terowongan tersusun dari beberapa segmen dan segmen kunci (*key segment*). Segmen-segmen tersebut mempunyai sudut masing-masing. Pada umumnya untuk segmen utama konfigurasi sudutnya sama, sedangkan segmen kunci biasanya lebih kecil sudutnya dari segmen utama.



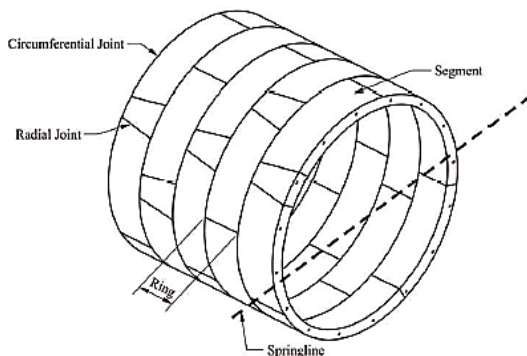
Gambar 2. 9 Segmen *ring* terowongan

(Sumber : Standard Specifications for Tunneling: Shield Tunnel, 2016)

#### b. *Final Lining* Terowongan

Segmen *ring* yang telah disusun membentuk sebuah *final lining* atau terowongan dalam arah memanjang. Sambungan pada *lining* (*joint*) terowongan dibedakan menjadi dua, yaitu:

1. *Radial Joint* adalah join atau sambungan antar segmen *lining* (*cross-section lining*).
2. *Circumferential Joint* adalah join atau sambungan antar *segmental ring* (*longitudinal lining*).



Gambar 2. 10 *Final lining* terowongan

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

## 2.5. Teori Mekanika Tanah

### 2.5.1. Konsep Tegangan Efektif

Tegangan efektif tanah adalah merupakan gaya per satuan luas yang dipikul oleh butir-butir tanah. Perubahan volume dan kekuatan tanah tergantung pada tegangan efektif di dalam massa tanah. Semakin tinggi tegangan efektif suatu tanah, maka semakin padat tanah tersebut.

Prinsip tegangan efektif dikembangkan oleh Terzaghi (1925, 1936). Konsep tegangan efektif Terzaghi ditunjukkan pada Persamaan 2.1, tegangan total ditunjukkan pada Persamaan 2.2, dan tekanan air pori ditunjukkan pada Persamaan 2.3.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.1)$$

$$\sigma = \gamma_{sat} z + \gamma_w z \quad (2.2)$$

$$u = \gamma_w z \quad (2.3)$$

$$\sigma' = (\gamma_{sat} - \gamma_w) z = \gamma' z \quad (2.4)$$

dengan,

$\sigma'$  = Tegangan efektif tanah (kN/m<sup>2</sup>),

$\sigma$  = Tegangan total tanah (kN/m<sup>2</sup>),

$u$  = Tekanan air pori tanah (kN/m<sup>2</sup>),

$\gamma_{sat}$  = Berat volume tanah jenuh (kN/m<sup>3</sup>),

$\gamma_w$  = Berat volume air (kN/m<sup>3</sup>),

$\gamma'$  = Berat volume tanah terendam air (kN/m<sup>3</sup>),

$z$  = Kedalaman yang ditinjau (m).

### 2.5.2. Tekanan Tanah dalam Keadaan Diam

Suatu elemen tanah pada kedalaman  $z$  akan terkena tekanan arah vertikal ( $\sigma_v$ ) dan tekanan arah horizontal ( $\sigma_h$ ). Rasio antara tekanan arah horizontal dan tekanan arah vertikal dinamakan koefisien tekanan tanah *at-rest* ( $K_0$ ) seperti ditunjukkan pada Persamaan 2.5

$$K_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (2.5)$$

$$\sigma_v = \gamma_{tanah} z \quad (2.6)$$

$$\sigma_h = K_0(\gamma_{tanah} z) \quad (2.7)$$

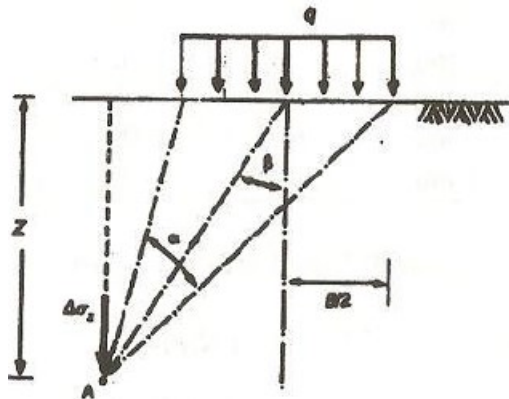
Untuk tanah yang terendam air sebagian, tekanan efektif tanah arah vertikal ( $\sigma_v'$ ) dan tekanan efektif tanah dalam keadaan diam arah horizontal ( $\sigma_h'$ ) ditunjukkan pada Persamaan 2.8 dan Persamaan 2.9.

$$\sigma_v' = (\gamma_{tanah} - \gamma_w) z + \gamma_w h \quad (2.8)$$

$$\sigma_h' = K_0(\gamma_{tanah} - \gamma_w) z + \gamma_w h \quad (2.9)$$

### 2.5.3. Distribusi Tegangan Akibat Beban

Boussinesq (1883) memberikan solusi untuk masalah yang berhubungan dengan penentuan tegangan-tegangan yang terjadi pada sembarang titik pada sebuah medium yang homogen, elastis, dan isotropis di mana medium tersebut adalah berupa ruang yang luas tak terhingga dan pada permukaannya bekerja sebuah beban.



Gambar 2. 11 Tegangan vertikal akibat suatu beban

(Sumber : Braja M. Das, 1995)

Untuk kenaikan tegangan vertikal ( $\Delta\sigma_z$ ) yang terjadi akibat beban merata ditunjukkan pada Persamaan 2.10.

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi} (\alpha + \sin \alpha \cos 2 \beta) \quad (2.10)$$

dengan,

$\Delta\sigma_z$  = Kenaikan tegangan vertikal ( $\text{kN/m}^2$ ),

$q$  = Beban terbagi rata ( $\text{kN/m}^2$ ),

$\alpha, \beta$  = Sudut dalam radian.

#### 2.5.4. Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb

Mohr (1980) menyatakan bahwa keruntuhan terjadi pada suatu material akibat kombinasi kritis antara tegangan normal dan geser, dan bukan hanya akibat tegangan normal maksimum atau tegangan geser maksimum saja. Jadi, hubungan fungsi antara tegangan normal dan geser pada sebuah bidang keruntuhan dapat dinyatakan dalam Persamaan 2.11.

$$\tau = f(\sigma) \quad (2.11)$$

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 bergantung pada jenis tanah dan kepadatannya, serta gesekan antara butir-butir tanah yang besarnya berbanding lurus dengan tegangan normal pada bidang gesernya.

Coulomb (1776) mendefinisikan  $f(\sigma)$  yang ditunjukkan pada Persamaan 2.12.

$$\tau = c + \sigma(\tan \varphi) \quad (2.12)$$

dengan,

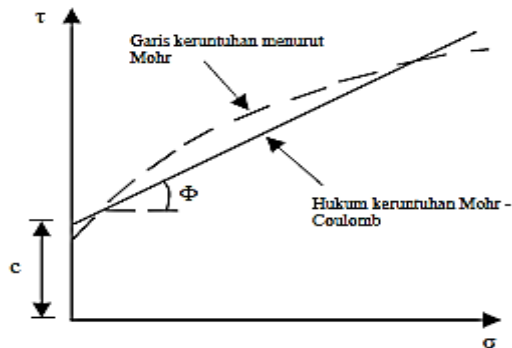
$\tau$  = Kuat geser tanah ( $\text{kN/m}^2$ ),

$c$  = Kohesi tanah ( $\text{kN/m}^2$ ),

$\varphi$  = Sudut gesek tanah ( $^{\circ}$ ),

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

Keruntuhan geser pada material akan terjadi apabila tegangan yang bekerja berada di luar garis selubung kegagalan (*failure envelope*). Garis putus-putus menggambarkan garis keruntuhan sebenarnya menurut Mohr dengan fungsi lengkung, sedangkan garis linier nyata menggambarkan garis keruntuhan Mohr-Coulomb yang merupakan bentuk pendekatan dari garis keruntuhan Mohr.



Gambar 2. 12 Krteria keruntuhan Mohr-Coulomb

(Sumber : Braja M. Das, 1985)

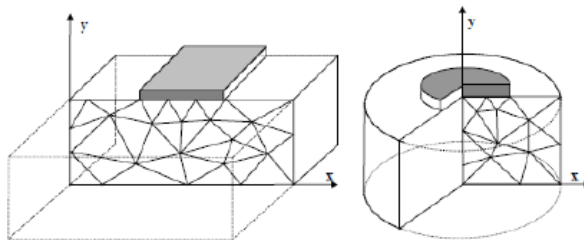
## 2.6. PLAXIS 2D v.20

PLAXIS 2D adalah program elemen hingga dua dimensi yang digunakan untuk analisis deformasi, stabilitas, dan aliran air tanah dalam rekayasa geoteknik. Kondisi sesungguhnya dapat dimodelkan dalam regangan bidang maupun secara axi-simetri. Program ini menerapkan metode antarmuka grafis yang mudah digunakan sehingga pengguna dapat membuat model geometri dan jaring elemen dengan mudah berdasarkan penampang melintang dari kondisi yang dianalisis.



### 2.6.1. Model Geometri

Dalam memodelkan sebuah model elemen hingga dimulai dengan membuat geometri dari model, yang merupakan representasi dari masalah yang ingin dianalisis. Sebuah model geometri terdiri dari titik-titik, garis-garis, dan *cluster*. Titik dan garis dimasukkan oleh pengguna, sedangkan *cluster* dibentuk oleh program. Selain komponen-komponen dasar tersebut, obyek-obyek struktural atau kondisi khusus dapat diterapkan pada model geometri untuk memodelkan terowongan, dinding, pelat, interaksi antara tanah dengan struktur bangunan dan pembebanan. Dalam PLAXIS 2D v.20 terdapat dua opsi untuk membentuk model geometri, yaitu regangan bidang dan axi-simetri. Perbedaan antara kedua jenis model tersebut adalah satuan gayanya, dimana dalam regangan bidang, gaya dinyatakan dalam satuan gaya per satuan lebar. Sedangkan pada axi-simetri, gaya dinyatakan dalam satuan gaya per radian.



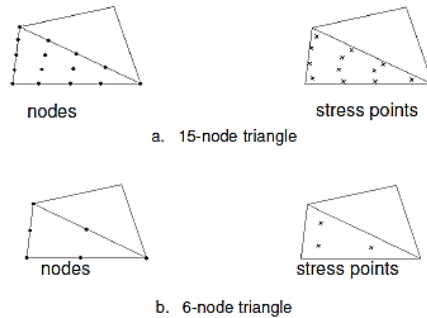
Gambar 2. 13 Model regangan bidang dan axi-simetri

(Sumber : PLAXIS 2D Reference Manual Connect Edition V20, 2019)

### 2.6.2. Jenis Elemen Dasar

Jenis elemen dasar dari suatu jaring elemen adalah elemen segitiga dengan lima belas titik nodal atau elemen segitiga dengan enam titik nodal. Penyusunan jaring elemen didasarkan pada suatu prosedur triangulasi yang handal, yang menghasilkan jaring elemen yang tidak teratur (*unstructured mesh*), namun

kinerja numerik dari jaring elemen tersebut umumnya lebih baik dari jaring elemen terstruktur (*structured mesh*).



Gambar 2. 14 Titik-titik nodal elemen

(Sumber : PLAXIS 2D Reference Manual Connect Edition V20, 2019)

### 2.6.3. Program Masukan

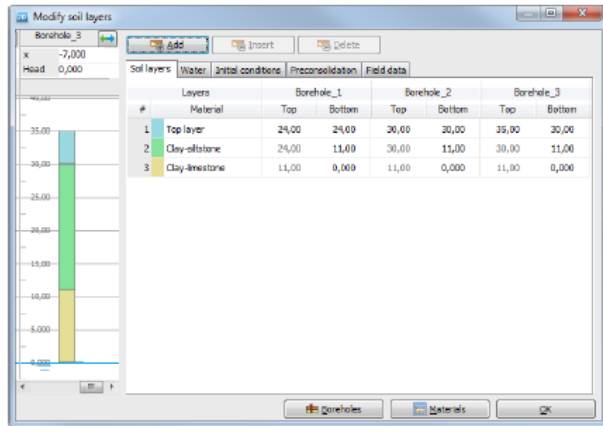
Dalam PLAXIS 2D v.20, proses pemodelan terdiri dalam 5 mode atau tahapan. Mode dipisahkan menjadi mode geometri dan mode perhitungan. Mode geometri terdiri dari tahapan pemodelan tanah (model geometri dan parameter tanah) dan tahapan pemodelan struktur (model geometri struktur, pembebanan, parameter struktural, dan lainnya). Untuk mode perhitungan terdiri dari tahapan penyusunan jaringan elemen, kondisi aliran, dan tahapan-tahapan konstruksi.

#### a) Mode Geometri

Mode geometri terdiri dari tahapan pemodelan tanah dan tahapan pemodelan struktur. Penjelasan secara umum sebagai berikut :

##### 1. Tahapan Pemodelan Tanah

Pemodelan tanah terdiri dari pemodelan geometri tanah dan pemodelan parameter tanah. Untuk pemodelan geometri tanah dimodelkan dengan membuat *borehole* (tebal lapisan-lapisan tanah).

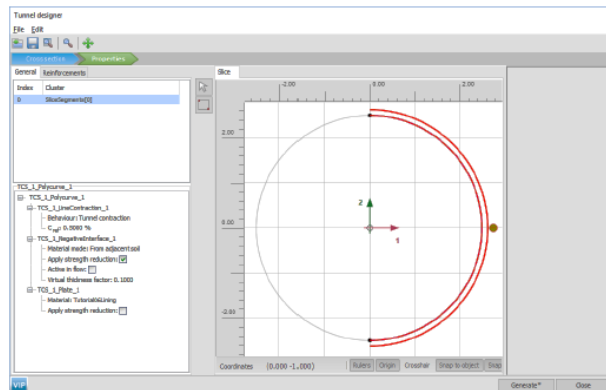


Gambar 2. 15 Model lapisan tanah PLAXIS 2D v.20

(Sumber : PLAXIS 2D Reference Manual Connect Edition V20, 2019)

## 2. Tahapan Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur terdiri dari pemodelan geometri struktur, pemodelan elemen struktural (tipe struktur, parameter struktur, perilaku struktur), pembebanan dan lainnya.



Gambar 2. 16 Model struktur PLAXIS 2D v.20

(Sumber : PLAXIS 2D Reference Manual Connect Edition V20, 2019)

## b) Mode Perhitungan

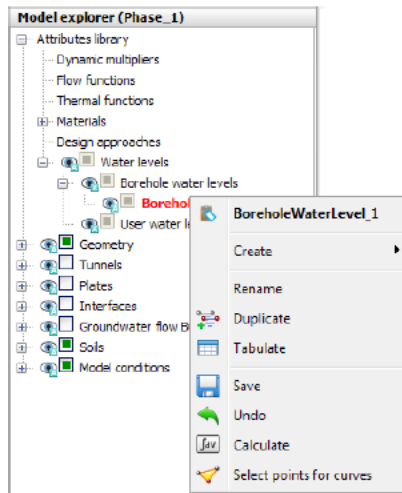
Mode perhitungan terdiri dari tahapan penyusunan jaringan elemen, tahapan kondisi aliran, dan tahapan konstruksi. Penjelasan secara umum sebagai berikut :

### 1. Tahapan Penyusunan Jaringan Elemen

Setelah model geometri didefinisikan secara lengkap dan sifat material telah diaplikasikan ke seluruh *cluster* dan obyek struktural, maka geometri harus dibagi-bagi menjadi elemen-elemen untuk melakukan perhitungan elemen hingga. Komposisi dari elemen-elemen hingga ini disebut sebagai jaring elemen hingga.

### 2. Tahapan *Flow Conditions*

Tahapan *flow conditions* adalah tahapan penentuan kedalaman muka air tanah dan tahapan perhitungan tekanan air pori tanah awal.

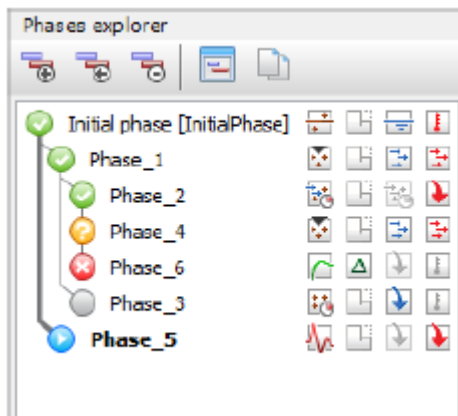


Gambar 2. 17 *Flow conditions* PLAXIS 2D v.20

(Sumber : PLAXIS 2D Reference Manual Connect Edition V20, 2019)

### 3. Tahap Perhitungan (*construction stage*)

Tahap *construction stage* merupakan tahap perhitungan dari tahap-tahap konstruksi yang telah dimodelkan. Tahapan konstruksi ini terdiri dari tahap kondisi awal (*initial phase*) atau perhitungan prosedur  $K_0$  dan tahapan konstruksi-konstruksi yang lain.



Gambar 2. 18 Tahap perhitungan PLAXIS 2D v.20

(Sumber : PLAXIS 2D Reference Manual Connect Edition V20, 2019)

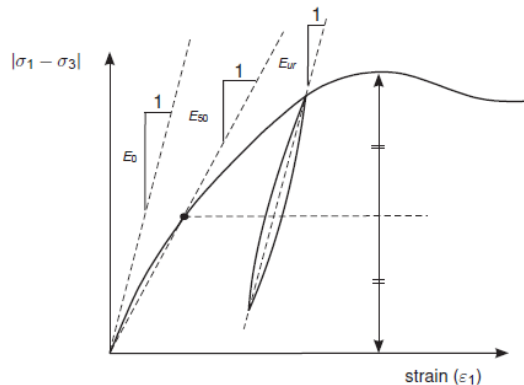
#### 2.6.4. Model Material Mohr-Coulomb

Model Mohr-Coulomb merupakan model liner elastik dan plastik sempurna (*linier elastic perfectly plastic model*) yang melibatkan lima buah parameter tanah, yaitu:

$E$	= Modulus Young	(kN/m <sup>2</sup> )
$\nu$	= Rasio poisson	(-)
$\varphi$	= Sudut geser	( <sup>0</sup> )
$c$	= Kohesi	(kN/m <sup>2</sup> )
$\psi$	= Sudut Dilatansi	( <sup>0</sup> )

## 1. Modulus Elastisitas Tanah ( $E$ )

Dalam mekanika tanah, kemiringan awal dari kurva tegangan-regangan pada umumnya dinotasikan sebagai  $E_0$  dan modulus sekan pada 50% kekuatan regangan umumnya dinotasikan sebagai  $E_{50}$ . Untuk material dengan rentang elastisitas linear yang lebar maka penggunaan  $E_0$  adalah realistis, namun untuk masalah pembebanan pada tanah, umumnya digunakan  $E_{50}$ . Pada pengurangan beban, seperti pada kasus galian, perlu digunakan  $E_{ur}$  dan bukan  $E_{50}$ . Untuk tanah, modulus pengurangan beban  $E_{ur}$  dan modulus pembebanan  $E_{50}$  cenderung semakin meningkat terhadap peningkatan tegangan keliling yang bekerja. Karena itu, lapisan tanah yang dalam cenderung mempunyai kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan dengan lapisan tanah yang dangkal.



Gambar 2. 19 Modulus elastisitas tanah ( $E_0$  dan  $E_{50}$ )

(Sumber : PLAXIS Material Models Connect Edition V20, 2019)

## 2. Angka Poisson ( $\nu$ )

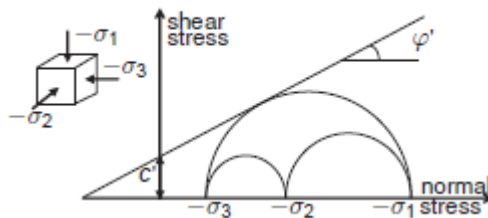
Uji triaksial terdrainase dapat menghasilkan perubahan volume yang signifikan pada awal pemberian beban aksial, yang menghasilkan konsekuensi berupa angka Poisson awal ( $\nu_0$ ) yang rendah. Pada beberapa kasus, terutama pada

masalah pengurangan beban, mungkin realistis untuk menggunakan nilai awal yang rendah, tetapi pada penggunaan model Mohr-Coulomb, secara umum direkomendasikan menggunakan nilai yang tinggi. Nilai akhir dari  $K_0$  sangat bergantung dari asumsi angka Poisson, karena itu penting untuk menentukan angka Poisson yang dapat menghasilkan nilai  $K_0$  yang realistis. Hubungan  $K_0$  dan angka Poisson ditunjukkan pada persamaan (2.13).

$$v = \frac{K_0}{1+K_0} \quad (2.13)$$

### 3. Sudut geser tanah ( $\varphi$ )

Nilai sudut geser tanah,  $\varphi$ , dimasukkan dalam dimensi derajat. Sudut geser tanah adalah parameter yang menentukan kuat geser dari tanah. Sudut geser tanah yang tinggi, seperti pada pasir padat, akan mengakibatkan peningkatan beban komputasi plastis. Waktu komputasi akan meningkat secara eksponensial terhadap sudut geser. Karena itu, sudut geser tanah yang tinggi sebaiknya dihindari saat melakukan perhitungan awal untuk suatu proyek tertentu. Waktu komputasi cenderung menjadi semakin panjang untuk penggunaan sudut geser tanah yang lebih besar dari  $35^0$ .



Gambar 2. 20 Sudut geser tanah

(Sumber : PLAXIS Material Models Connect Edition V20, 2019)

#### 4. Kohesi ( $c$ )

Kekuatan berupa kohesi mempunyai dimensi tegangan. PLAXIS dapat menangani pasir non-kohesif ( $c = 0$ ), namun beberapa pilihan tidak akan berjalan dengan baik. Untuk menghindari hal ini, pengguna program PLAXIS yang belum berpengalaman disarankan untuk memasukkan nilai yang kecil untuk kohesi ( $c > 0.2 \text{ kN/m}^2$ ).

#### 5. Sudut Dilatasi ( $\psi$ )

Sudut dilatasi,  $\psi$ , dinyatakan dalam derajat. Selain tanah lempung yang terkonsolidasi sangat berlebih, tanah lempung cenderung tidak menunjukkan dilatasi sama sekali ( $\psi = 0$ ). Dilatasi dari tanah pasir bergantung pada kepadatan serta sudut gesernya. Untuk pasir kwarsa besarnya dilatasi kurang lebih adalah  $\psi \approx \varphi - 30^\circ$ . Walaupun demikian, banyak kasus sudut dilatasi adalah 0 untuk nilai  $\varphi$  kurang dari  $30^\circ$ . Nilai negatif yang kecil untuk  $\psi$  hanya realistis untuk tanah pasir yang sangat lepas.

Model ini cukup baik sebagai tingkat pertama (*first order*) pendekatan perilaku tanah dan batuan. Disini lapis tanah dianggap mempunyai kekakuan yang konstan atau meningkat secara linier terhadap kedalaman. Hubungan antara modulus Young ( $E$ ) dengan modulus-modulus kekakuan yang lain, seperti modulus geser ( $G$ ), modulus Young *drained* ( $E'$ ) ditunjukkan pada Persamaan 2.14 dan Persamaan 2.15.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.14)$$

$$E' = \frac{E}{3(1-2\nu)} \approx 1.2 E \quad (2.15)$$

dengan,

$\nu$  = Rasio Poisson



### 2.6.5. Model Perilaku Drainase Tanah

Dalam Plaxis 2D v.20, pemodelan perilaku drainase tanah ada dua, yaitu pemodelan tanah terdrainase (*drained*) dan pemodelan tanah tak-terdrainase (*undrained*). Untuk pemodelan tanah yang tak terdrainase (*undrained*) dibedakan menjadi model *Undrained A*, *Undrained B*, dan *Undrained C*.

Cara analisa kondisi tanah *undrained* pada Plaxis ada tiga metode, yaitu:

#### 1. *Undrained A* (Metoda A)

Metode analisa *Undrained A* sebagai berikut:

- Menggunakan analisa tegangan efektif.
- Menggunakan parameter kuat geser tegangan efektif ( $c'$ ,  $\phi'$ ,  $\psi'$ ).
- Menggunakan parameter kekakuan tanah efektif ( $E'$ ,  $\nu'$ ).
- Dihasilkan tegangan air pori. Tepat tidaknya perhitungan tergantung kepada pilihan model dan parameter tanah.
- Kuat geser *undrained* ( $c_u$ ) bukan merupakan parameter masukan, tetapi merupakan hasil dari model konstitutif yang digunakan.
- Dapat dilakukan analisa konsolidasi setelah perhitungan *undrained*.
- Perhitungan menghasilkan peningkatan kuat geser *undrained* ( $c_u$ ).

#### 2. *Undrained B* (Metoda B)

Metode analisa *Undrained B* sebagai berikut:

- Menggunakan analisa tegangan efektif.

- Menggunakan parameter kuat geser tanah tegangan total ( $c = c_u, \phi = 0, \psi = 0$ ).
- Menggunakan parameter kekakuan tanah efektif ( $E', \nu'$ ).
- Dihasilkan tegangan air pori, namun sangat tidak akurat
- Kuat geser *undrained* ( $c_u$ ) merupakan parameter masukan, sehingga tidak menghasilkan kesalahan dalam perhitungan kestabilan *undrained*.
- Walaupun perhitungan konsolidasi dapat dilakukan disarankan untuk tidak melakukan analisa konsolidasi, karena tegangan air pori yang dihitung bisa sangat menyimpang .
- Perhitungan tidak akan menghasilkan peningkatan kuat geser *undrained* ( $c_u$ ), artinya jika dipaksakan melakukan analisa konsolidasi, nilai kuat geser *undrained* ( $c_u$ ) pada tahap berikutnya harus diubah secara manual.

### 3. *Undrained C* (Metoda C)

Metode analisa *Undrained C* sebagai berikut:

- Menggunakan analisa tegangan total.
- Menggunakan parameter kuat geser tegangan total ( $c = c_u, \phi = 0, \psi = 0$ ).
- Menggunakan parameter kekakuan tanah efektif ( $E_u, \nu_u = 0,495$ ).
- Secara prinsip model *Undrained C* sama dengan *Undrained B*, yang membedakan adalah parameter kekakuan tanah efektif yang digunakan, pada pemodelan *Undrained C* menggunakan parameter modulus elastisitas tanah *undrained* ( $E_u$ ).

## 2.7. GEO5 2020 - Program *Beams*

Program GEO5 merupakan program berbasis metode *Finite Element Methods* (FEM) dan juga metode analisa empiris tradisional. GEO5 mempunyai banyak fitur untuk menganalisa permasalahan geoteknik salah satunya adalah program *beam*. Program *beam* digunakan untuk menganalisa struktur balok fondasi atau struktur bawah tanah yang diletakkan pada lapisan tanah elastis.

### 2.7.1. Lembar *Project*

Lembar "*Project*" pada GEO5 Program *Beams* digunakan untuk memasukkan data dasar dari proyek dan untuk menentukan pengaturan secara keseluruhan dalam analisis. Lembar kerja ini berisi formulir *input* yang berisi data dasar tentang proyek yang akan dianalisa, misalnya, informasi proyek, deskripsi proyek, tanggal, satuan dasar (*metric*) dan lainya.

Task :	Terraces Henspaulka	Author :	James Baker
Part :	South-facing slope III.	Date :	28.10.2005
Description :	Support walis 2-5m	Project ID :	845/2014
Customer :	Beltrade LTD.	Project number :	11486/2014
System of units	metric		

Gambar 2. 21 Lembar "*Project*" GEO5-*Beam*

(Sumber : GEO5 User's Guide Edition 2020, 2020)

### 2.7.2. Lembar Pengaturan

Pada tampilan lembar "*Setting*" memungkinkan untuk menentukan dasar pengaturan program, seperti standar dan teori analisis, cara analisa struktur dan koefisien-koefisien analisis.

Dalam melakukan analisa, ada tiga cara mendefinisikan parameter lapisan tanah Winkler-Pasternak ( $C1$  dan  $C2$ ) sebagai berikut:

- Perhitungan  $C1$  dan  $C2$

Parameter lapisan tanah Winkler-Pasternak ( $C1$  dan  $C2$ ) dihitung oleh program dari parameter *input* dari profil geologi. Tegangan geostatik dihitung dari tanah yang sudah dideskripsikan.

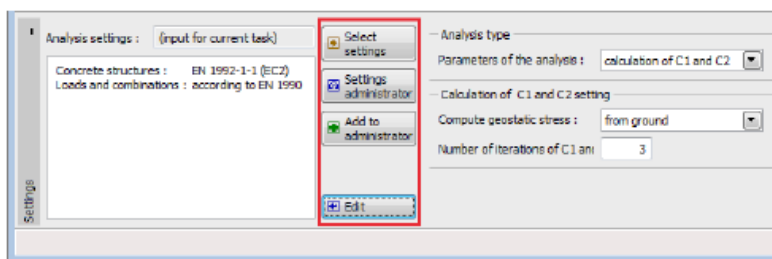
- Input  $C1$  dan  $C2$

Parameter lapisan tanah Winkler-Pasternak ditentukan secara langsung (manual) sebagai parameter masukan.

- Input Parameter Tanah ( $E_{def}$ ,  $\nu$ ,  $h_z$ )

Parameter lapisan tanah Winkler-Pasternak dihitung dari modulus deformasi ( $E_{def}$ ), rasio Poisson ( $\nu$ ) dan kedalaman ( $h_z$ ).

Untuk dapat mendeskripsikan lapisan tanah secara manual, maka opsi pilihan pertama dipilih dan parameter Winkler-Pasternak ( $C1$  dan  $C2$ ) sebagai program keluaran bukan sebagai program masukan.



Gambar 2. 22 Tampilan lembar "Setting" GEO5-Beam

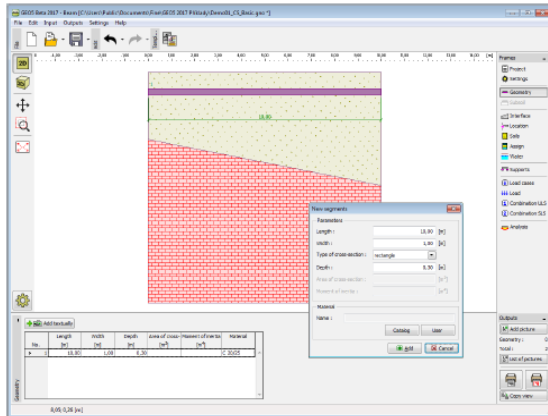
(Sumber : GEO5 User's Guide Edition 2020, 2020)

### 2.7.3. Tahap Pemodelan GEO5-Beam

Tahap-tahap pemodelan dalam GEO5 program Beam sebagai berikut:

#### 1. Pemodelan Geometri Balok

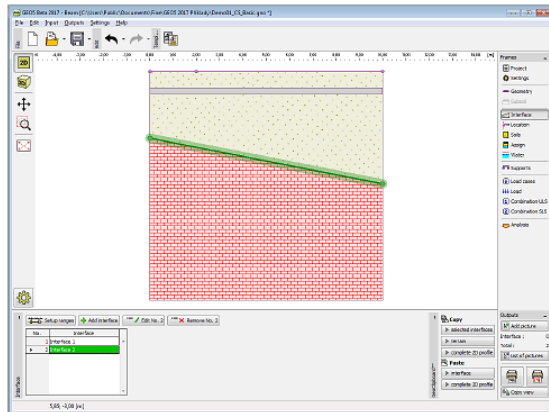
Dalam lembar “*Geometry*” berisi lembar masukan parameter struktur balok. Pada lembar ini dibutuhkan parameter model geometri struktur balok yang akan dimodelkan, seperti panjang balok ( $L$ ), lebar balok ( $B$ ) dan tinggi balok ( $H$ ), untuk pemodelan balok persegi. Program ini memungkinkan untuk mendefinisikan penampang umum balok (luas penampang ( $A$ ) dan momen inersia ( $I$ ) untuk memodelkan balok dengan bentuk lain. Material penampang struktur ditentukan berikutnya, baik menggunakan katalog yang telah disediakan oleh program, atau dengan memasukkan parameter material (Modulus elastisitas material ( $E$ ), modulus geser ( $G$ ), berat sendiri material ( $w$ )).



Gambar 2. 23 Model geometri balok GEO5-Beam  
(Sumber : GEO5 User’s Guide Edition 2020, 2020)

## 2. Pemodelan Tanah (*Interface*)

Pada tampilan lembar “*Interface*” berfungsi untuk mendeskripsikan model lapisan-lapisan tanah atau profil geologi yang akan dianalisa. Untuk memodelkan lapisan-lapisan tanah, dibutuhkan masukan seperti panjang lapisan tanah dan kedalaman lapisan tanah.



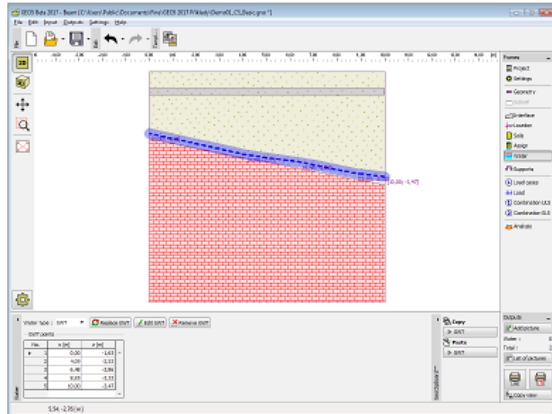
Gambar 2. 24 Model lapisan tanah GEO5-Beam  
(Sumber : GEO5 User's Guide Edition 2020, 2020)

## 3. Pemodelan Lokasi Balok

Pada lembar "*Location*" berfungsi untuk menentukan lokasi struktur balok. Untuk mendeskripsikan letak struktur balok terhadap tanah, baik itu terletak di permukaan tanah maupun terletak pada kedalaman tertentu di bawah lapisan tanah dalam titik koordinat  $x$  dan  $z$ .

## 4. Pemodelan GWT (*Ground Water Table*)

Pada lembar “*Water*” berfungsi untuk memodelkan *Ground Water Table* (GWT) atau Muka Air Tanah (MAT) dengan cara yang sama seperti pemodelan antarmuka (*interface*) lapisan-lapisan tanah.

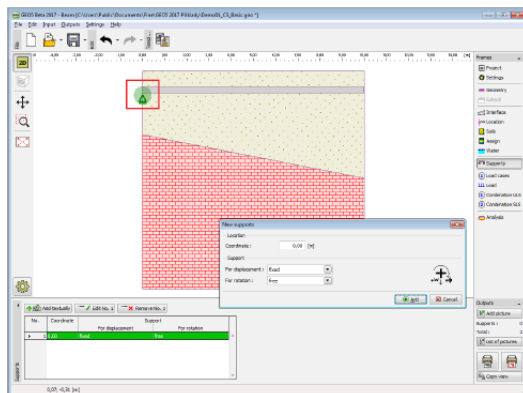


Gambar 2. 25 Model GWT GEO5-Beam

(Sumber : GEO5 User's Guide Edition 2020, 2020)

## 5. Pemodelan Perletakan Balok (*Support*)

Dalam memodelkan jenis dukungan pada struktur (*support*) atau jenis perletakan pada struktur ada empat buah model dukungan pada struktur yaitu *free*, *fixed*, *deformation*, dan *spring*.



Gambar 2. 26 Model "Support" balok GEO5-Beam

(Sumber : GEO5 User's Guide Edition 2020, 2020)

## 6. Penetapan *Load Case*

Dalam mengidentifikasi suatu beban, ada tiga macam *load case* sebagai berikut:

- Beban Permanen ( $G$ )
- Beban Variabel ( $Q$ )
- Beban Accidental ( $A$ )

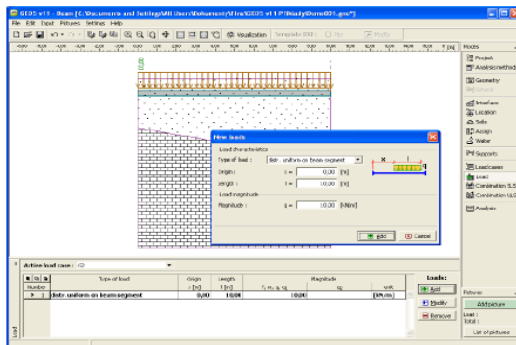
Untuk pembebanan, jenis-jenis beban dalam GEO5 ada dua macam sebagai berikut:

- *Self-weight* (Beban berat sendiri suatu struktur)
- *Force* (Beban gaya dan momen)

Dalam GEO5 disediakan standar pembebanan yang mengacu pada kode beban internasional seperti peraturan pembebanan EN 1992, BS 8110:1997, ACI 318-11, dan lainnya.

## 7. Pemodelan Beban

Pemodelan beban pada GEO5 ada empat jenis metode untuk memodelkan beban pada struktur, yaitu beban gaya terpusat (beban titik), beban momen terpusat, beban terdistribusi merata, dan beban terdistribusi trapezoidal.



Gambar 2. 27 Model beban GEO5-Beam

(Sumber : GEO5 User's Guide Edition 2020, 2020)

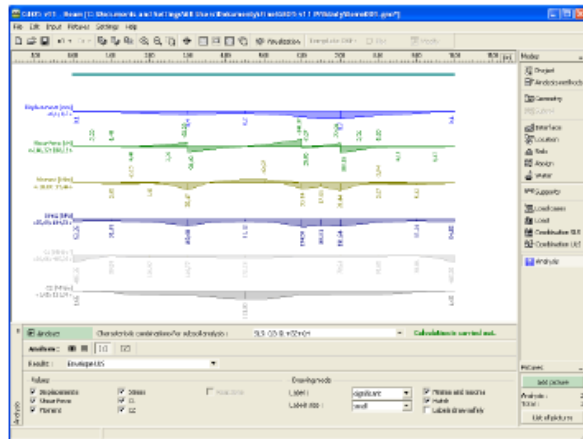


## 8. Pemodelan Kombinasi Beban

Dalam mendefinisikan kombinasi pembebanan, ada dua macam kombinasi yaitu kombinasi SLS (beban layan) dan ULS (beban ultimit atau beban batas).

## 9. Hasil Keluaran GEO5 – Program *Beam*

Setelah semua pemodelan selesai baik itu pemodelan tanah, model struktur, model GWT (*Ground Water Table*), dan model beban, maka analisa dapat dilakukan. Hasil analisa berupa *displacement*, *shear force*, *bending moment*, dan lainnya sesuai parameter analisa masukan.



Gambar 2. 28 *Output* analisa model GEO5-*Beam*  
(Sumber : GEO5 User's Guide Edition 2020, 2020)

### 2.7.4. Parameter Model Tanah GEO5 - Beam

Untuk memodelkan material tanah pada program GEO5, dibutuhkan parameter-parameter dasar tanah sebagai berikut:

1. Berat Volume Tanah ( $\gamma$ )
2. Rasio Poisson ( $\nu$ )
3. Modulus Young ( $E_{def}$ )

#### 4. Koefisien Kekuatan Struktural ( $m$ )

Koefisien kekuatan struktural ( $m$ ) merupakan koefisien kekuatan struktural tanah yang mewakili ketahanan tanah terhadap deformasi akibat beban yang bekerja. Untuk nilai koefisien kekuatan struktural ( $m$ ) dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Nilai Koefisien  $m$  (GEO5)

Type of fundamental soil	$m$
Very compressible fine soils class F1 -F8 - with deformation modulus $E_{def} < 4 \text{ MPa}$ - nonoverconsolidated - 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

Pada program GEO5, nilai koefisien kekuatan struktural tanah (koefisien  $m$ ) untuk tanah lempung diklasifikasikan ke dalam kelas F1 – F8 ( $m = 0.2$ ) dan untuk tanah pasir dibagi menjadi dua kondisi yaitu kondisi di atas muka air tanah ( $m = 0.3$ ) dan kondisi di bawah muka air tanah ( $m = 0.2$ ).

## 2.8. Pertimbangan Perancangan Terowongan

Berdasarkan SNI 8460 Tahun 2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik, kondisi-kondisi perencanaan konstruksi terowongan yang harus dipertimbangkan sebagai berikut:

1. Sifat-sifat media yang dilewati terowongan, yang meliputi kekuatan, karakteristik deformasi, stabilitas muka bidang terowongan (*face stability*), dan aliran air.
2. Dampak pada lingkungan sekitarnya, seperti suara bising dan getaran, gangguan lalu lintas, penurunan muka air di sungai dan air tanah, perubahan dan polusi pada kualitas air, penurunan permukaan tanah, pengaruh pada flora dan fauna, serta pengaruh lainnya.
3. Efek akibat konstruksi struktur berdekatan setelah terowongan dibangun, area dan tingkat dampak harus dikaji dan dipertimbangkan dalam desain perkuatan dan dinding terowongan.
4. Dampak dari gempa, tekanan tanah, tekanan air dan faktor-faktor lain. Hal-hal utama yang perlu dipertimbangkan di antaranya tebal lapisan penutup (*overburden*), topografi, geologi, kondisi lokasi, lingkungan sekitar, dan tujuan penggunaan terowongan.

Berdasarkan *Japan Society Civil Engineers* (JSCE) tahun 2016, dalam perencanaan kedalaman terowongan perisai (*shield tunnel*) harus memerhatikan beberapa hal sebagai berikut:

1. *Overburden* adalah jarak antara permukaan tanah pada *ground level* dengan bagian atas terowongan (*crown*).
2. Minimal kedalaman *overburden* adalah antara  $1 D - 1.5 D$  dengan  $D$  adalah diameter luar dari terowongan.
3. Kedalaman maksimum pengeboran terowongan yaitu pada kedalaman 200 m (tekanan air 0.69 Mpa). Pada umumnya, pengeboran terowongan pada tanah berpasir dan tanah yang tidak terkonsolidasi yaitu kurang dari 100 m.

Menurut *International Tunnelling Association* (2000) tentang desain konstruksi terowongan pada tanah lunak dengan menggunakan metode *shield tunneling* harus memerhatikan karakteristik fisik tanah sebagai berikut:

$$N \leq 50 \quad (2.16)$$

$$E = 2.5 \times N \leq 125 \quad (2.17)$$

$$q_u = \frac{N}{80} \leq 0.6 \quad (2.18)$$

dengan,

$N$  = Nilai *standard penetration test* (blow/ft)

$E$  = Modulus elastisitas tanah (MPa)

$q_u$  = *Unconfined compressive strength* (MPa)

## 2.9. Desain Beban Terowongan

### 2.9.1. Beban Tanah

Beban tanah yang terjadi pada terowongan yaitu tekanan tanah vertikal dan tekanan horizontal, penentuan beban tanah tergantung pada kondisi tanah, tekanan air tanah dapat diberlakukan menurut satu dari dua kondisi yaitu:

- a) Tekanan air tanah bekerja secara terpisah dengan tekanan tanah (metode tekanan tanah efektif)
- b) Tekanan air tanah termasuk dalam tekanan tanah (metode tekanan tanah total).

### 2.9.2. Tekanan Air

Tinggi muka air tanah hendaknya ditentukan dengan memerhatikan bahwa desain selalu mencapai suatu keamanan walaupun dengan adanya perubahan tinggi muka air yang terjadi selama dan setelah pelaksanaan konstruksi terowongan.

### 2.9.3. Beban Mati (Berat Sendiri *Lining*)

Beban mati merupakan berat sendiri *lining* (dinding terowongan) perisai. Untuk menghitung berat dari dinding terowongan (*lining*) ditunjukkan pada Persamaan 2.19.

$$W = \frac{W_{tot}}{2\pi R} \quad (2.19)$$

dengan,

$w$  = Berat segmen *lining* terowongan (kN/m)

$W_{tot}$  = Berat total *lining* terowongan (kN)

$R$  = Jari-jari luar terowongan (m)

### 2.9.4. Beban Permukaan

Untuk kasus terowongan di Indonesia, perhitungan beban permukaan untuk terowongan mengacu pada peraturan desain pembebanan sesuai struktur yang ada di permukaan, seperti struktur jalan dan jembatan mengacu pada SNI 1725 Tahun 2016 tentang Pembebanan Jembatan dan Jalan, struktur bangunan gedung mengacu pada peraturan SNI 1727 Tahun 2013 tentang Pembebanan Minimum Bangunan Gedung, dan lainnya. Menurut persyaratan dari *Land Transport and Authority* (LTA) Singapura tahun 2019 tentang *Civil Design Criteria for Road and Rail Transit System* bahwa desain minimum beban permukaan (*surcharge loads*) pada *ground level* ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Beban Permukaan Minimum (LTA, 2019)

Jenis Bangunan	Beban Permukaan Minimum (kN/m <sup>2</sup> )
Terowongan Bor	75
Dinding Penahan Tanah ( <i>Temporary Condition</i> )	20
Dinding Penahan Tanah ( <i>Permanent Conditions</i> )	25
Struktur lain	25

### 2.9.5. Beban Gempa

Desain beban gempa dibagi menjadi dua, yaitu:

- a) *Operating Design Earthquake* (ODE) yaitu beban gempa dengan periode ulang gempa 100 tahun.
- b) *Maximum Design Earthquake* (MDE) yaitu beban gempa dengan periode ulang gempa 1000 tahun.

Untuk persyaratan teknis perancangan kegempaan untuk terowongan mengacu pada SNI 8460 Tahun 2017 Pasal 12.2.1 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik - Kegempaan untuk masing-masing jenis bangunan ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Persyaratan Gempa untuk Terowongan (SNI 8460:2017)

Peruntukan	Umur rencana (tahun)	Probabilitas terlampai (%)	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</i> (SEE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tidak terjadi aliran air yang tidak terkendali</li> <li>• Deformasi tidak melebihi 0,5 dari tinggi jagaan</li> <li>• Deformasi pada filter tidak boleh melebihi 0,5 tebal filter</li> <li>• <i>Spillway</i> tetap berfungsi setelah terjadi gempa rencana</li> </ul> Kerusakan minor setelah terjadi gempa rencana	ICOLD No 148, 2016,
	100	50	145 <i>Operating Basis Earthquake</i> (OBE)		
Bangunan pelengkap bendungan	50	2	2500	-	
Terowongan	100	10	1.000 tahun		

Perencanaan beban gempa untuk struktur terowongan adalah beban gempa dengan periode ulang 1000 tahun (MDE) dengan umur rencana bangunan terowongan 100 tahun.

Perhitungan pembebanan gempa untuk terowongan disederhanakan dengan perhitungan pembebanan gempa statis (*pseudo-static*) yang ditunjukkan pada Persamaan 2.20.

$$Q_E = K_h \times Q_o \quad (2.20)$$

dengan,

$Q_E$  = Beban akibat gempa (kN/m<sup>2</sup>),

$K_h$  = Koefisien percepatan gempa horizontal,

$Q_o$  = Beban luar yang bekerja (kN/m<sup>2</sup>).

## 2.10. Perilaku Teknis Terowongan

### 2.10.1. Distribusi Tegangan di Sekitar Terowongan

Akibat dari adanya pembebanan pada *lining* terowongan menyebabkan pengecilan diameter vertikal pada *crown* dan invert, serta perbesaran diameter horizontal pada *spring line*. Keadaan tersebut menimbulkan tekanan pasif pada tanah di sekitar *lining* akibat adanya perlawanan untuk meminimalisir deformasi ke arah luar (perbesaran diameter horizontal). Akibatnya tercipta kondisi dimana distribusi tegangan *non-uniform* pada seluruh permukaan *lining* yang mengakibatkan peningkatan momen lentur pada *lining* terowongan.

Kuesel (1969) menyatakan bahwa ada dua sifat fisik dari *lining* yang sangat mempengaruhi terbentuknya tekanan tanah lateral pasif, yaitu kekakuan aksial ( $EA$ ) dan kekakuan lentur ( $EI$ ). Kekakuan aksial jauh lebih penting pada sebuah *lining* dibandingkan kekakuan lentur, dimana dengan meningkatnya kekakuan aksial menyebabkan peningkatan efisiensi *lining* dalam menyalurkan gaya kompresif. Untuk kekakuan lentur, apabila suatu *lining* memiliki nilai kekakuan lentur tak hingga, maka *lining* tidak akan mengalami deformasi sama sekali, sedangkan tekanan tanah lateral pasif hanya terbentuk apabila terjadi deformasi pada *lining*.

### 2.10.2. Momen Inersia *Lining*

Dalam kasus terowongan bor, *lining* dibagi dalam beberapa segmen beton *precast* untuk memudahkan konstruksi dan pengangkutan material *lining*. Hal ini menyebabkan struktur terowongan menjadi tidak monolit, sehingga berdampak pada kekakuan *lining*. Muir Wood (1975) memberikan solusi untuk momen inersia efektif yang memperhitungkan reduksi kekakuan *lining* pada Persamaan 2.21.

$$I_e = I_j + I_s \left(\frac{4}{n}\right)^2 \quad (2.21)$$

dengan,

$I_e$  = Momen inersia efektif ( $m^4$ ),

$I_j$  = Momen inersia pada *lining joint* ( $m^4$ ),

$I_s$  = Momen inersia awal ( $m^4$ ),

$n$  = Jumlah segmen *lining* (diluar segmen kunci).

### 2.11. Pengaruh Sekitar Daerah Konstruksi Terowongan

Apabila penggalian terowongan perisai direncanakan di dekat bangunan-bangunan atau struktur-struktur yang telah ada (bangunan eksiting), maka perlu dilakukan tindakan-tindakan perlindungan. Penilaian risiko harus dilakukan pada tahap perancangan dengan persyaratan pengaruh pada bangunan sekitar yang terdiri atas kemiringan bangunan maksimum dan penurunan bangunan maksimum mengacu pada persyaratan SNI 8460 Tahun 2017 Pasal 8.3.2.18 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik untuk bangunan terowongan yang ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Untuk ketegori risiko 1 dan 2, konstruksi terowongan tidak terlalu berdampak pada bangunan sekitar. Sedangkan kategori risiko 3 dan 4, maka perlu dilakukan metode tambahan untuk mengurangi dampak yang mungkin terjadi pada bangunan sekitar.



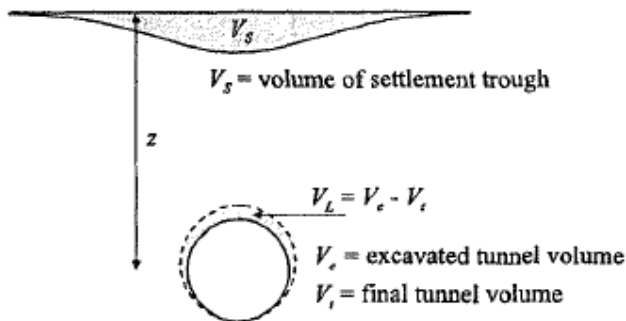
Tabel 2. 4 Pengaruh Sekitar Daerah Kontruksi Terowongan  
(SNI 8460:2017)

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

## 2.12. Penurunan Tanah

Penurunan tanah diakibatkan oleh adanya kehilangan tanah (*ground loss*) yang terjadi akibat proses penggalian terowongan perisai (*shield tunneling*). Menurut Peck (1969) kehilangan volume tanah (*ground loss*) akibat proses pengeboran terowongan dapat dikaitkan dengan kehilangan volume penurunan tanah yang terjadi pada permukaan.

Menurut *British Tunnelling Society* dan *Institution of Civil Engineers* (2004) nilai dari kehilangan volume tanah akibat proses pengeboran terowongan (*volume loss*) tergantung pada kondisi tanah, metode penggalian terowongan dan jenis material dari *lining* terowongan. Untuk terowongan pada tanah lunak dengan *lining* terowongan terbuat dari beton bertulang, nilai *volume loss* kurang dari 1%. Untuk metode penggalian terowongan perisai dengan menggunakan TBM tipe *Earth Pressure Balanced Shield* (EPB-S) nilai *volume loss* dapat direduksi hingga sebesar 0,5%.



Gambar 2. 29 Penurunan tanah akibat *volume loss*

(Sumber : Tunnel Lining Design Guide, 2004)

Untuk terowongan pada tanah lunak, biasanya penurunan permukaan tanah sama dengan volume tanah yang hilang. Namun hubungan antara volume tanah yang hilang dan volume penurunan tanah permukaan merupakan hubungan yang sangat kompleks. Perubahan volume tanah karena pemampatan tanah biasanya tidak diperkirakan atau tidak dimasukkan dalam perhitungan *volume loss*. Kehilangan tanah akan menghasilkan kurva penurunan di permukaan tanah, dimana dapat berdampak pada perilaku penurunan pada bangunan eksisting yang ada pada daerah sekitar konstruksi terowongan. Data empiris menunjukkan bentuk kurva penurunan biasanya mendekati bentuk kurva Gaussian terbalik.

Perhitungan prediksi penurunan tanah akibat konstruksi terowongan mengacu pada SNI 8460 Tahun 2017 Pasal 8.3.2.19 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik untuk bangunan terowongan ditunjukkan pada Persamaan 2.22.

$$S = S_{max} \times \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (2.22)$$

dengan,

$w$  = Penurunan pada jarak  $x$  dari *center line* terowongan (m),

$S_{max}$  = Penurunan maksimum (m),

$i$  = Jarak ke titik belok pada kurva penurunan (m).

dengan  $i$  dihitung pada Persamaan 2.23 sebagai berikut:

$$i = KZ_0 \quad (2.23)$$

dengan,

$K$  = Parameter penurunan tanah, 0.5 (lempung) dan 0.25 (pasir),

$Z_0$  = Kedalaman dari permukaan tanah ke titik *crown* (m).

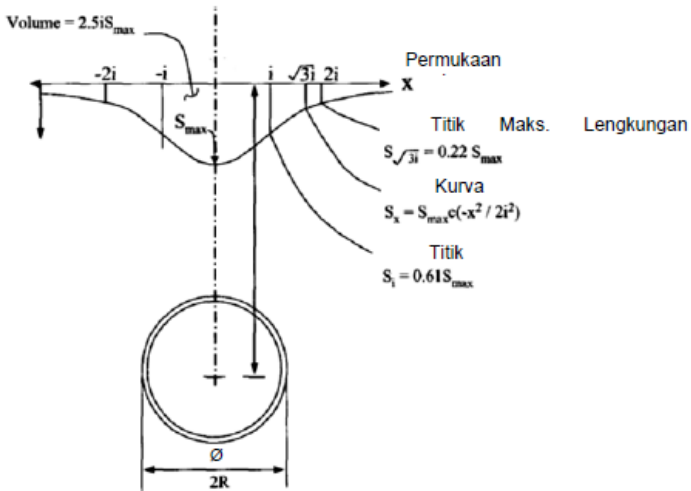
dengan penurunan maksimum ( $S_{max}$ ) yang terjadi dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.24 sebagai berikut:

$$S_{max} = \frac{0.0031 V_L D^2}{i} \quad (2.24)$$

dengan,

$V_L$  = Kehilangan tanah saat penggalian (%),

$D$  = Diameter luar terowongan (m).



Gambar 2. 30 Prediksi penurunan di atas terowongan

(Sumber : SNI 8460 : 2017)

### 2.13. Stabilitas Terowongan

Pada terowongan yang sangat dekat dengan permukaan tanah akan cenderung terjadi gaya tekan ke atas oleh air akibat tekanan hidrostatis, sehingga dapat menyebabkan *uplift* pada terowongan. Faktor aman terhadap *uplift* ini didapatkan dengan membandingkan rasio antara besarnya gaya angkat atau *uplift* ( $U$ ) dengan gaya yang menahan ( $R$ ).

Dalam persyaratan LTA Singapura tahun 2019 tentang *Civil Design Criteria-Bored Tunnel* pada Pasal 7.5.4.1 menyarankan SF tidak lebih kecil dari 1,2. Persyaratan ini juga dipakai dalam perencanaan stabilitas terowongan pada proyek terowongan bor MRT Jakarta. Dengan persamaan sebagai berikut:

$$SF = \frac{R}{U} \geq 1,2 \quad (2.25)$$

$$U = \gamma_w \frac{\pi D^2}{4} - W \quad (2.26)$$

$$R = \gamma' D \left( h_w + \frac{D}{2} - \frac{\pi D}{8} \right) + \gamma_d D (H - h_w) + 2S \left( H + \frac{D}{2} \right) \quad (2.27)$$

dengan,

$D$  = Diameter luar terowongan (m),

$W$  = Berat total terowongan (kN/m),

$S$  = Rata-rata kuat geser tanah dari titik a-a' (kN/m<sup>2</sup>)

$\gamma'$  = Berat volume efektif tanah (kN/m<sup>3</sup>),

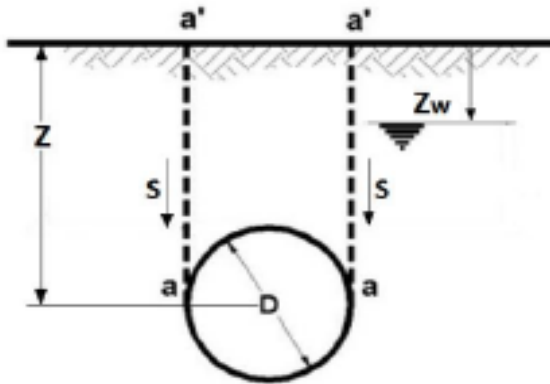
$\gamma_d$  = Berat volume kering tanah (kN/m<sup>3</sup>),

$\gamma_w$  = Berat volume air (kN/m<sup>3</sup>),

$\gamma_w$  = Berat volume air (kN/m<sup>3</sup>),

$H$  = Kedalaman dari titik tengah terowongan ke permukaan tanah (m),

$H_w$  = Kedalaman muka air tanah ke permukaan tanah (m).



Gambar 2. 31 Stabilitas terowongan terhadap gaya *uplift*

(Sumber : Civil Design Criteria for Road and Rail Transit System, 2019)

## 2.14. Persyaratan Deformasi Terowongan

Persyaratan deformasi terowongan arah melintang mengacu pada persyaratan yang ditetapkan oleh LTA Singapura tahun 2019

tentang *Civil Design Criteria-Bored Tunnel* pada Pasal 7.5.6 bahwa lendutan maksimum yang terjadi pada struktur terowongan tidak boleh melebihi 25 mm.

$$\Delta_{maks} \leq 25 \text{ mm} \quad (2.28)$$

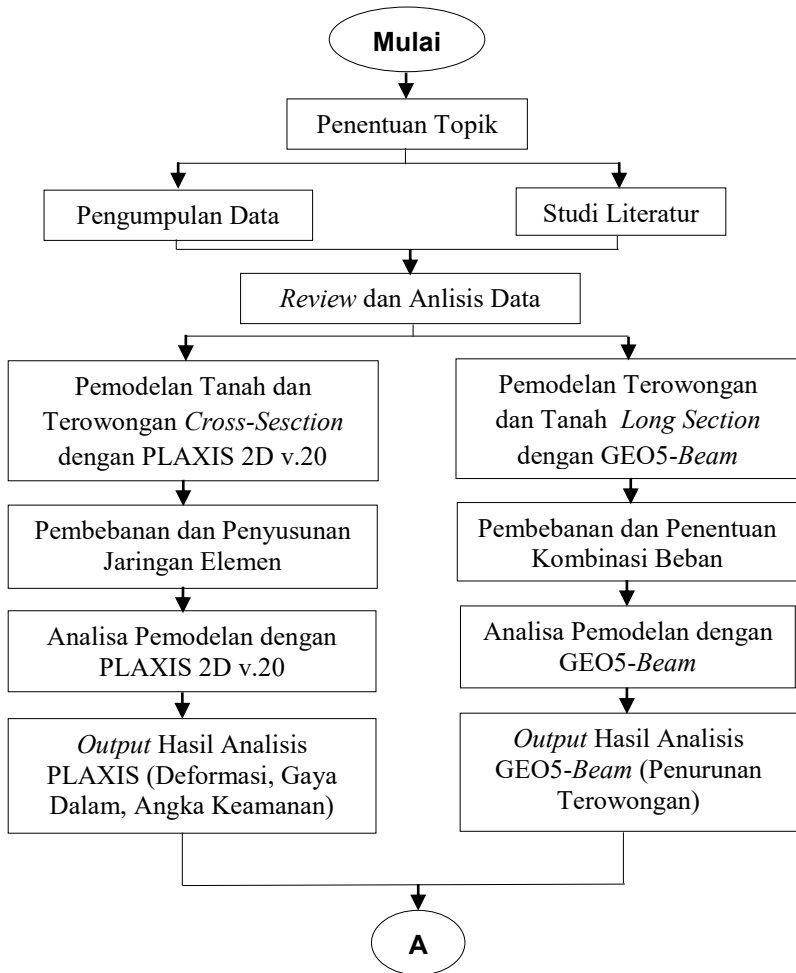
### **2.15. Kriteria Penurunan Terowongan**

Persyaratan kemiringan (*slope*) yang terjadi akibat adanya penurunan terowongan pada arah memanjang mengacu pada standar yang ditetapkan oleh LTA Singapura tahun 2019 tentang *Civil Design Criteria-Bored Tunnel* pada Pasal 7.5.5.2 bahwa kemiringan (*slope*) pada terowongan arah memanjang maksimum sebesar 1(V) hingga 2000 (H) atau 1 : 2000.

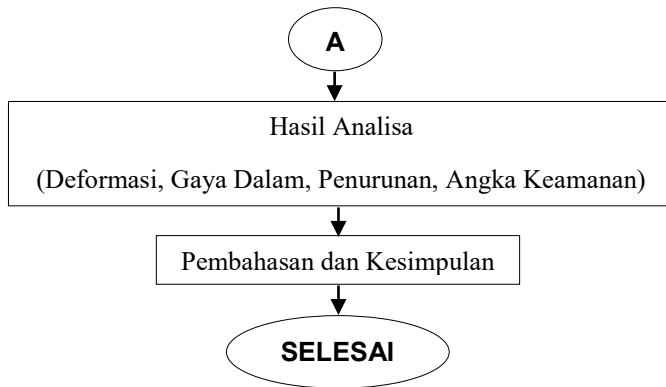
*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB III METODOLOGI

## 3.1. Flowchart





Gambar 3. 1 *Flowchart*

Prosedur analisis seperti yang ditampilkan pada *flowchart* merupakan prosedur untuk melakukan analisa tentang bahasan atau topik yang dibahas dalam tugas akhir ini. Prosedur analisis sebagai berikut:

1. Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam tugas akhir ini merupakan data sekunder yang didapat dari pihak *owner* (PT. MRT Jakarta) yang terdiri dari data interpretasi geoteknik (data-data tanah), data struktur *lining* terowongan, data gempa dan data lainnya.

2. Studi Literatur

Data-data yang diperoleh perlu dianalisa kembali dengan melakukan studi literatur mengenai data-data tersebut. Studi literatur juga dilakukan mengenai bahasan-bahasan yang akan dianalisa dalam tugas akhir ini agar analisa dalam tugas akhir ini sesuai dengan topik yang telah ditentukan.

3. *Review* dan Pengolahan Data

Data-data dari pihak proyek perlu divalidasi agar analisa

yang nantinya akan dibahas dapat lebih sesuai dan lebih akurat. Data yang sudah didapat kemudian diolah sesuai dengan data yang diperlukan untuk analisa dalam tugas akhir ini, seperti data parameter-parameter tanah, data parameter struktur *lining* terowongan, data bangunan eksisting (beban permukaan), dan data lainnya.

4. Pemodelan terowongan pada arah melintang (*cross section*) dengan program Plaxis 2D v.20

Pemodelan terowongan pada arah melintang (*cross section*) dimodelkan dengan program Plaxis 2D v.20. Secara garis besar, tahapan dalam pemodelan dengan program Plaxis 2D v.20 sebagai berikut:

- Pemodelan geometri tanah dan material tanah.
- Pemodelan geometri struktur dan material struktur terowongan.
- Pemodelan pembebanan.
- Penyusunan jaringan elemen dan penentuan kondisi batas.
- Perhitungan tekanan air pori.
- Penetapan kondisi awal (Prosedur  $K_0$ ).
- Tahap perhitungan (*Construction Stage*).
- Hasil analisa model terowongan (*Output*)

5. Pemodelan terowongan pada arah memanjang (*long section*) dengan program GEO5 – *Beam*

Pemodelan terowongan pada arah memanjang (*long section*) dimodelkan dengan program GEO5 -Program *Beam*. Secara garis besar, tahapan pemodelan terowongan dengan program GEO5 sebagai berikut:

- Pemodelan geometri struktur terowongan arah memanjang (*longitudinal section*).

- *Input* data properti terowongan.
- Pemodelan geometri lapisan-lapisan tanah.
- *Input* data material tanah (Parameter Tanah).
- Pemodelan kedalaman muka air tanah (MAT).
- Penetapan *load case*.
- Pemodelan pembebanan.
- Penetapan kombinasi pembebanan.
- Tahap analisa model terowongan.
- Hasil analisa pemodelan terowongan (*Output*).

6. Hasil analisis (*output*) dari Plaxis 2D dan GEO5 - *Beam*

Hasil analisis pemodelan terowongan arah melintang (*cross section*) dengan program Plaxis 2D v.20 berupa deformasi yang terjadi pada terowongan, penurunan tanah akibat konstruksi terowongan, gaya-gaya dalam yang terjadi pada struktur terowongan, dan angka aman (SF). Hasil analisis pemodelan terowongan arah memanjang (*longitudinal section*) dengan program GEO5 - *Beam* berupa penurunan arah memanjang yang terjadi pada struktur terowongan.

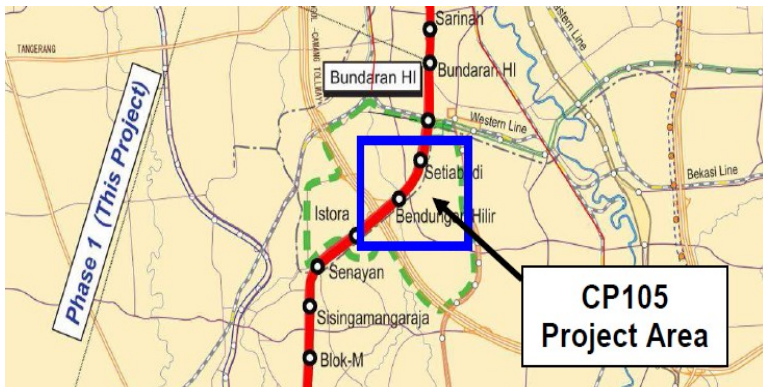
7. Pembahasan dan hasil analisis terowongan CP 105-3

Berdasarkan *output* yang akan diperoleh dari pemodelan terowongan arah melintang dengan program Plaxis 2D akan dianalisa pola deformasi terowongan, gaya-gaya dalam yang terjadi pada terowongan, penurunan tanah yang terjadi akibat konstruksi terowongan serta stabilitas yang terjadi pada terowongan. Berdasarkan *output* yang akan diperoleh dari pemodelan terowongan arah memanjang dengan program GEO5 - *Beam*, akan dianalisa penurunan yang terjadi pada arah memanjang terowongan.

### 3.2. Informasi Umum Proyek

#### 3.2.1. Lokasi Proyek Terowongan CP 105

Lokasi proyek Terowongan MRT Jakarta fase 1 pada *Contract Package (CP)* 105 dari STA 11 + 043 sampai dengan STA 12 + 900 dengan panjang total *section* 1.497 m (1,5 km) berada di antara Stasiun Istora sampai dengan Stasiun Setiabudi.



Gambar 3. 2 Lokasi proyek terowongan CP-105

(Sumber : Data Proyek PT. MRT Jakarta)

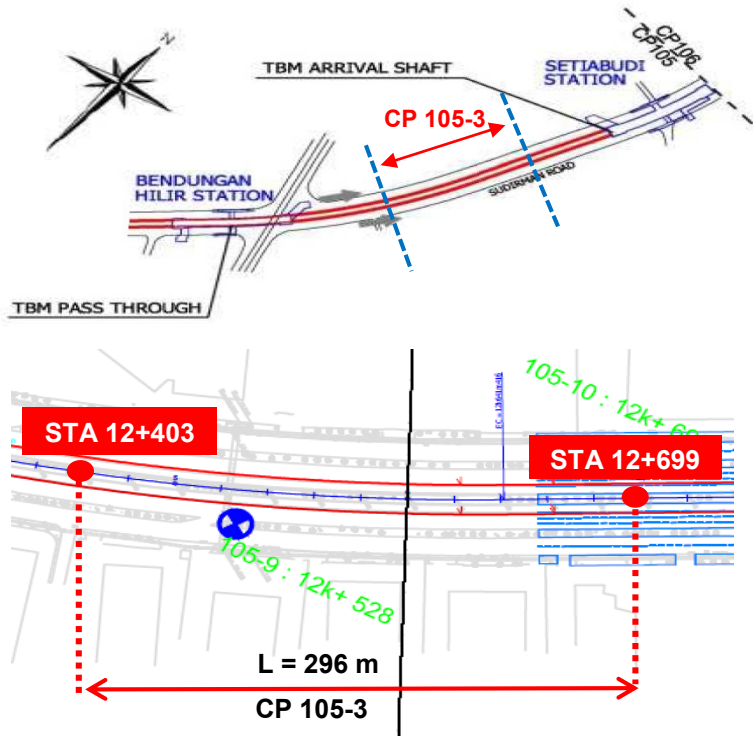
Proyek terowongan MRT Jakarta CP 105 terdiri dari empat *section* yaitu:

1. Terowongan CP 105-1 (STA 11+043 – STA 12+090)
2. Terowongan CP 105-2 (STA 12+090 – STA 12+403)
3. Terowongan CP 105-3 (STA 12+403 – STA 12+699)
4. Terowongan CP 105-4 (STA 12+699 – STA 12+900)

#### 3.2.2. Lokasi Terowongan *Section* CP 105-3

Lokasi proyek terowongan MRT Jakarta fase 1 *section* CP 105-3 dari STA 12 + 403 sampai dengan STA 12 + 699 dengan

panjang *section* sebesar 296 meter yang berada di antara Stasiun Bendungan Hilir dan Stasiun Setiabudi.



Gambar 3. 3 Lokasi terowongan *section* CP 105-3

(Sumber : Data Proyek PT. MRT Jakarta)

### 3.3. Data Interpretasi Geoteknik

Data interpretasi geoteknik adalah data-data yang memuat informasi mengenai *index* dan *engineering properties* dari lapisan tanah pada konstruksi terowongan MRT Jakarta pada *section* CP 105-3. Data ini juga memuat informasi tentang kedalaman Muka Air Tanah (MAT).

Dalam pengumpulan data interpretasi geoteknik tersebut, dilakukan berbagai macam pengujian oleh pihak proyek yang terbagi atas dua garis besar, yaitu pengujian *in-situ* dan pengujian laboratorium. Rangkaian pengujian yang telah dilaksanakan oleh pihak proyek tersebut ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Rangkaian Pengujian *Soil Properties*

Soil Strength	Soil Stiffness	Permeability	Groundwater
Standard Penetration Test	Pressuremeter Test	Falling Head	Water Level Monitoring
Soil Classification	Soil Strength	Consolidation	Chemical Analysis
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moisture Content</li> <li>• Bulk and Dry Density</li> <li>• Particle Density</li> <li>• Particle Size Distribution</li> <li>• Atterberg Limits</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unconsolidated Undrained Triaxial Test</li> <li>• Unconsolidated Undrained Triaxial with PWP</li> <li>• Consolidated Undrained Triaxial Test</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oedometer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH Value (Soil)</li> <li>• Soluble Sulphate Content (SO<sub>3</sub>) [Soil]</li> <li>• Soluble Chloride Content (Cl<sup>-</sup>) [Soil]</li> <li>• Organic Content (Soil)</li> </ul>

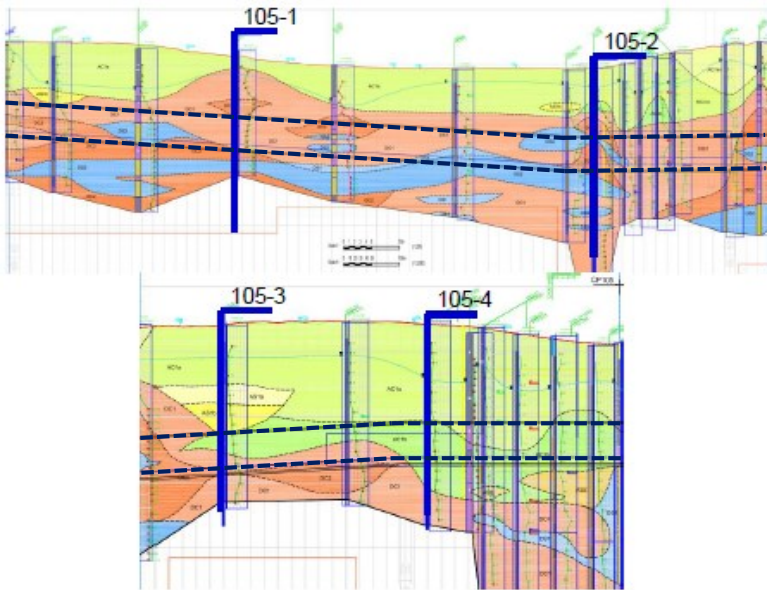
Tabel 3. 2 General Stratigrafi pada CP 105

Geologi		Klasifikasi	Kosistensi
<i>Upper Strata</i>	Lempung Aluvial	AC1ax	Lempung Sangat Lunak
		AC1a	Lempung Lunak
		AC1b	Lempung Kaku
	Pasir Aluvial	AS1a	Pasir Lepas
		AS1b	Pasir Medium
<i>Lower Strata</i>	Lempung Diluvial	DC1	Lempung Sangat Kaku
		DC2	Lempung Keras
	Pasir Diluvial	DS1	Pasir Padat
		DS2	Pasir Sangat Padat

Pada Tabel 3.2 menunjukkan stratigrafi secara general pada proyek terowongan MRT Jakarta CP 105. Pada tabel tersebut menunjukkan jenis-jenis tanah yang terdapat pada seluruh *section-section* yang ada pada terowongan CP 105. Pada CP 105, jenis-jenis tanah bervariasi dimana terdapat tanah lempung (kode AC dan DC) dan juga terdapat tanah pasir (kode AS dan DS).

### 3.3.1. Desain *Section* Terowongan CP 105-3

Alinyemen memanjang terowongan MRT Jakarta CP 105 terletak pada tanah lunak dengan desain lokasi masing-masing *section* terowongan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4.



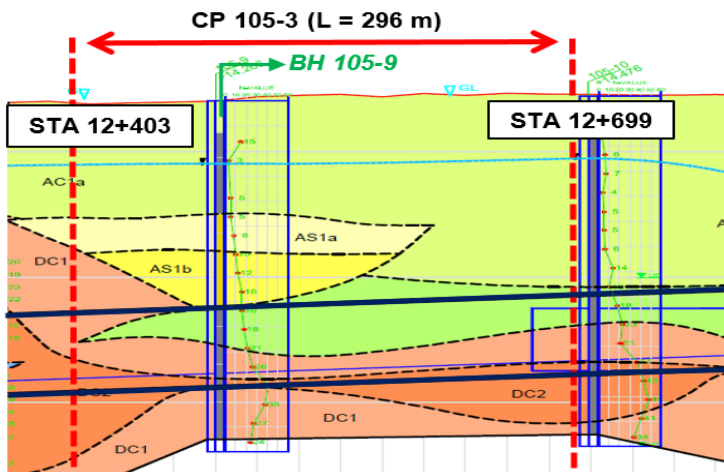
Gambar 3. 4 Desain lokasi *section* terowongan CP 105  
(Sumber : Data Proyek PT. MRT Jakarta)

Tabel 3. 3 Desain *Section* Terowongan CP 105

Design Section	Chainage (m)		Design Chainage (m)	Overburden Depth (m)	Ref. Borehole	Soil Type at Tunnel Face
	From	To				
105-1	11+043	12+090	11+430	11.7	AU-10	DC2, DC1
105-2	12+090	12+403	12+090	11.6	U-140	DC2, DS2
105-3	12+403	12+699	12+528	16.1	105-9	AS1b, AC1b, DC1
105-4	12+699	12+900	12+819	15.3	105-11	AC1b

Referensi data *borehole* yang digunakan untuk masing-masing *section* terowongan CP 105 (Tabel 3.3) berdasarkan desain dari proyek dimana desain tersebut mempertimbangkan variasi jenis-jenis tanah dari hasil uji *borelog* pada masing-masing titik *borehole* yang ada pada seluruh *section* CP 105. Pada terowongan *section* CP 105-3 yang akan digunakan dalam analisa proyek akhir ini, menggunakan referensi data *borehole* 105-9 (BH 105-9) dari hasil uji *borelog* yang telah dilakukan oleh pihak proyek yang terletak pada STA 12+528.

Pada terowongan *section* CP 105-3 terletak pada tanah lunak dengan jenis tanah yang ada pada muka terowongan (*tunnel face*) atau jenis tanah pada bagian dalam terowongan yang akan digali yaitu tanah pasir (AS1b) dan tanah lempung (AC1b dan DC1) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Profil geologi terowongan *section* CP 105-3

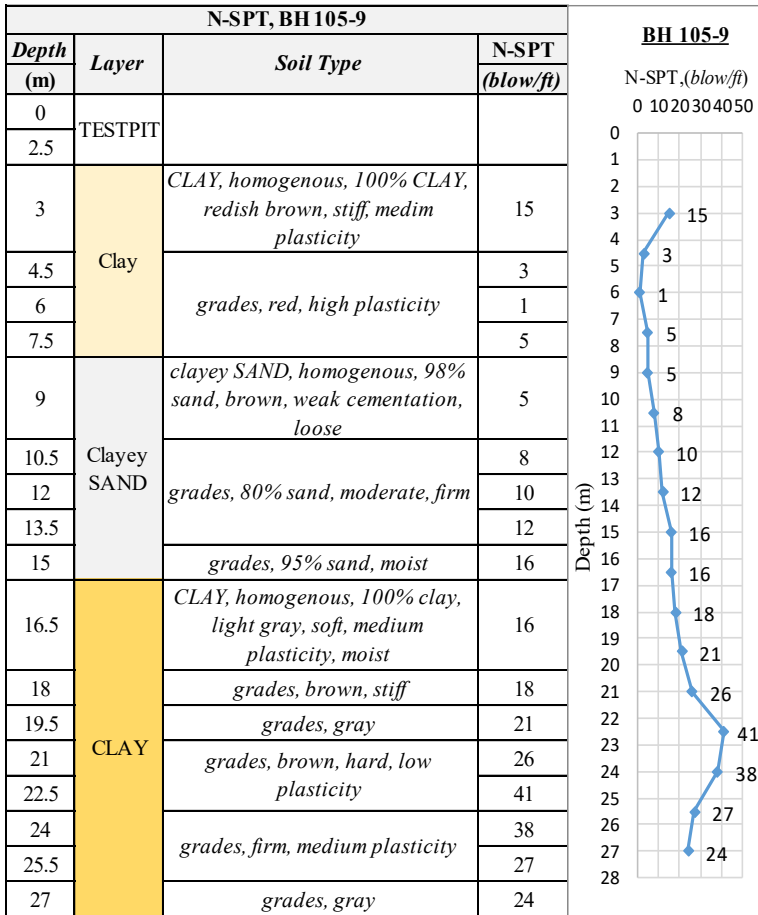
(Sumber : Data Proyek PT. MRT Jakarta)

Pertimbangan penggunaan data *borehole* 105-9 pada desain terowongan *section* CP 105-3 dikarenakan pada data tersebut menunjukkan adanya jenis tanah pasir, dimana tanah pasir kestabilanya lebih rendah dibandingkan dengan jenis tanah



lempung. Pada prinsipnya, suatu desain konstruksi terowongan harus mempertimbangkan kemungkinan terburuk dari kondisi tanahnya dan memerhatikan bahwa desain selalu mencapai suatu keamanan, oleh karena itu pada terowongan *section* CP 105-3 digunakan data *borehole* 105-9 karena terdapat jenis tanah pasir.

### 3.3.2. Data Borelog Terowongan CP 105-3 (BH 105-9)

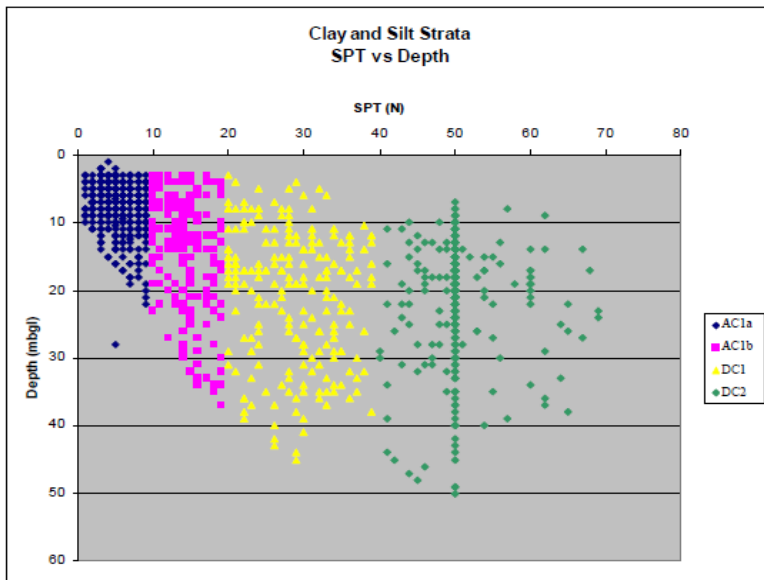


Gambar 3. 6 Data borelog BH 105-9

Pada Gambar 3.6 menunjukkan nilai N-SPT pada *borelog* BH 105-9 untuk desain terowongan *section* CP 105-3. Interval pengeboran BH 105-9 pada setiap kedalaman 1,5 m dan pengeboran dihentikan pada kedalaman 27 m. Kondisi lapisan-lapisan tanah cukup bervariasi seperti lapisan lempung lunak hingga kaku dan lapisan pasir lepas hingga pasir medium.

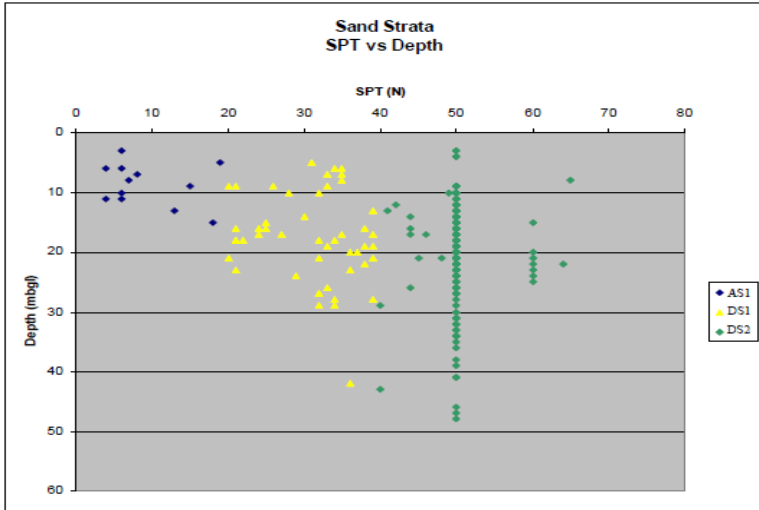
### 3.3.3. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Nilai N-SPT

Klasifikasi tanah berdasarkan nilai N-SPT ( $N_{desain}$ ) mengacu pada data hasil uji lapangan dari masing-masing *borehole* pada CP 105 yang dilakukan oleh pihak proyek. Untuk data hasil uji tanah lempung ditunjukkan pada Gambar 3.7 dan untuk tanah pasir pada Gambar 3.8.



Gambar 3. 7 Data N-SPT tanah lempung pada CP 105

(Sumber : Data Proyek PT. MRT Jakarta)



Gambar 3. 8 Data N-SPT tanah pasir pada CP 105

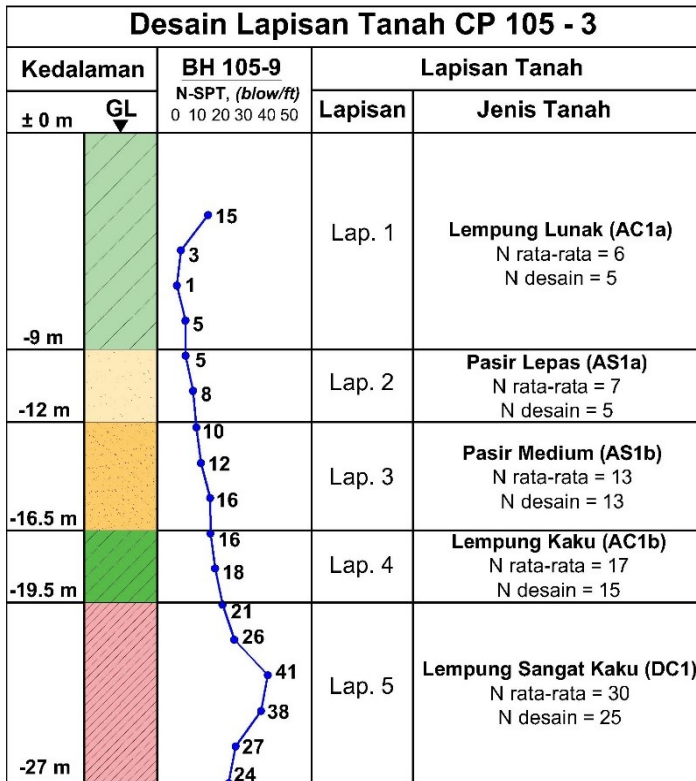
(Sumber : Data Proyek PT. MRT Jakarta)

Tabel 3. 4 Nilai N-SPT Desain pada CP 105

Klasifikasi Tanah			N	N Desain
Jenis	Kode Tanah	Deskripsi		
Lempung atau Lanau	AC1ax	Lempung/Lanau Sangat Lunak	1 - 4	2
	AC1a	Lempung/Lanau Lunak	5 - 9	5
	AC1b	Lempung/Lanau Kaku	10 - 19	15
	DC1	Lempung/Lanau Sangat Kaku	20 - 40	25
	DC2	Lempung/Lanau Keras	> 40	45
Pasir	AS1a	Pasir Lepas	1 - 9	5
	AS1b	Pasir Medium	10 - 19	13
	DS1	Pasir Padat	20 - 40	25
	DS2	Pasir Sangat Padat	> 40	50

Pada Tabel 3.4 menunjukkan nilai N-SPT desain pada CP 105. Nilai N-SPT desain tersebut digunakan sebagai acuan dalam

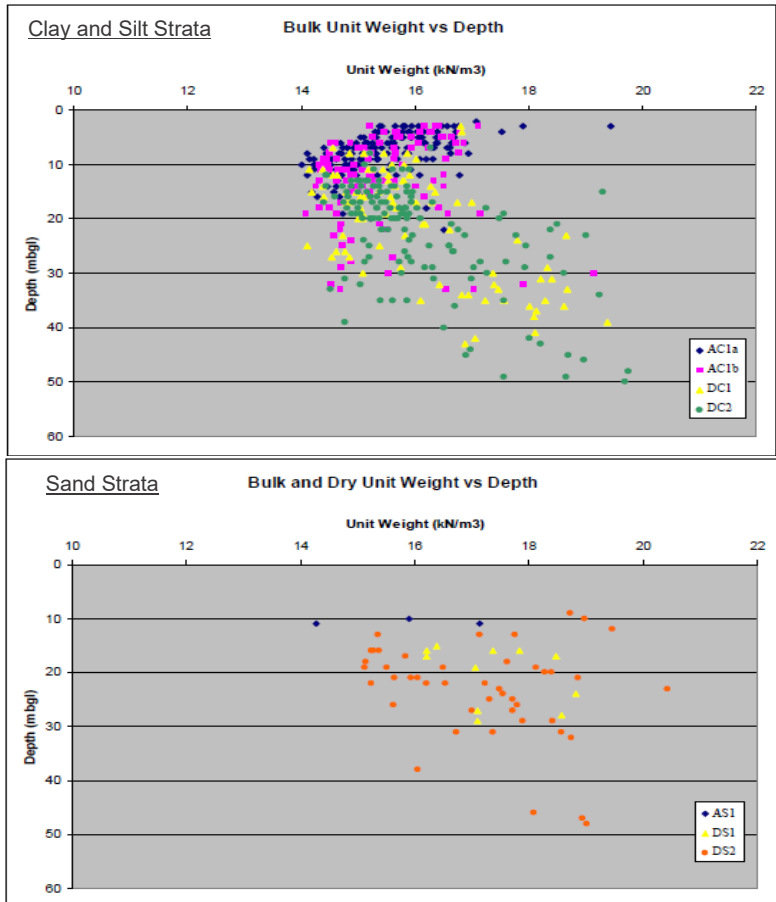
pengklasifikasian lapisan-lapisan tanah pada terowongan *section* CP 105-3 dengan menggunakan data *borelog* BH 105-9 sebagai referensi sesuai desain dari proyek. Nilai N-SPT pada BH 105-9 kemudian dirata-rata ( $\bar{N}$ ) pada jenis lapisan tanah yang sama untuk disederhanakan. Dari hasil rata-rata nilai N-SPT tersebut kemudian dikelompokkan berdasarkan nilai N-SPT Desain ( $N_{desain}$ ) dari proyek untuk mendefinisikan jenis-jenis tanah dan lapisan-lapisan tanah. Untuk hasil klasifikasi tanah berdasarkan nilai N-SPT pada *section* CP 105-3 ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3. 9 Desain lapisan tanah *section* CP 105-3

### 3.3.4. Berat Volume Tanah

Data parameter berat volume tanah ( $\gamma$ ) menggunakan data hasil uji laboratorium dari proyek pada CP 105 yang dapat dilihat pada Gambar 3.10 dan pada Tabel 3.5.



Gambar 3. 10 Data berat volume tanah pada CP 105

(Sumber : Data Proyek PT. MRT Jakarta)

Tabel 3. 5 Berat Volume Tanah pada CP 105

Jenis Tanah	Kode Tanah	Deskripsi	Berat Volume Tanah
			$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
Lempung atau Lanau	AC1ax	Lempung/Lanau Sangat Lunak	16
	AC1a	Lempung/Lanau Lunak	16
	AC1b	Lempung/Lanau Kaku	16
	DC1	Lempung/Lanau Sangat Kaku	18
	DC2	Lempung/Lanau Keras	18
Pasir	AS1a	Pasir Lepas	18
	AS1b	Pasir Medium	18
	DS1	Pasir Padat	18
	DS2	Pasir Sangat Padat	18.5

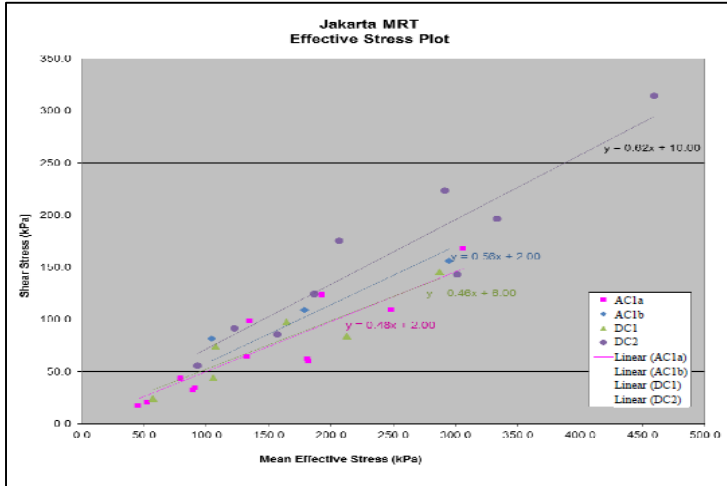
Dari data berat volume tanah pada CP 105 (Tabel 3.5) tersebut digunakan sebagai acuan dalam menentukan parameter berat volume tanah untuk analisa pemodelan pada program Plaxis 2D v.20 dan program GEO5 pada terowongan *section* CP 105-3. Untuk menentukan parameter berat volume tanah pada *section* CP 105-3 yang akan digunakan dalam pemodelan, disesuaikan dengan desain lapisan-lapisan tanah dan jenis-jenis tanah yang sudah didefinisikan. Parameter berat volume tanah ( $\gamma$ ) pada *section* CP 105-3 ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3. 6 Berat Volume Tanah ( $\gamma$ ) CP 105-3

Lapisan	Kode Tanah	Deskripsi	$\gamma_{\text{unsat}}$	$\gamma_{\text{sat}}$
			kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>
Lapisan 1	AC1a	Lempung Lunak	16	16
Lapisan 2	AS1a	Pasir Lepas	18	18
Lapisan 3	AS1b	Pasir Medium	18	18
Lapisan 4	AC1b	Lempung Kaku	16	16
Lapisan 5	DC1	Lempung Sangat Kaku	18	18

### 3.3.5. Parameter Kuat Geser Efektif Tanah

Parameter kuat geser efektif tanah ( $\phi'$  dan  $c'$ ) diperoleh dari hasil uji triaksial tak-terdrainase yang dilakukan oleh proyek pada seluruh *section* CP 105. Hasil uji tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.11 dan pada Tabel 3.7.



Gambar 3. 11 Data kuat geser efektif tanah pada CP 105  
(Sumber : Data Proyek PT. MRT Jakarta)

Tabel 3. 7 Kuat Geser Efektif Tanah pada CP 105

Jenis Tanah	Kode Tanah	Deskripsi	$\phi'$	$c'$
			Deg	kPa
Lempung atau Lanau	AC1ax	Lempung/Lanau Sangat Lunak	22	1
	AC1a	Lempung/Lanau Lunak	28	5
	AC1b	Lempung/Lanau Kaku	28	10
	DC1	Lempung/Lanau Sangat Kaku	32	15
	DC2	Lempung/Lanau Keras	34	30
Pasir	AS1a	Pasir Lepas	30	0
	AS1b	Pasir Medium	32	0
	DS1	Pasir Padat	34	0
	DS2	Pasir Sangat Padat	37	5

Dari data kuat geser efektif yang terdiri dari sudut geser tanah ( $\phi'$ ) dan kohesi tanah ( $c'$ ) pada CP 105 (Tabel 3.7) tersebut digunakan sebagai acuan dalam menentukan parameter kuat geser efektif tanah yang digunakan dalam analisa pemodelan. Untuk menentukan parameter kuat geser efektif tanah pada *section* CP 105-3, disesuaikan dengan jenis-jenis tanah yang ada pada *section* tersebut, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.8.

Tabel 3. 8 Kuat Geser Efektif Tanah CP 105-3

Lapisan	Kode Tanah	Deskripsi	$\phi'$	$c'$
			deg	kPa
Lapisan 1	AC1a	Lempung Lunak	28	5
Lapisan 2	AS1a	Pasir Lepas	30	0
Lapisan 3	AS1b	Pasir Medium	32	0
Lapisan 4	AC1b	Lempung Kaku	28	10
Lapisan 5	DC1	Lempung Sangat Kaku	32	15

### 3.3.6. Kuat Geser Tanah *Undrained* untuk Tanah Kohesif

Terzaghi dan Peck (1967) memberikan perkiraan korelasi nilai  $N$  dari hasil uji SPT dengan kuat geser tanah *undrained* ( $c_u$ ) untuk tanah lempung. Korelasi antara nilai  $N$  dengan nilai  $c_u$  ditunjukkan pada Persamaan 3.1.

$$c_u = KN \quad (3.1)$$

dengan,

$c_u$  = Kuat geser tanah *undrained* (kN/m<sup>2</sup>)

$K \approx 6$

$N = N_{60}$  = Nilai N-SPT terkoreksi

Penggunaan korelasi tersebut juga digunakan oleh pihak proyek dalam menentukan parameter kuat geser tanah *undrained* ( $c_u$ ) untuk tanah lempung. Perhitungan parameter hasil korelasi pada *section* CP 105-3 ditunjukkan pada Tabel 3.9.



Tabel 3. 9 Kuat Geser Tanah *Undrained* CP 105-3

Lapisan	Kode Tanah	Deskripsi	Korelasi Cu dengan N	N	Cu
					kPa
Lapisan 1	AC1a	Lempung Lunak	6 N	5	30
Lapisan 4	AC1b	Lempung Kaku	6 N	15	90
Lapisan 5	DC1	Lempung Sangat Kaku	6 N	25	150

### 3.3.7. Modulus Young *Undrained* untuk Tanah Kohesif

Bowles (1988) memberikan estimasi untuk korelasi antara nilai modulus elastisitas tanah *undrained* ( $E_u$ ) tanah lempung dengan kuat geser tanah *undrained* ( $c_u$ ) yang ditunjukkan dengan rasio antara keduanya seperti pada Persamaan 3.2.

$$E_u/c_u = 100 - 500 \quad (3.2)$$

dengan,

$E_u$  = Modulus elastisitas tanah *undrained* (MPa)

$c_u$  = Kuat geser tanah *undrained* (kPa)

Penggunaan korelasi tersebut juga digunakan oleh pihak proyek dalam menentukan parameter modulus Young tanah *undrained* ( $E_u$ ) pada CP 105 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.10.

Tabel 3. 10 Parameter Nilai Eu pada CP 105

Jenis Tanah	Kode Tanah	Deskripsi	Korelasi Eu dengan Cu (MPa)
Lempung atau Lanau	AC1ax	Lempung/Lanau Sangat Lunak	150 Cu
	AC1a	Lempung/Lanau Lunak	250 Cu
	AC1b	Lempung/Lanau Kaku	400 Cu
	DC1	Lempung/Lanau Sangat Kaku	400 Cu
	DC2	Lempung/Lanau Keras	400 Cu

Untuk hasil korelasi nilai  $E_u$  dengan nilai  $C_u$  pada *section* CP 105-3 ditunjukkan pada Tabel 3.11.

Tabel 3. 11 Modulus Young *Undrained* Tanah Lempung CP 105-3

Lapisan	Kode Tanah	Deskripsi	Korelasi $E_u$ dengan $C_u$	Cu	Eu
				kPa	MPa
Lapisan 1	AC1a	Lempung Lunak	250 $C_u$	30	7.5
Lapisan 4	AC1b	Lempung Kaku	400 $C_u$	90	36
Lapisan 5	DC1	Lempung Sangat Kaku	400 $C_u$	150	60

### 3.3.8. Modulus Young *Undrained* untuk Tanah Kohesif

Nilai parameter modulus elastisitas tanah *drained* ( $E'$ ) atau modulus *bulk* untuk tanah lempung didapatkan melalui korelasi dengan modulus tanah *undrained* ( $E_u$ ) untuk lempung yang dihitung berdasarkan persamaan (2.15) pada Sub-bab 2.6.4 yang juga dipakai oleh proyek untuk mendapatkan nilai modulus *drained* ( $E'$ ). Hasil korelasi parameter modulus *drained* untuk tanah lempung pada *section* CP 105-3 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.12.

Tabel 3. 12 Modulus Young *Drained* Tanah Lempung CP 105-3

Lapisan	Kode Tanah	Deskripsi	Korelasi $E'$ dengan $E_u$	Eu	$E'$
				MPa	MPa
Lapisan 1	AC1a	Lempung Lunak	$E_u / 1.2$	7.5	6.25
Lapisan 4	AC1b	Lempung Kaku	$E_u / 1.2$	36	30
Lapisan 5	DC1	Lempung Sangat Kaku	$E_u / 1.2$	60	50

### 3.3.9. Modulus Young Tanah Non-Kohesif

Stroud (1974) memberikan hubungan antara nilai N-SPT dengan nilai modulus elastisitas tanah *drained* ( $E'$ ) untuk tanah pasir yang terkonsolidasi normal. Korelasi tersebut ditunjukkan pada Persamaan 3.3.

$$E' = 2N \quad (3.3)$$

dengan,

$E'$  = Modulus elastisitas tanah *drained* pasir (MPa)

$N$  = Nilai hasil uji SPT

Hasil perhitungan korelasi modulus elastisitas tanah untuk tanah pasir ( $E'$ ) ditunjukkan pada Tabel 3.13.

Tabel 3. 13 Modulus Young Tanah Pasir CP 105-3

Lapisan	Kode Tanah	Deskripsi	Korelasi $E'$ dengan N	N	$E'$
					MPa
Lapisan 2	AS1a	Pasir Lepas	2 N	5	10
Lapisan 3	AS1b	Pasir Medium	2 N	13	26

### 3.3.10. Koefisien Tekanan Tanah *At-rest*

Jaky (1944) menyarankan sebuah persamaan untuk mengestimasi besarnya nilai  $K_0$  dari nilai sudut geser dalam tanah ( $\phi'$ ) yang ditunjukkan pada Persamaan 3.4.

$$K_0 = 1 - \sin(\phi') \quad (3.4)$$

dengan,

$\phi'$  = Sudut geser dalam tanah (deg)

Hasil perhitungan korelasi parameter koefisien tekanan tanah *at-rest* pada *section* CP 105-3 untuk tanah lempung dan tanah pasir ditunjukkan pada Tabel 3.14.

Tabel 3. 14 Koefisien Tekanan Tanah *At-rest* CP 105-3

Lapisan	Kode Tanah	Deskripsi	Korelasi $K_0$ dengan $\phi'$	$\phi'$	$K_0$
				deg	kPa
Lapisan 1	AC1a	Lempung Lunak	$1 - \sin(\phi')$	28	0.531
Lapisan 2	AS1a	Pasir Lepas	$1 - \sin(\phi')$	30	0.500
Lapisan 3	AS1b	Pasir Medium	$1 - \sin(\phi')$	32	0.470
Lapisan 4	AC1b	Lempung Kaku	$1 - \sin(\phi')$	28	0.531
Lapisan 5	DC1	Lempung Sangat Kaku	$1 - \sin(\phi')$	32	0.470

### 3.3.11. Koefisien Permeabilitas Tanah

Nilai koefisien permeabilitas tanah ( $k$ ) didapatkan dari data proyek melalui hasil uji permeabilitas tanah yang telah dilakukan oleh pihak proyek pada CP 105, dimana koefisien permeabilitas untuk tanah lempung sebesar  $10^{-7}$  m/dt dan untuk tanah pasir sebesar  $10^{-5}$  m/dt. Nilai koefisien permeabilitas ( $k$ ) untuk masing-masing jenis tanah pada *section* CP 105-3 ditunjukkan pada Tabel 3.15.

Tabel 3. 15 Koefisien Permeabilitas Tanah CP 105-3

Lapisan	Kode Tanah	Deskripsi	k	
			m/dt	m/hari
Lapisan 1	AC1a	Lempung Lunak	0.0000001	0.00864
Lapisan 2	AS1a	Pasir Lepas	0.00001	0.864
Lapisan 3	AS1b	Pasir Medium	0.00001	0.864
Lapisan 4	AC1b	Lempung Kaku	0.0000001	0.00864
Lapisan 5	DC1	Lempung Sangat Kaku	0.0000001	0.00864

### 3.3.12. Rasio Poisson

Nilai rasio Poisson ( $\nu$ ) menggunakan acuan jangkauan nilai banding Poisson yang diusulkan oleh Bowless (1988) untuk masing-masing jenis material seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.16.

Tabel 3. 16 Jangkauan Nilai Banding Poisson

Jenis tanah	$\mu$
Lempung jenuh	0,4–0,5
Lempung tak jenuh	0,1–0,3
Lempung berpasir	0,2–0,3
Lanau	0,3–0,35
Pasir (padat) pasir berkerikil	0,1–1,00
biasa dipakai	0,3–0,4
Batuan (rock)	0,1–0,4
Tanah lus	0,1–0,3
Es	0,36
Beton	0,15

Sumber : Analisis dan Desain Pondasi Edisi 4 Jilid 1, 1988

Nilai Rasio Poisson ( $\nu$ ) untuk tanah lempung dan tanah pasir pada *section* CP 105-3 ditunjukkan pada Tabel 3.17.

Tabel 3. 17 Nilai Rasio Poisson Tanah CP 105-3

Lapisan	Kode Tanah	Deskripsi	$\nu$
Lapisan 1	AC1a	Lempung Lunak	0.3
Lapisan 2	AS1a	Pasir Lepas	0.3
Lapisan 3	AS1b	Pasir Medium	0.3
Lapisan 4	AC1b	Lempung Kaku	0.3
Lapisan 5	DC1	Lempung Sangat Kaku	0.3

### 3.3.13. Koefisien Kekuatan Struktural Tanah

Koefisien struktural tanah ( $m$ ) dibutuhkan untuk analisa pemodelan terowongan arah memanjang (*longitudinal section*) pada GEO5 untuk mendefinisikan ketahanan tanah terhadap

beban yang bekerja. Nilai koefisien  $m$  dapat dilihat pada tabel (2.1) pada Sub-bab 2.7.4. Nilai koefisien  $m$  untuk masing-masing jenis tanah pada *section* CP 105-3 ditunjukkan pada Tabel 3.18.

Tabel 3. 18 Koefisien Kekuatan Struktural Tanah CP 105-3

Lapisan	Kode Tanah	Deskripsi	Koefisien $m$
Lapisan 1	AC1a	Lempung Lunak	0.2
Lapisan 2	AS1a	Pasir Lepas	0.2
Lapisan 3	AS1b	Pasir Medium	0.2
Lapisan 4	AC1b	Lempung Kaku	0.2
Lapisan 5	DC1	Lempung Sangat Kaku	0.2

### 3.3.14. Kedalaman Muka Air Tanah (MAT)

Data kedalaman Muka Air Tanah (MAT) mengacu pada hasil investigasi yang telah dilakukan oleh pihak proyek yang ditunjukkan pada Tabel 3.19

Tabel 3. 19 Data Kedalaman Muka Air Tanah

No	Kondisi MAT	Desain MAT
1	<i>High Water Level (HWL)</i>	2 mbgl
2	<i>Low Water Level (LWL)</i>	5 mbgl
3	<i>Flood Water Level (FWL)</i>	0 mbgl

Untuk rangkuman parameter-parameter tanah yang akan digunakan dalam analisis pemodelan program Plaxis 2D v.20 ditunjukkan pada Tabel 3.20 dan untuk rangkuman parameter-parameter tanah yang akan digunakan dalam analisis pemodelan program GEO5 – *Beam* ditunjukkan pada Tabel 3.21.

Tabel 3. 20 Rangkuman Parameter Tanah Pemodelan Plaxis

Parameter	Satuan	Detail				
<b>Umum :</b>						
Lapisan	-	Lap. 1	Lap. 2	Lap. 3	Lap. 4	Lap. 5
Kedalaman	mbgl	0 - 9	9 - 12	12 - 16.5	16.5 - 19.5	19.5 - 27
Jenis Tanah	-	Lempung Lunak	Pasir Lepas	Pasir Medium	Lempung Kaku	Lempung Sangat kaku
Kode Tanah	-	AC1a	AS1a	AS1b	AC1b	DC1
Model	-	MC	MC	MC	MC	MC
Kondisi	-	<i>Undrained B</i>	<i>Drained</i>	<i>Drained</i>	<i>Undrained B</i>	<i>Undrained B</i>
<b>Berat Volume Tanah :</b>						
$\gamma$ unsat	kN/m <sup>3</sup>	16	18	18	16	18
$\gamma$ sat	kN/m <sup>3</sup>	16	18	18	16	18
<b>Parameter Kuat Geser Tanah :</b>						
$C_u$	kN/m <sup>2</sup>	30	-	-	90	150
$\phi'$	deg	0	30	32	0	0
$c'$	kN/m <sup>2</sup>	0	0	0	0	0
<b>Parameter Kekakuan Tanah :</b>						
$E'$	kN/m <sup>2</sup>	6250	10000	26000	30000	50000
$\nu$	-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
<b>Koefisien Tekanan Tanah <i>At-rest</i> :</b>						
$K_0$	-	0.531	0.500	0.470	0.531	0.470
<b>Koefisien Permeabilitas Tanah :</b>						
$k$	m/hari	0.00864	0.864	0.864	0.00864	0.00864
<b>Antarmuka :</b>						
Tipe	-	Kaku	Kaku	Manual	Manual	Manual
R inter	-	1	1	0.7	0.7	0.7

Tabel 3. 21 Rangkuman Parameter Tanah Pemodelan GEO5

Parameter	Satuan	Detail				
<b>Umum :</b>						
Lapisan	-	Lap. 1	Lap. 2	Lap. 3	Lap. 4	Lap. 5
Kedalaman	mbgl	0 - 9	9 - 12	12 - 16.5	16.5 - 19.5	19.5 - 27
Panjang	m	296	296	296	296	296
Jenis Tanah	-	Lempung Lunak	Pasir Lepas	Pasir Medium	Lempung Kaku	Lempung Sangat kaku
Kode Tanah	-	AC1a	AS1a	AS1b	AC1b	DC1
<b>Berat Volume Tanah :</b>						
$\gamma$ unsat	kN/m <sup>3</sup>	16	18	18	16	18
$\gamma$ sat	kN/m <sup>3</sup>	16	18	18	16	18
<b>Parameter Kekakuan Tanah :</b>						
$E_{def}$	MPa	6.25	10	26	30	50
$\nu$	-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
<b>Koefisien Kekuatan Struktural Tanah :</b>						
$m$	-	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2



### 3.4. Data Struktur Terowongan

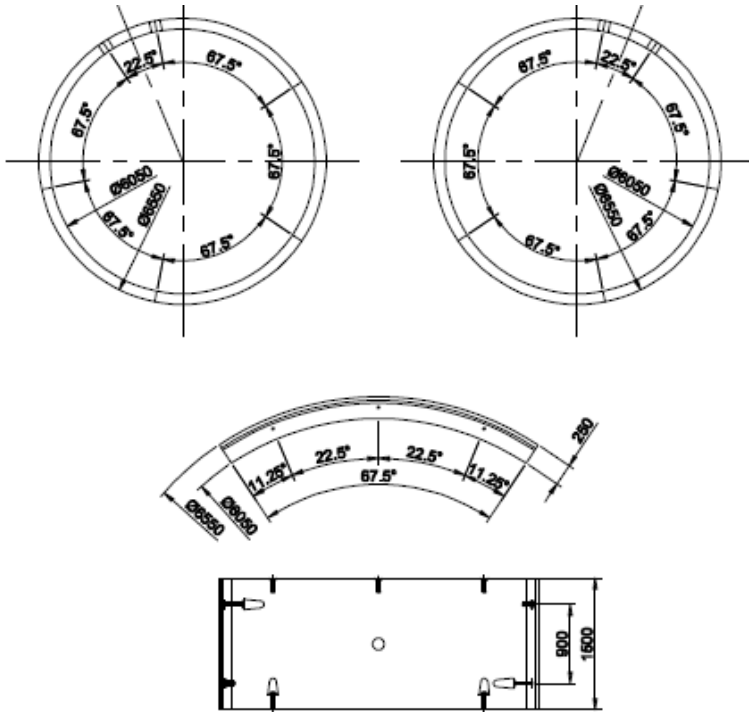
Data struktur terowongan adalah data yang berisi informasi tentang data-data properti terowongan seperti data geometri terowongan, data desain kedalaman terowongan dan data lainnya.

#### 3.4.1. Geometri dan Struktur Terowongan

Data geometri struktur terowongan dan material struktur terowongan ditunjukkan ditunjukkan pada Tabel 3.22.

Tabel 3. 22 Data Geometri dan Material Terowongan

Item	Detail	Satuan
<b>Data Geometri Terowongan</b>		
Tipe <i>Lining</i> Terowongan	<i>Lining</i> Tipe A	
Tebal <i>Lining</i> ( $t_s$ )	250	mm
Diameter Dalam ( $D_i$ )	6050	mm
Diameter Luar ( $D_o$ )	6550	mm
Panjang Segmen <i>Lining</i> ( $L_s$ )	1500	mm
Jumlah Segmen ( $n$ )	5 + 1 <i>Key</i>	
Sudut Segmen Utama ( $\theta_s$ )	67.5	deg
Sudut Segmen Kunci ( $\theta_k$ )	22.5	deg
<b>Data Material Terowongan</b>		
Material Struktur <i>Lining</i>	Beton Pracetak	
Mutu Beton ( $f_{cu}$ )	60	Mpa
Mutu Beton, ( $f_c'$ )	49.8	MPa
<b>Data Tulangan Struktur Beton</b>		
Tipe Baja Tulangan	BJTS 40	
Mutu Baja Tulangan ( $f_y$ )	390	MPa
Tebal Selimut Beton ( $d$ )	40	mm
<b>Data Bolt Pada Join Segmen Terowongan</b>		
Tipe <i>Bolt</i>	M24 Grade 8.8	
Mutu Bahan <i>Bolt</i> , ( $f_y$ <i>bolt</i> )	560	MPa



Gambar 3. 12 Geometri *lining* terowongan

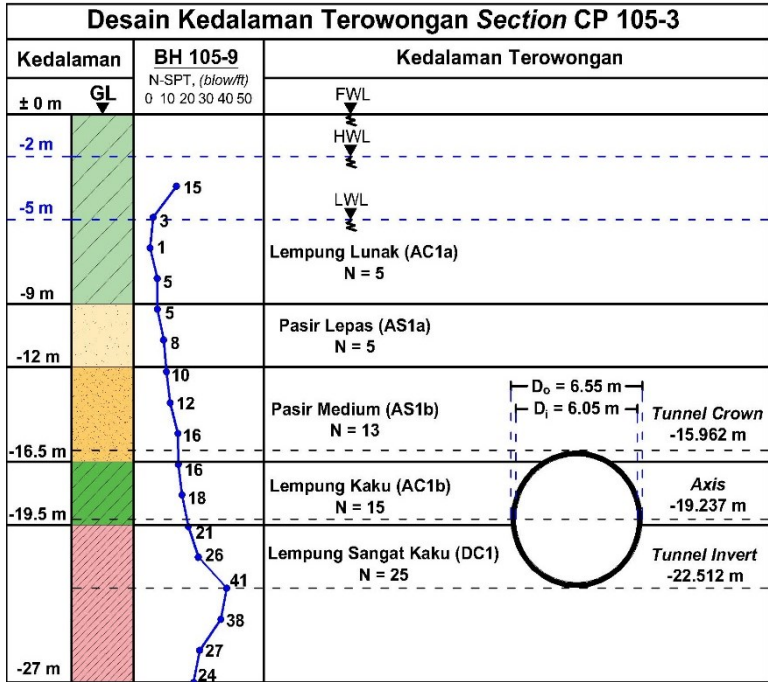
(Sumber : Data Proyek PT. MRT Jakarta)

### 3.4.2. Kedalaman Terowongan

Data desain kedalaman terowongan *section* CP 105-3 mengacu pada data desain kedalaman yang diberikan oleh pihak proyek seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.23 dan untuk profil kedalaman ditunjukkan pada Gambar 3.13.

Tabel 3. 23 Data Kedalaman Terowongan CP 105-3

No	Item	Detail
1	Kedalaman <i>Tunnel Axis</i>	19.237 mbgl
2	Jarak Antar <i>Tunnel Axis</i>	15.1 m



Gambar 3. 13 Profil kedalaman terowongan CP 105-3

Kedalaman titik axis terowongan *section* CP 105-3 pada kedalaman 19,237 mbgl, dimana struktur terowongan terletak pada lapisan tanah pasir medium (AS1b), tanah lempung kaku (AC1b), dan tanah lempung sangat kaku (DC1). Terowongan MRT Jakarta merupakan terowongan kembar (Terowongan *Downtrack* dan Terowongan *Uptrack*) dimana jarak antar kedua terowongan pada titik as terowongan yaitu sebesar 15,1 m.

### 3.4.3. Parameter *Lining* Terowongan Pemodelan Plaxis

Pemodelan struktur terowongan arah melintang (*cross section*) dimodelkan dengan menggunakan program Plaxis 2D. Dalam pemodelan, struktur terowongan dimodelkan sebagai

struktur pelat (*plate*). Adapun tipe material dari komponen ini adalah elastis. Untuk memodelkan struktur terowongan pada program Plaxis 2D, diperlukan beberapa parameter, yaitu:

a. Parameter Kekakuan Struktur ( $EA$  dan  $EI$ )

Parameter kekakuan struktur *lining* terowongan terkait dengan nilai kekakuan aksial ( $EA$ ) dan nilai kekakuan lentur ( $EI$ ). Nilai  $EA$  dan  $EI$  ini berkaitan dengan nilai kekakuan persatuan lebar pada arah luar bidang (*out-of-plane*). Oleh karena itu nilai, nilai kekakuan aksial ( $EA$ ) diberikan dalam gaya per satuan lebar dan kekakuan lentur ( $EI$ ) diberikan dalam gaya dikali panjang kuadrat persatuan lebar. Nilai tebal ekivalen pelat (*plate*) akan dihitung secara otomatis oleh program Plaxis. Dalam pemodelan *plane-strain*, nilai  $b$  diperhitungkan sebagai 1 meter ( $b = 1$  m). Untuk nilai kekakuan  $EA$  dan  $EI$  struktur *lining* terowongan dapat dihitung dengan Persamaan 3.5 dan Persamaan 3.6.

$$EA = E_c \times h \times b \quad (3.5)$$

$$EI_e = E_c \times I_e \quad (3.6)$$

$$d = h = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}} \quad (3.7)$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'c'} \quad (3.8)$$

dengan,

$E_c$  = Modulus elastisitas beton (kN/m<sup>2</sup>)

$A$  = Luas penampang (m<sup>2</sup>)

$I_e$  = Momen inersia efektif *lining* (m<sup>4</sup>)

$h$  = Tebal *lining* terowongan (m)

$b$  = Lebar pelat (diambil sebesar 1 m)

$d$  = Tebal ekivalen pelat (m)

$f'c'$  = Kuat tekan beton (MPa)

b. Berat Struktur *Lining* Terowongan ( $W$ )

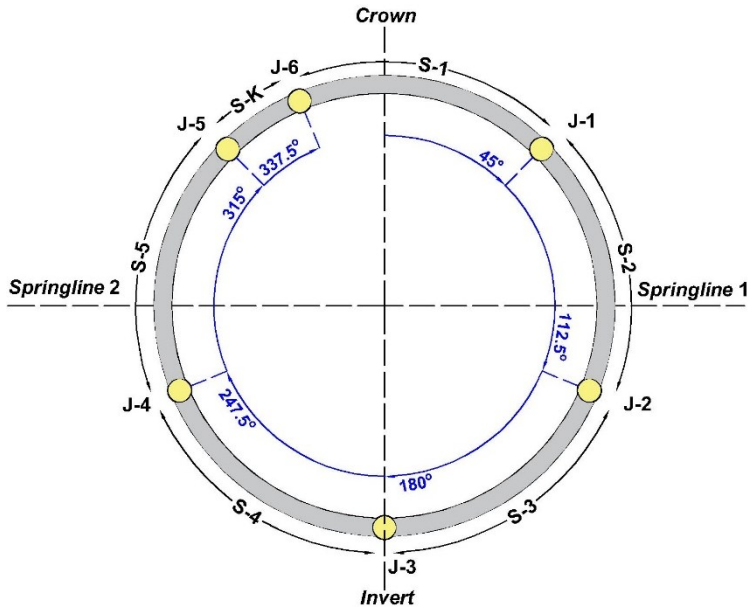
Untuk perhitungan berat struktur *lining* terowongan secara akurat, maka berat total dari *lining* harus dibagi dengan keliling terowongan, karena berat terowongan dalam masukan properti adalah satuan berat per satuan panjang pada arah sumbu horizontal per satuan panjang pada arah luar bidang. Untuk perhitungan berat *lining* digunakan persamaan (2.19) pada Sub-bab 2.9.3 tentang berat *lining* terowongan. Dari hasil perhitungan didapatkan nilai berat struktur *lining* terowongan sebesar  $5,77 \text{ kN/m}^2$  ( $W = 5,77 \text{ kN/m/m}$ ).

c. Nilai Kontraksi Dinding Terowongan

Dalam menganalisa *ground loss* (kehilangan tanah) akibat konstruksi terowongan bor pada program Plaxis 2D v.20 dimodelkan dengan cara mengaplikasikan nilai kontraksi pada dinding terowongan, nilai kontraksi ini dalam satuan persen (%). Nilai dari kontraksi dinding terowongan ini mengacu pada nilai perkiraan kehilangan volume tanah yang diusulkan oleh *British Tunnelling Society* dan *Institution of Civil Engineers* (2004) yang telah dijelaskan pada Sub-bab 2.12 yaitu sebesar  $0,5 \%$  ( $C = 0,5 \%$ ).

d. Model Join Antar Segmen *Lining* Terowongan

Pemodelan join antar segmen *lining* terowongan bor (diskontinuitas antar segmen) pada Plaxis dimodelkan dengan memberikan *connection* pada segmen *lining* dengan perilaku join dimodelkan sebagai sendi (*free rotation-fixed move*) karena pada join merupakan titik lemah *lining* terowongan sehingga pada join antar segmen gaya momen yang berkerja sama dengan  $0$  ( $M = 0$ ). Posisi join antar segmen dapat dilihat pada Gambar 3.14 dan detail pada Tabel 3.24.



Gambar 3. 14 Posisi join antar segmen *lining* terowongan

Tabel 3. 24 Detail Posisi Join *Lining* Terowongan

Join	Join Segmen	<i>Downtrack</i> *	<i>Uptrack</i>
		deg	deg
J-1	S1 - S2	45	337.5
J-2	S2 - S3	112.5	315
J-3	S3 - S4	180	247.5
J-4	S4 - S5	247.5	180
J-5	S5 - SK	315	112.5
J-6	SK - S1	337.5	45

\*putaran searah jarum jam dari *crown*

Rangkuman dari parameter *lining* terowongan yang akan digunakan dalam pemodelan Plaxis ditunjukkan pada Tabel 3.25.

Tabel 3. 25 Rangkuman Parameter *Lining* Pemodelan Plaxis 2D

Parameter	Detail	Satuan
<b>Properti Geometri :</b>		
Tipe <i>Lining</i>	<i>Lining</i> Tipe A	
Tebal <i>Lining</i> (ts)	0.25	m
Jari-jari dalam <i>Lining</i> terowongan (Ri)	3.025	m
Jumlah Segmen (n)	5 + 1 <i>Key</i>	
Sudut Segmen Utama ( $\theta_s$ )	67.5	deg
Sudut Segmen Kunci ( $\theta_k$ )	22.5	deg
Kedalaman <i>Tunnel</i> Axis (Zo)	19.237	mbgl
Jarak Antar <i>Tunnel</i>	15.1	m
<b>Model Material :</b>		
Material Struktur <i>Lining</i>	Beton Pracetak	
Model Material	<i>Plate</i>	
<b>Parameter <i>Lining</i> Cross-Section :</b>		
Modulus Elastisitas Beton ( $E_c$ )	33167484	kN/m <sup>2</sup>
Luas <i>Lining</i> (A)	0.25	m <sup>2</sup>
Momen Inersia Efektif ( $I_e$ )	0.001215	m <sup>4</sup>
Modulus Kekakuan Aksial (EA)	8291871	kN/m
Modulus Kekakuan Lentur (EI)	40295.29	kNm <sup>2</sup> /m
Rasio Poisson Beton ( $\nu$ )	0.2	-
Berat <i>Lining</i> (w)	5.771	kN/m
<b>Nilai Kontraksi :</b>		
Volume Kontraksi (VL)	0.500	%
<b>Join Segmen <i>Lining</i> :</b>		
Model Join	<i>Hinge / Free</i>	

### 3.4.4. Parameter Struktur Terowongan Pemodelan GEO5

Pemodelan struktur terowongan arah memanjang (*long section*) menggunakan program *GEO5-Beam*. Dalam pemodelan ini, struktur terowongan dimodelkan sebagai struktur balok (*beam*) memanjang dengan panjang sesuai dengan panjang *section* yang ditinjau, panjang *section* terowongan CP 105 *section* 3 yaitu sepanjang 296 m ( $L = 296 \text{ m}$ ).

Untuk memodelkan struktur terowongan pada program *GEO5-Beam*, diperlukan beberapa parameter, yaitu:

#### 1. Properti Geometri Terowongan

Dalam memodelkan struktur terowongan arah memanjang pada program *GEO5-Beam* diperlukan properti geometri struktur terowongan, karena pemodelan pada GEO5 tidak dapat dimodelkan seperti bentuk terowongan pada aslinya (bentuk penampang lingkaran) dan hanya bisa dimodelkan sebagai balok monolit berbentuk persegi panjang. Oleh karena itu, penampang terowongan yang berbentuk lingkaran tersebut diakumulasikan menjadi balok monolit berbentuk persegi panjang dan parameter geometri perlu didefinisikan kembali agar dapat dimodelkan mendekati bentuk aslinya.

##### a. Luas Potongan Melintang Terowongan ( $A_{full}$ )

Luas potongan melintang terowongan ( $A_{full}$ ) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$A_{full} = A_o - A_i \quad (3.9)$$

$$A_o = 0,25 \pi D_o^2 \quad (3.10)$$

$$A_i = 0,25 \pi D_i^2 \quad (3.11)$$

dengan,

$$A_{full} = \text{Luas potongan melintang (m}^2\text{)}$$

$$A_o = \text{Luas lingkaran luar terowongan (m}^2\text{)}$$



$$\begin{aligned}
 A_i &= \text{Luas lingkaran dalam terowongan (m}^2\text{)} \\
 D_o &= \text{Diameter luar terowongan (m)} \\
 D_i &= \text{Diameter dalam terowongan (m)}
 \end{aligned}$$

b. Lebar Balok ( $B$ )

Lebar balok ( $B$ ) untuk pemodelan terowongan dalam arah memanjang perlu disesuaikan dengan penampang terowongan pada aslinya dengan cara membagi luas potongan melintang ( $A_{full}$ ) dengan tinggi terowongan atau diameter luar terowongan ( $H = D_o$ ).

$$B = \frac{A_{full}}{D_o} \quad (3.12)$$

dengan,

$$\begin{aligned}
 A_{full} &= \text{Luas potongan melintang (m}^2\text{)} \\
 D_o &= \text{Diameter luar terowongan (m)}
 \end{aligned}$$

c. Momen Inersia *Lining Full* ( $I_{full}$ )

Perhitungan nilai momen inersia *lining* terowongan ( $I_{full}$ ) dapat dihitung dengan persamaan sebagai momen inersia penampang lingkaran sesuai dengan penampang terowongan sebagai berikut:

$$I_{full} = \frac{1}{4} \pi (r_o^4 - r_i^4) \quad (3.13)$$

dengan,

$$\begin{aligned}
 I_{full} &= \text{Momen Inersia penampang (m}^4\text{)} \\
 r_o &= \text{Jari-jari luar terowongan (m)} \\
 r_i &= \text{Jaringan-jari dalam lingkaran (m)}
 \end{aligned}$$

## 2. Properti Material Struktur Terowongan

### a. Modulus Elastisitas ( $E_c$ )

Modulus elastisitas beton ( $E_c$ ) dihitung berdasarkan persamaan sebagai berikut:

$$E_c = 4700\sqrt{f_c'} \quad (3.14)$$

dengan,

$$f_c' = \text{Kuat tekan beton (MPa)}$$

### b. Modulus Geser Beton ( $G$ )

Parameter modulus geser beton ( $G$ ) dapat dihitung dengan berdasarkan persamaan sebagai berikut:

$$G = \frac{E_c}{2(1+\nu)} \quad (3.15)$$

dengan,

$$E_c = \text{Modulus elastisitas beton (MPa)}$$

$$\nu = \text{Rasio Poisson Beton } (\nu = 0,2)$$

## 3. Berat Total Struktur Terowongan ( $W_{tot}$ )

Perhitungan berat struktur terowongan digunakan dalam tahap pembebanan yaitu tahap beban mati (berat sendiri struktur). Nilai beban berat sendiri struktur dalam GEO5 merupakan gaya per satuan panjang arah luar bidang. Dalam perhitungan berat struktur untuk pemodelan GEO5, nilai  $b$  diperhitungkan sebesar 1 m. Perhitungan berat total dari terowongan sepanjang satu segmen, dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$W_{tot} = \gamma_{beton} \times V \quad (3.16)$$

$$V = A_{full} \times b \quad (3.17)$$

dengan,

$W_{tot}$  = Berat total terowongan (kN)

$V$  = Volume penampang terowongan ( $m^3$ )

$A_{full}$  = Luas penampang terowongan ( $m^2$ )

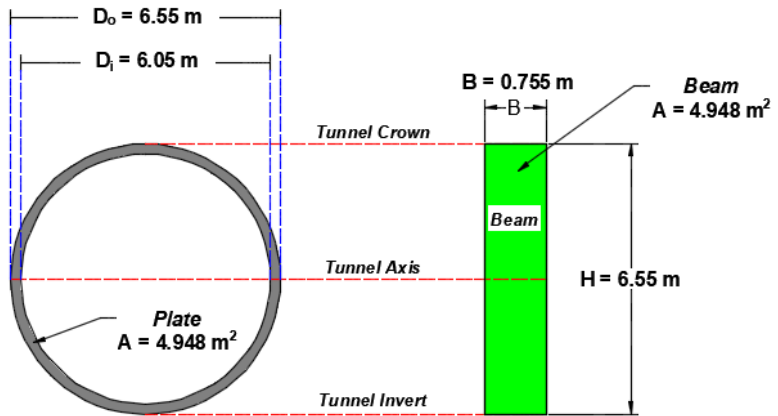
$\gamma_{beton}$  = Berat jenis beton bertulang ( $kN/m^3$ )

Rangkuman parameter-parameter *lining* terowongan yang akan digunakan dalam pemodelan terowongan arah memanjang dengan program GEO5 - *Beam* ditunjukkan pada Tabel 3.26.

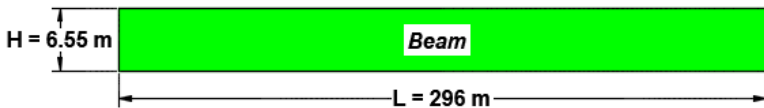
Tabel 3. 26 Rangkuman Parameter Lining Pemodelan GEO5

Parameter	Detail	Satuan
<b>Umum :</b>		
Tipe <i>Lining</i> Terowongan	<i>Lining</i> Tipe A	
Tebal <i>Lining</i> (ts)	0.25	m
Diameter Luar Terowongan ( $D_o$ )	6.55	m
Panjang Segmen <i>Lining</i> ( $L_s$ )	1.5	m
Panjang <i>Section</i> CP 105-3 ( $X_s$ )	296	m
Kedalaman <i>Tunnel Invert</i> ( $Z_i$ )	22.512	mbgl
<b>Material :</b>		
Material Struktur <i>Lining</i>	Beton Pracetak	
Model Material	<i>Beam</i>	
<b>Parameter Lining Longitudinal-Section :</b>		
Panjang Balok/Panjang <i>Section</i> ( $L_b$ )	296	m
Lebar Balok (B)	0.755	m
Luas <i>Lining Full</i> ( $A_{full}$ )	4.948	$m^2$
Momen Inersia <i>Full</i> ( $I_{full}$ )	24.587	$m^4$
Modulus Elastisitas Beton, ( $E_c$ )	33167.484	MPa
Modulus Geser Beton, (G)	13819.785	MPa
Berat Jenis Beton, ( $\gamma_c$ )	24	$kN/m^3$

### KONVERSI PENAMPANG TEROWONGAN PEMODELAN GEO5



### PENAMPANG MEMANJANG TEROWONGAN PEMODELAN GEO5



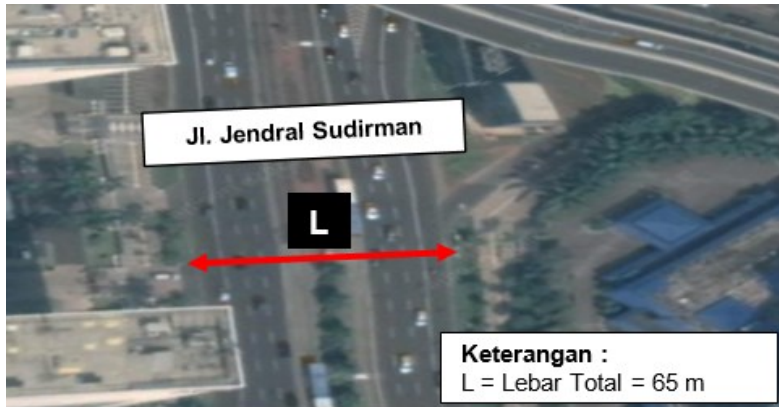
Gambar 3. 15 Detail penampang balok pemodelan GEO5

Pada Gambar 3.15 menunjukkan konversi penampang terowongan dari penampang lingkaran kemudian diakumulasikan menjadi penampang balok monolit untuk pemodelan GEO5-Beam. Acuan dalam konversi yaitu luas penampang terowongan ( $A_{full}$ ) arah melintang (penampang lingkaran) dan tinggi terowongan dalam hal ini yaitu nilai diameter luar terowongan ( $D_o$ ), sehingga geometri model balok pada pemodelan GEO5 mempunyai properti yang sama dengan kondisi penampang terowongan berbentuk lingkaran. Hal ini dilakukan agar kedalaman titik as terowongan (*tunnel axis*) tepat berada pada lapisan-lapisan tanah yang sama dengan desain terowongan pada arah melintang (*cross section*).

### 3.5. Data Bangunan Eksisting

Data bangunan eksisting merupakan data bangunan yang ada di atas permukaan tanah (*ground level*) yang berhubungan dengan konstruksi terowongan yang akan digunakan dalam desain beban permukaan (*surchage load*) dalam perhitungan perencanaan konstruksi terowongan pada *section* CP 105-3.

Bangunan eksisting yang ada pada terowongan MRT Jakarta *section* CP 105-3 merupakan bangunan jalan raya publik (Jl. Jendral Sudirman) dengan lebar jalan total sebesar 65 m seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.16.



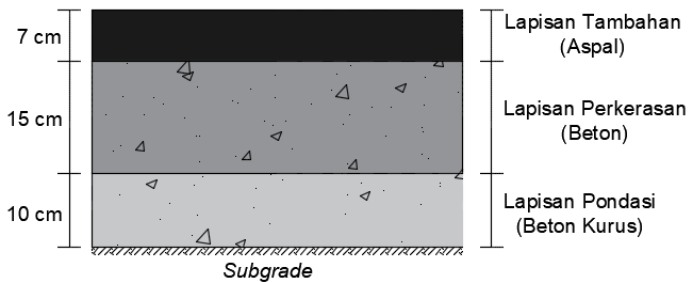
Gambar 3. 16 Bangunan eksisting pada terowongan CP 105-3

(Sumber : Google Earth, 2020)

Data properti bangunan jalan raya seperti tebal lapisan perkerasan dan bahan lapisan perkerasan jalan diasumsikan menurut persyaratan tebal perkerasan minimum untuk jalan raya menurut Bina Marga. Detail asumsi properti perkerasan jalan raya tersebut ditunjukkan pada Tabel 3.27 dan untuk detail asumsi tebal lapisan perkerasan jalan ditunjukkan pada Gambar 3.17.

Tabel 3. 27 Data Properti Perkerasan Jalan Raya

No	Item	Detail
1	Jenis Perkerasan Jalan	LASTON
2	Lebar Jalan (L)	65 m
2	Mutu Beton Pakerasan ( $f_c'$ )	35 MPa
3	Mutu Beton Lapis Pondasi ( $f_c'$ )	55 MPa
4	Berat Jenis Beton ( $\gamma$ beton)	24 kN/m <sup>3</sup>
5	Berat Jenis Aspal ( $\gamma$ aspal)	22 kN/m <sup>3</sup>



Gambar 3. 17 Tebal perkerasan lapisan jalan

### 3.6. Desain Beban

Desain beban yang akan digunakan pada analisis pemodelan program Plaxis 2D v.20 dan program GEO5 terdiri dari dua kondisi desain beban, yaitu desain beban kondisi non-seismik dan desain beban kondisi seismik (beban gempa).

#### 3.6.1. Beban Permukaan (*Surcharge Load*)

Perhitungan beban permukaan pada *ground level* dihitung berdasarkan SNI 1725 Tahun 2016 tentang Pembebanan Untuk Jembatan dan Jalan karena bangunan eksisting yang ada pada *ground level* merupakan bangunan struktur jalan raya dengan mempertimbangkan persyaratan minimum beban permukaan pada

terowongan bor (*bored tunnel*) dari LTA Singapura tentang *Civil Design Criteria* 2019 dengan persyaratan beban permukaan minimum yaitu sebesar  $75 \text{ kN/m}^2$ .

Dari hasil perhitungan berdasarkan SNI 1725 : 2016 didapatkan nilai beban permukaan sebesar  $78,779 \text{ kN/m}^2$  sehingga beban dari perhitungan ini dipakai untuk desain beban permukaan pada *section* CP 105-3.

### 3.6.2. Beban Gempa (*Seismic Load*)

Perencanaan desain beban gempa memerhatikan kriteria perencanaan kegempaan geoteknik untuk struktur terowongan pada SNI 8460 Tahun 2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik dengan desain beban gempa MDE (*Maximum Design Earthquake*) untuk periode ulang gempa 1000 tahun. Data beban gempa dari proyek dapat dilihat pada Tabel 3.28.

Tabel 3. 28 Data Percepatan Puncak Gempa (PGA)

Jenis Beban Gempa	Periode Ulang Gempa	Percepatan Puncak Gempa (PGA)
	(thn)	(g)
ODE	100	0.107
<b>MDE</b>	<b>1000</b>	<b>0.264</b>

Pada Tabel 3.28 menunjukkan nilai koefisien percepatan puncak gempa MDE sebesar 0,264 ( $K_h = 0,264$ ). Perhitungan beban gempa dihitung dengan persamaan (2.20) pada Sub-bab 2.9.5 tentang beban gempa dengan cara mengalikan beban luar (beban permukaan) dengan koefisien percepatan puncak gempa ( $K_h$ ). Dari hasil perhitungan didapatkan nilai desain beban gempa MDE sebesar  $20,798 \text{ kN/m}^2$ .

### 3.6.3. Beban untuk Pemodelan Plaxis

Pemodelan pembeban terowongan yang digunakan dalam pemodelan pada program Plaxis 2D v.20 terdiri dari dua kondisi

yaitu kondisi beban non-seismik (Beban Permukaan) dan kondisi beban seismik (Beban Permukaan + Beban Gempa).

Untuk pembebanan kondisi non-seismik dipakai desain beban permukaan dengan nilai beban sebesar  $78,779 \text{ kN/m}^2$ . Untuk pemodelan beban kondisi seismik atau beban gempa, nilai desain beban yang diaplikasikan merupakan nilai beban total dari beban permukaan ditambahkan dengan nilai dari beban gempa MDE ( $Q_{tot} = Q_{surcharge} + Q_{seismic}$ ) dengan beban total yang didapat dari hasil perhitungan sebesar  $99,576 \text{ kN/m}^2$ .

Rangkuman desain pembebanan yang akan digunakan dalam pemodelan dengan program Plaxis 2D v.20 ditunjukkan pada Tabel 3.29.

Tabel 3. 29 Rangkuman Desain Beban Pemodelan Plaxis

Jenis Beban	Keterangan	Model	Detail	Satuan
<b>Beban Permanen :</b>				
Beban Permukaan	Beban Eksisting Struktur Jalan	Beban Merata	78.78	$\text{kN/m}^2$
<b>Beban Sementara :</b>				
Beban Gempa	Gempa MDE	<i>Pseudo-static</i>	99.58	$\text{kN/m}^2$

### 3.6.4. Beban untuk Pemodelan GEO5

Desain pembebanan yang digunakan untuk analisis dalam pemodelan GEO5-*Beam* sebagai berikut:

#### 1. Distribusi Beban

Pemodelan pembebanan terowongan pada program GEO5 dimodelkan dengan cara memberikan beban secara langsung pada model struktur balok (*beam*) sehingga beban yang ada



pada permukaan tanah (beban eksisting) tidak dapat dimodelkan pada *ground level* (level bangunan eksisting). Oleh karena itu, perlu dihitung distribusi beban pada terowongan pada bagian puncak struktur terowongan (titik *crown*).

Perhitungan distribusi beban-beban pada bagian *crown* terowongan menggunakan perhitungan distribusi tegangan vertikal tanah ( $\Delta\sigma_z$ ) pada suatu kedalaman tertentu akibat adanya suatu beban dengan metode perhitungan menggunakan metode usulan dari Boussinesq (1883) dengan penyelesaian perhitungan menggunakan persamaan (2.10) pada Sub-bab 2.5.3.

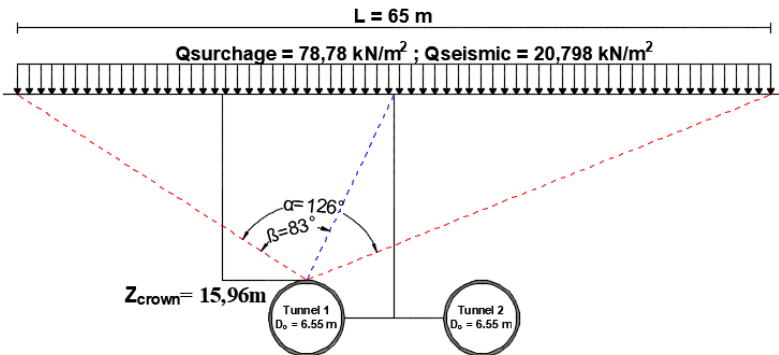
$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi} (\alpha + \sin \alpha \cos 2\beta)$$

dengan,

$\Delta\sigma_z$  = Kenaikan tegangan vertikal (kN/m<sup>2</sup>)

$q$  = Beban terbagi rata (kN/m<sup>2</sup>)

$\alpha, \beta$  = Sudut dalam radian.



Gambar 3. 18 Distribusi beban pada *crown* terowongan

a. Kenaikan Tegangan Vertikal Akibat Beban Permukaan

Hasil perhitungan kenaikan tegangan vertikal akibat beban permukaan ( $Q_{\text{surchage}} = 78,779 \text{ kN/m}^2$ ) pada kedalaman *crown* terowongan diperoleh nilai kenaikan tegangan vertikal ( $\Delta\sigma_{z1}$ ) sebesar  $35,46 \text{ kN/m}^2$ .

b. Kenaikan Tegangan Vertikal Akibat Beban Gempa

Hasil perhitungan kenaikan tegangan vertikal akibat beban gempa ( $Q_{\text{seismic}} = 78,779 \text{ kN/m}^2$ ) pada kedalaman *crown* terowongan diperoleh nilai kenaikan tegangan vertikal ( $\Delta\sigma_{z2}$ ) sebesar  $9,36 \text{ kN/m}^2$ .

Karena nilai masukan beban dalam pemodelan GEO5 merupakan gaya per satuan panjang arah luar bidang ( $\text{kN/m}$ ) maka hasil dari perhitungan distribusi tegangan vertikal tanah akibat beban ( $\Delta\sigma_z$ ) dikalikan dengan nilai  $b$ , dengan nilai  $b$  yang diperhitungkan sebesar  $1 \text{ m}$  untuk pemodelan dalam program GEO5 seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 3.18.

$$\Delta Q = \Delta\sigma_z \times b \quad (3.18)$$

dengan,

$$\Delta\sigma_z = \text{Kenaikan tegangan vertikal (kN/m}^2\text{)}$$

$$b = 1 \text{ m.}$$

Dari hasil perhitungan, diperoleh nilai distribusi beban permukaan pada titik *crown* terowongan ( $\Delta Q_1$ ) sebesar  $35,46 \text{ kN/m}$ , sedangkan nilai distribusi beban gempa pada titik *crown* terowongan ( $\Delta Q_2$ ) sebesar  $9,36 \text{ kN/m}$ .

Untuk rangkuman desain pembebanan yang akan digunakan dalam analisis pemodelan GEO5, ditunjukkan pada Tabel 3.30.

Tabel 3. 30 Rangkuman Desain Beban Pemodelan GEO5

Jenis Beban	Ket.	Model	Detail	Satuan
<b>Beban Permanen :</b>				
Berat Tunnel	W	<i>Self-Weight</i>	118.75	kN/m
Beban Permukaan (Beban Eksiting)	S	<i>Force-Permanent</i>	35.46	kN/m
<b>Beban Sementara :</b>				
Beban Gempa MDE	E	<i>Accident-Imposed</i>	9.36	kN/m

## 2. Nilai Faktor Beban dan Desain Kombinasi Beban

Nilai faktor beban mengacu pada data dari pihak proyek yang ditunjukkan pada Tabel 3.31, dimana untuk nilai faktor beban kondisi non-seismik yang digunakan oleh pihak proyek mengacu pada peraturan *British Standard (BS 8110 : Part 1 1985)* tentang *Structural Use of Concrete Design*, sedangkan untuk nilai faktor beban kondisi seismik atau kondisi gempa mengacu pada metode yang diusulkan oleh Wang (1993) dalam *Seismic Design of Tunnel*.

Tabel 3. 31 Nilai Faktor Beban Pemodelan GEO5

Beban	Ket.	Non-seismik		Seismik
		(BS 8110, 1985)		(Wang, 1993)
		SLS	ULS	MDE
Berat Struktur	W	1.0	1.5	1.0
Beban Permukaan	S	1.0	1.6	1.0
Beban Gempa	E	-	-	1.0

Untuk desain kombinasi beban mengacu pada desain kombinasi pembebanan yang digunakan oleh pihak proyek yang ditunjukkan pada Tabel 3.32.

Tabel 3. 32 Desain Kombinasi Beban Pemodelan GEO5

Kombinasi	Kondisi	Detail Kombinasi Beban
LC 1	SLS	LC 1 = 1.0 W + 1.0 S
LC 2	ULS	LC 2 = 1.5 W + 1.6 S
LC 3	MDE	LC 3 = 1.0 W + 1.0 S + 1.0 E

Keterangan :

SLS = *Service Limit State* (Beban Layan)

ULS = *Ultimate Limit State* (Beban Ultimit)

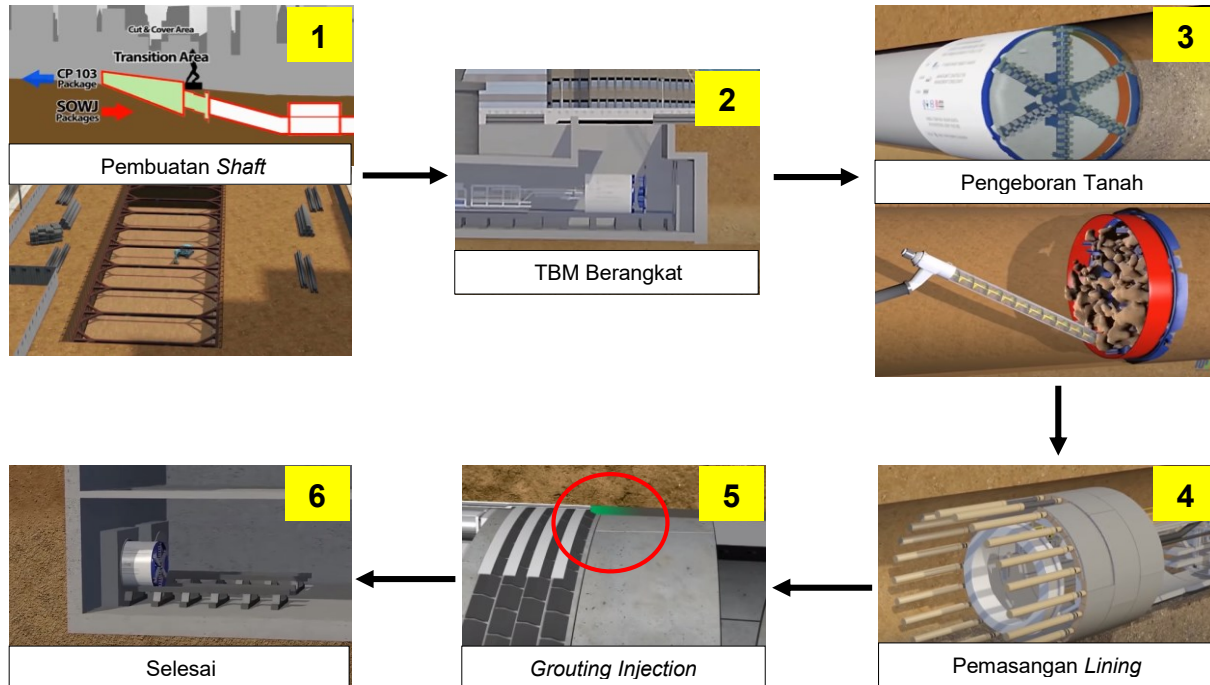
MDE = Beban Gempa

### 3.7. Profil TBM

Dalam pelaksanaan konstruksi terowongan MRT Jakarta, Jenis TBM yang digunakan merupakan TBM tipe *Eearth Pressure Balanced Shield* (EPB-S) dengan profil TBM ditunjukkan pada Tabel 3.33 dan sketsa metode pelaksanaan konstruksi terowongan ditunjukkan pada Gambar 3.19.

Tabel 3. 33 Data Profil Alat TBM MRT Jakarta

No	Item	Detail
1	Tipe TBM	TBM Tipe EPB
2	Diameter TBM ( $D_{TBM}$ )	6.69 m
3	Panjang TBM	11.955 m
4	Kemajuan Pengeboran	12 - 18 m/hari
5	<i>Maximum Grouting Pressure</i>	600 kN/m <sup>2</sup>

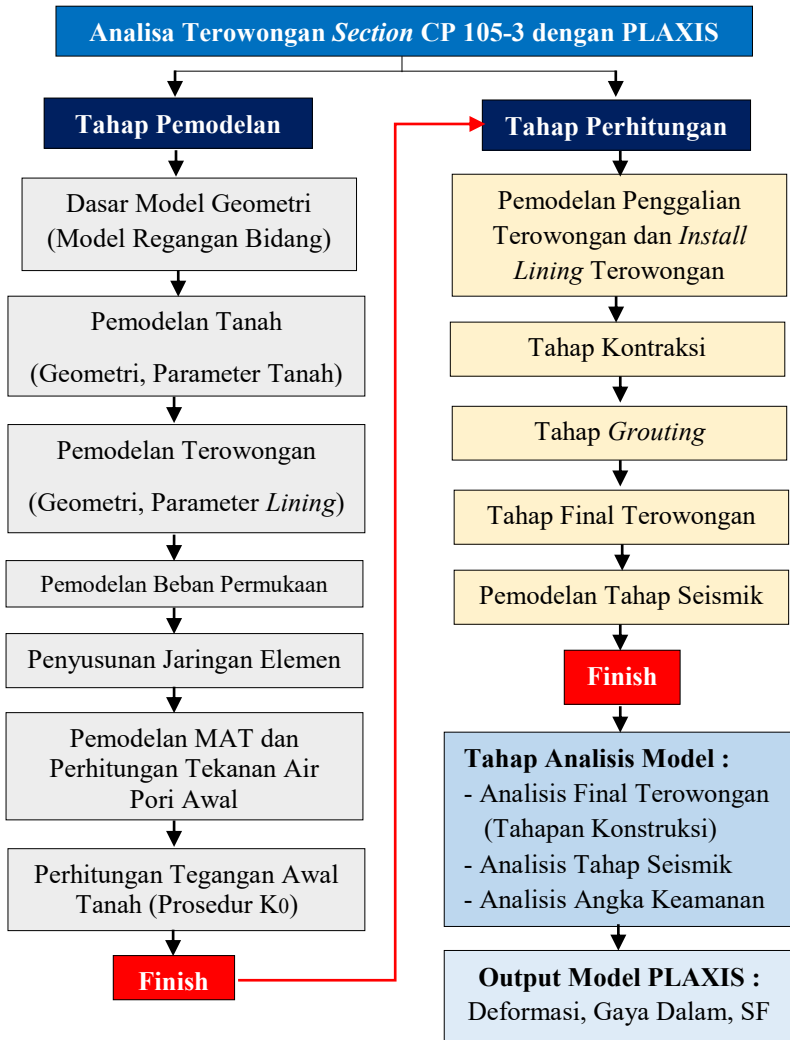


Gambar 3. 19 Alur proses konstruksi terowongan

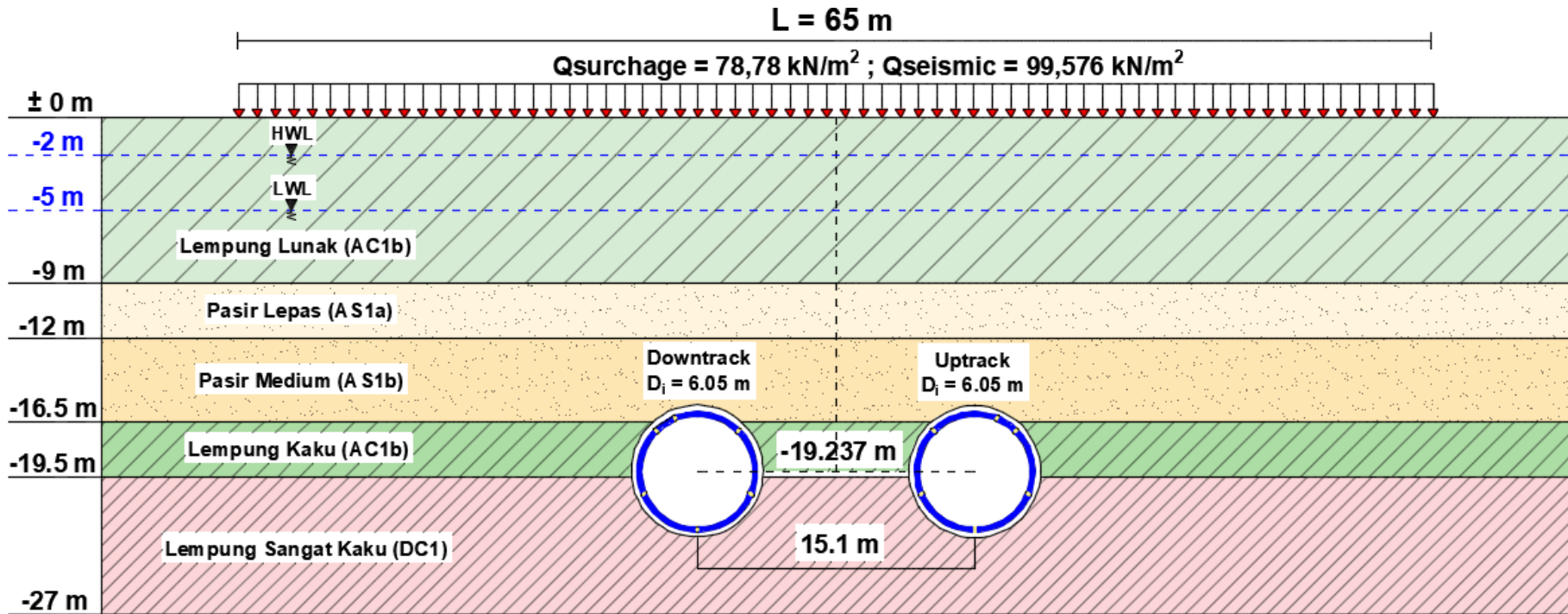
(Sumber : <https://www.youtube.com/watch?v=-ojEXp8COwk&t=685s>)

### 3.8. Pemodelan Terowongan dengan PLAXIS

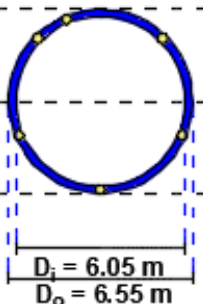
Tahap analisa terowongan *section* CP 105-3 pada arah melintang dengan program Plaxis 2D v.20 sebagai berikut:



Gambar 3. 20 Analisis terowongan CP 105-3 dengan Plaxis



Gambar 3. 21 Basis pemodelan terowongan dengan Plaxis

Terowongan CP 105 Section 3 (Parameter Pemodelan PLAXIS 2D v.20)							
Kedalaman	BH 105-9 N-SPT, (blow/ft) 0 10 20 30 40 50	Desain MAT	Jenis Tanah dan Parameter Umum	Parameter Kuat Geser Tanah	Parameter Kekakuan Tanah	Koefisien Tekanan Tanah At-Rest dan Permeabilitas Tanah	Pemodelan Terowongan (Cross Section)
± 0 m	GL	FWL					
-2 m		HWL	Lempung Lunak (AC1a) N = 5 $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$	$\phi' = 0$ $c_u = 30 \text{ kPa}$	$E' = 6.25 \text{ MPa}$ $\nu = 0.3$	$K_0 = 0.531$ $k = 0.00864 \text{ m/hr}$	<b>Parameter Lining :</b> Model = Plate EA = 8291871 kN/m EI = 40295.29 kNm <sup>2</sup> /m $\nu = 0.2$ W = 5.771 kN/m $V_L = 0.5 \%$ Join = Hinge (Free)
-5 m		LWL					
-9 m							
-12 m			Pasir Lepas (AS1a) N = 5 $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$	$\phi' = 30^\circ$ $c' = 0$	$E' = 10 \text{ MPa}$ $\nu = 0.3$	$K_0 = 0.500$ $k = 0.864 \text{ m/hr}$	<b>Beban :</b> Q surcharge = 78.779 kN/m <sup>2</sup> Q seismic = 99.576 kN/m <sup>2</sup>  
-16.5 m			Pasir Medium (AS1b) N = 13 $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$	$\phi' = 32^\circ$ $c' = 0$	$E' = 26 \text{ MPa}$ $\nu = 0.3$	$K_0 = 0.470$ $k = 0.864 \text{ m/hr}$	
-19.5 m			Lempung Kaku (AC1b) N = 15 $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$	$\phi' = 0$ $c_u = 90 \text{ kPa}$	$E' = 30 \text{ MPa}$ $\nu = 0.3$	$K_0 = 0.531$ $k = 0.00864 \text{ m/hr}$	
-27 m			Lempung Sangat Kaku (DC1) N = 25 $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$	$\phi' = 0$ $c_u = 150 \text{ kPa}$	$E' = 50 \text{ MPa}$ $\nu = 0.3$	$K_0 = 0.470$ $k = 0.00864 \text{ m/hr}$	

Gambar 3. 22 Parameter-parameter pemodelan Plaxis

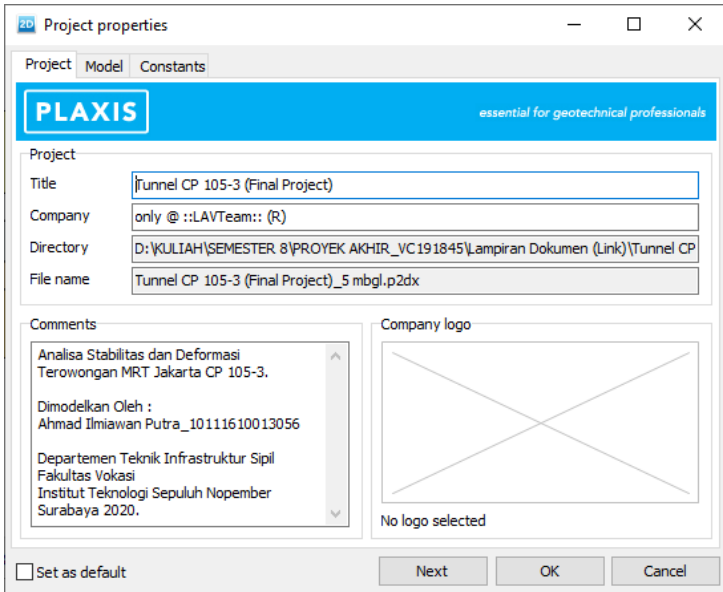


### 3.8.1. Memulai Proyek Baru

Tahap awal dalam pemodelan terowongan CP 105-3 pada arah melintang dengan Plaxis 2D v.20 sebagai berikut:

#### 1. *Project Properties*

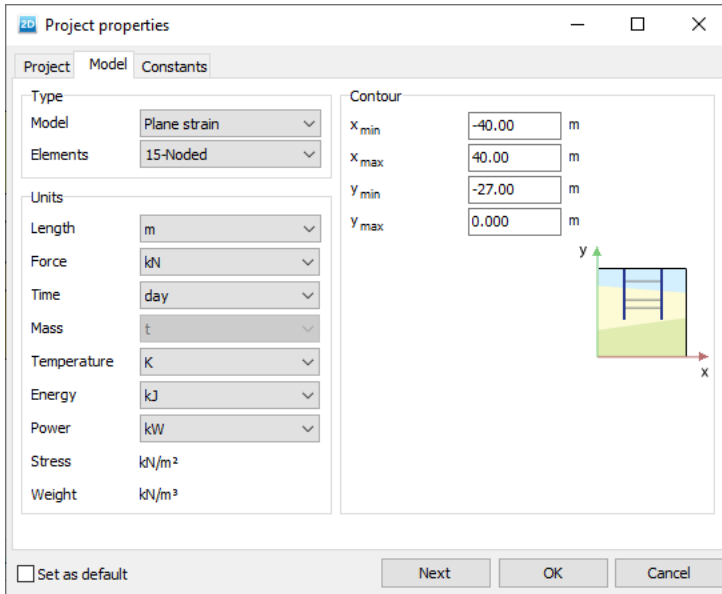
Pada lembar *project properties* berisi informasi umum *project* seperti nama file, lokasi file, dan lainnya.



Gambar 3. 23 Informasi umum *project properties* Plaxis

#### 2. Domain Model Geometri

Pemodelan terowongan dalam Plaxis ini menggunakan model geometri regangan bidang (*plane strain*) dengan elemen dasar 15 titik nodal. Panjang dari domain model adalah 80 m dan ketebalan dari domain model adalah 27 m dengan  $X_{min} = -40$  m;  $X_{maks} = 40$  m;  $Y_{min} = -27$  m;  $Y_{maks} = 0$  m.



Gambar 3. 24 Domain model geometri

### 3.8.2. Pemodelan Tanah

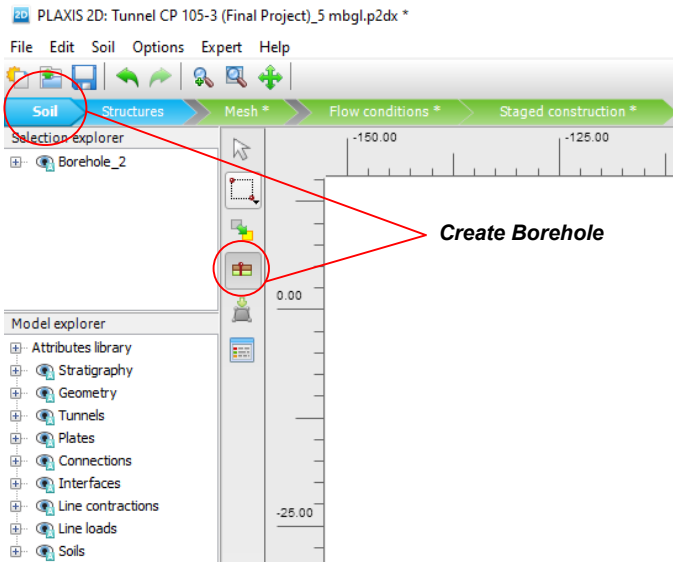
Pemodelan tanah terdiri dari dua tahap, tahap pertama yaitu pemodelan geometri dari lapisan-lapisan tanah dan tahap kedua yaitu *input* data material tanah atau data parameter-parameter tanah. Untuk detail pemodelan tanah pada program Plaxis 2D v.20 sebagai berikut:

#### 1. Pemodelan Geometri Lapisan Tanah

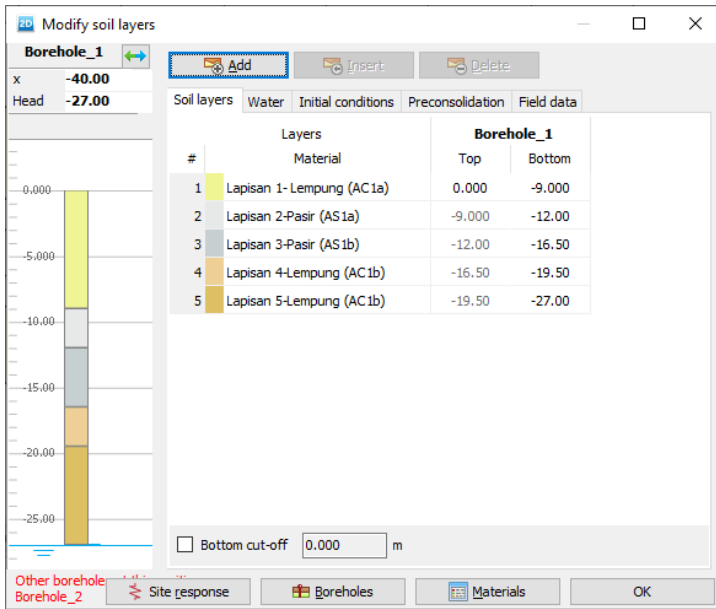
Pemodelan geometri lapisan-lapisan tanah dengan cara *create borehole* pada menu *soil*. Tebal lapisan-lapisan tanah yang dimodelkan sesuai dengan desain tebal lapisan yang dapat dilihat pada Tabel 3.34.

Tabel 3. 34 Gometri Lapisan Tanah Model Plaxis

Lap.	Jenis Tanah	Kedalaman	Tebal	Model Borehole	
		(mbgl)	(m)	Top	Bottom
1	Lempung Lunak	0 - 9	9	0	-9
2	Pasir Lepas	9 -12	3	-9	-12
3	Pasir Medium	12 - 16.5	4.5	-12	-16.5
4	Lempung Kaku	16.5 - 19.5	3	-16.5	-19.5
5	Lempung Sangat Kaku	19.5 - 27	7.5	-19.5	-27

Gambar 3. 25 Menu *input* geometri tanah pada Plaxis

Setelah dilakukan *create borehole*, kemudian geometri lapisan-lapisan tanah (Tabel 3.34) di-*input* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.26.



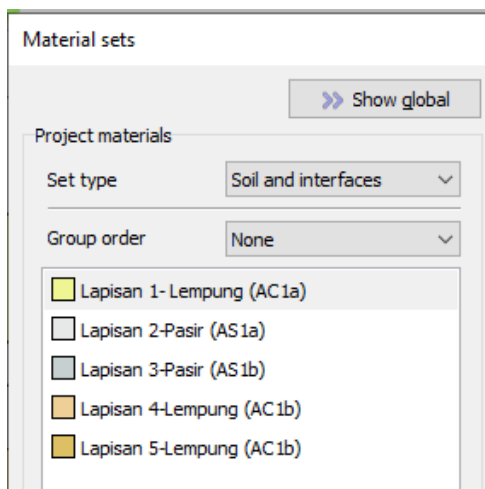
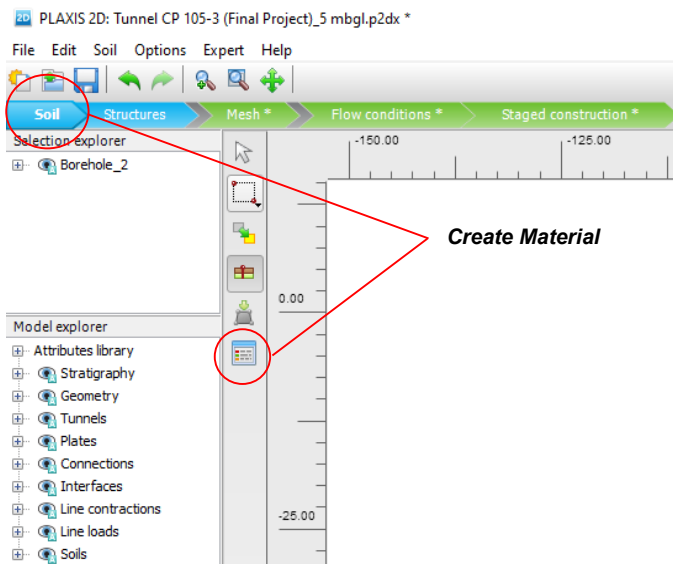
Gambar 3. 26 Pemodelan geometri lapisan tanah

## 2. *Input* Data Material Tanah

Setelah pemodelan geometri lapisan-lapisan tanah, langkah selanjutnya yaitu *input* data material tanah. Data material tanah atau data parameter tanah yang di-*input* sesuai dengan tabel rangkuman parameter-parameter tanah *input* Plaxis pada tabel (3.20) yang telah didefinisikan pada Sub-bab 3.3.

Data material yang di-*input* seperti data parameter umum tanah, parameter kekakuan tanah (Modulus Young dan Angka Poisson), parameter kekuatan geser tanah (Sudut Geser Tanah, Kohesi, dan Kuat Geser Tanah) dan parameter koefisien tekanan tanah *at-rest* (untuk perhitungan prosedur  $K_0$ ) dan data lainnya.

Untuk langkah-langkah *input* data material tanah sebagai berikut:



Gambar 3. 27 Menu *input* material tanah pada Plaxis

Kemudian parameter-parameter tanah di-*input* sesuai data parameter dari masing-masing lapisan tanah sebagai berikut:

Soil - Mohr-Coulomb - Lapisan 1- Lempung (AC1a)

General Parameters Groundwater Thermal Interfaces Initial

Property	Unit	Value
<b>Material set</b>		
Identification		Lapisan 1- Lempung (AC1a)
Material model		Mohr-Coulomb
Drainage type		Undrained (B)
Colour		RGB 240, 245, 148
Comments		
<b>General properties</b>		
$V_{unsat}$	kN/m <sup>3</sup>	16.00
$V_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	16.00

Next OK Cancel

---

Soil - Mohr-Coulomb - Lapisan 1- Lempung (AC1a)

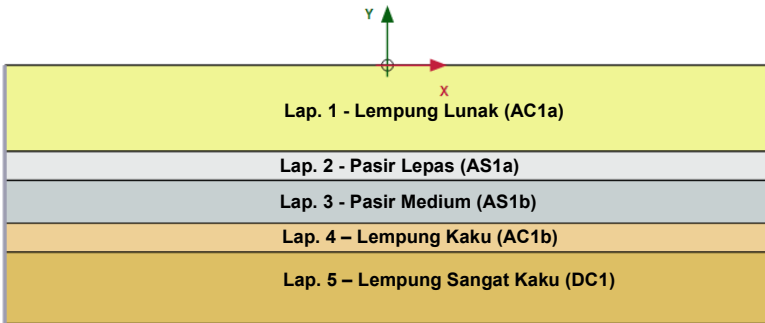
General Parameters Groundwater Thermal Interfaces Initial

Property	Unit	Value
<b>Stiffness</b>		
$E'$	kN/m <sup>2</sup>	6250
$\nu'$ ( $\nu_u$ )		0.3000
<b>Alternatives</b>		
G	kN/m <sup>2</sup>	2404
$E_{oed}$	kN/m <sup>2</sup>	8413
<b>Strength</b>		
$s_{u,ref}$	kN/m <sup>2</sup>	30.00
$\Phi_u$ ( $\phi$ )	°	0.000
$\psi$ ( $\psi$ )	°	0.000

Next OK Cancel

Gambar 3. 28 *Input* parameter tanah pada Plaxis

Untuk hasil akhir dari pemodelan tanah pada Plaxis ditunjukkan pada gambar sebagai berikut:



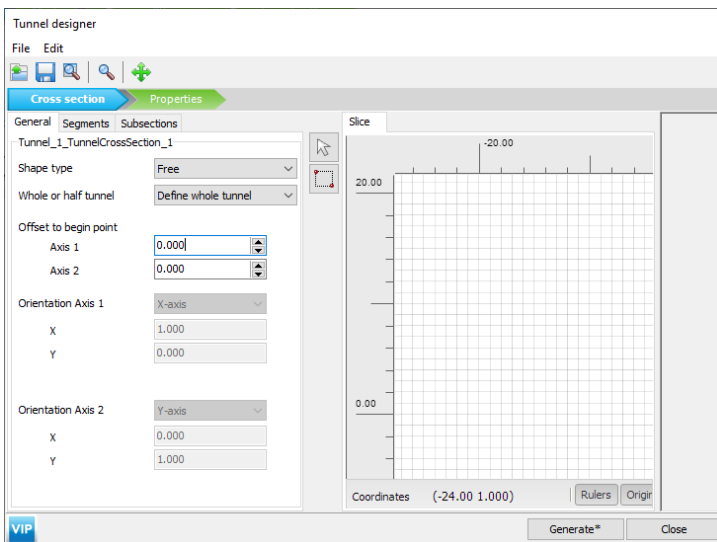
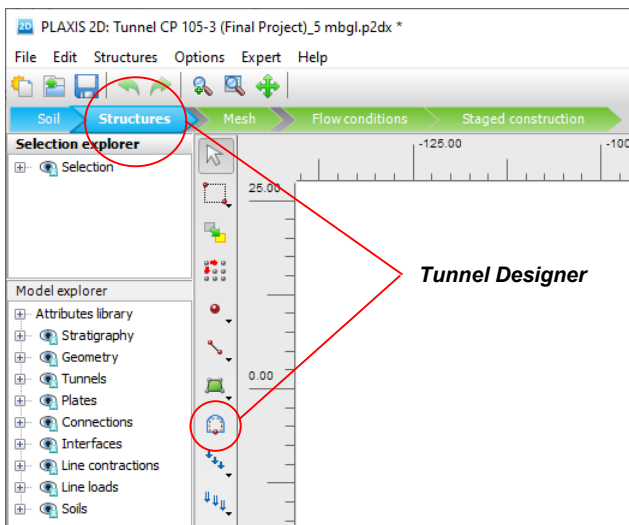
Gambar 3. 29 Hasil pemodelan tanah pada Plaxis

### 3.8.3. Pemodelan Struktur Terowongan

Pemodelan struktur terowongan arah melintang pada Plaxis 2D v.20 terdiri dari tahapan pemodelan sebagai berikut:

- Pemodelan geometri *lining* terowongan
- Input data properti *lining* terowongan
- Pemodelan join antar segmen *lining* terowongan

Pada program Plaxis 2D v.20 mempunyai menu khusus (*Tunnel Designer*) dalam memodelkan struktur terowongan. Terowongan yang dimodelkan merupakan terowongan kembar (Terowongan *Downtrack* dan Terowongan *Uptrack*) dimana terowongan *downtrack* terletak di sebelah kiri model dan terowongan *uptrack* terletak di sebelah kanan model. Pada dasarnya kedua terowongan tersebut sama, yang membedakan adalah konfigurasi sudutnya, dimana sudut segmen kunci terowongan *downtrack* terletak di sisi kiri model geometri terowongan dan sudut terowongan *uptrack* terletak di sisi kanan model geometri terowongan. Jarak antar kedua terowongan sebesar 15,1 m dari titik axis masing-masing terowongan.



Gambar 3. 30 Menu "Tunnel Designer" Plaxis 2D v.20

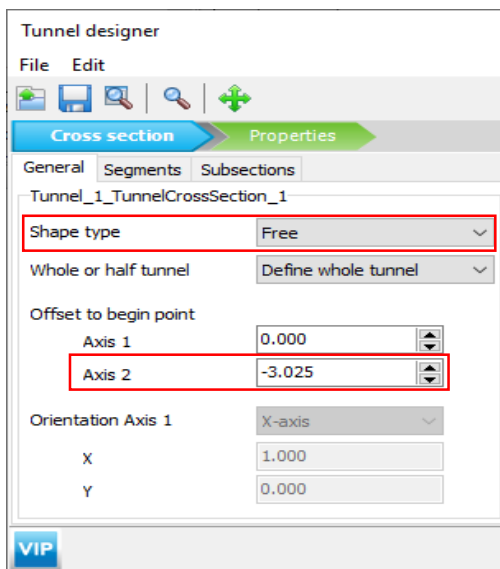


## 1. Pemodelan Geometri Terowongan

Terowongan MRT Jakarta merupakan terowongan dengan material struktur beton pra-cetak, maka dari itu pemodelan geometri terowongan dimodelkan dengan segmen-segmen *lining* terowongan (tidak monolit) agar pemodelan lebih akurat. Sudut tiap segmen *lining* ditunjukkan pada Tabel 3.35.

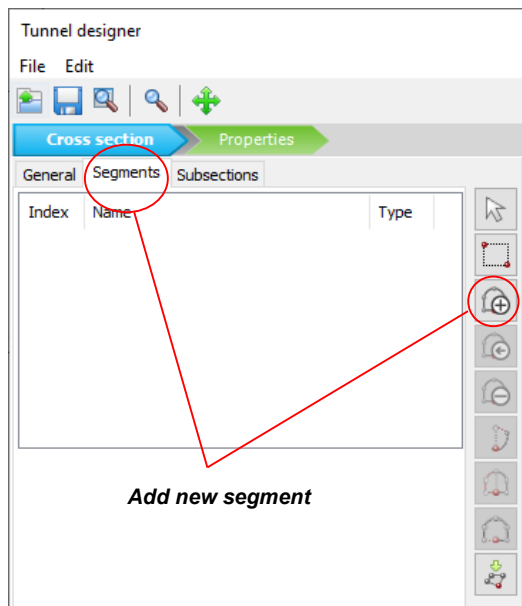
Tabel 3. 35 Sudut Tiap Segmen *Lining*

Join	Segmen	<i>Downtrack</i>	<i>Uptrack</i>
		deg	deg
1	Segmen 1	67.5	67.5
2	Segmen 2	67.5	67.5
3	Segmen 3	67.5	67.5
4	Segmen 4	67.5	67.5
5	Segmen 5	67.5	67.5
6	Segmen K	22.5	22.5



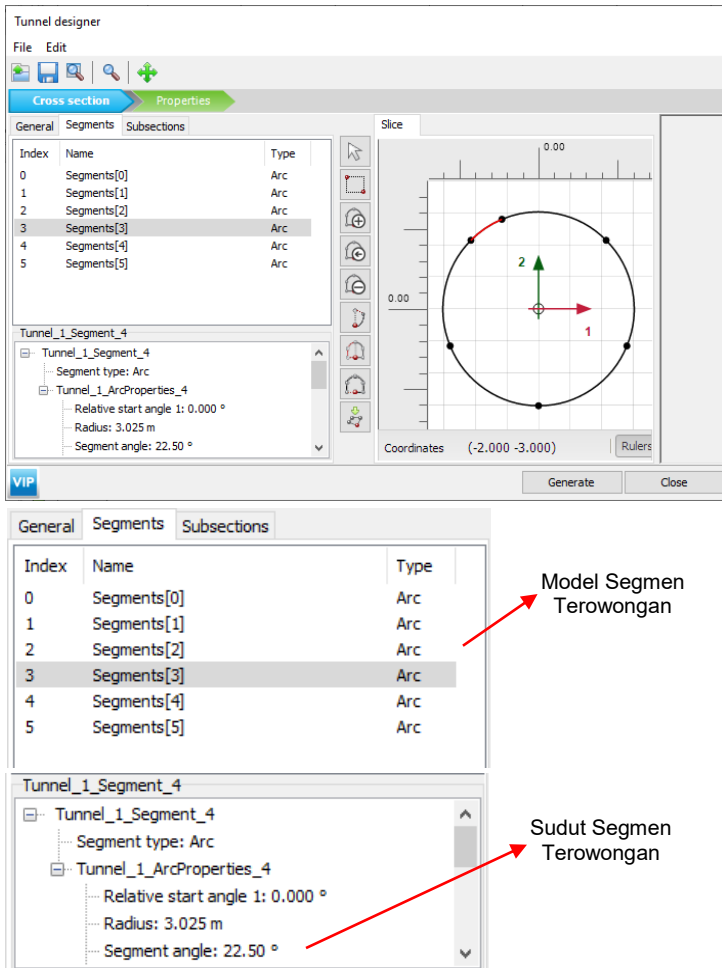
Gambar 3. 31 Pemodelan geometri terowongan

Pemodelan geometri terowongan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.31, dimana *shape type* diatur menjadi *free* agar dalam proses pemodelan geometri, segmen-segmen *lining* dapat dimodelkan secara manual sesuai sudut masing-masing segmen. Titik as model di-*input* sebesar -3.025 m sesuai dengan jari-jari dalam terowongan ( $r_o$ ). Pemodelan segmen-segmen *lining* terowongan sebagai berikut:



Gambar 3. 32 Membuat model segmen baru

Setelah dipilih *add new segment*, kemudian jari-jari dalam terowongan ( $r_o$ ) di-*input* sebesar 3.025 m dan segmen terowongan dimodelkan dengan jumlah 6 segmen (5 segmen utama dengan sudut  $67.5^\circ$  dan 1 segmen kunci dengan sudut  $22.5^\circ$ ).



Gambar 3. 33 Pemodelan segmen terowongan

Contoh pemodelan segmen di atas merupakan model segmen terowongan *downtrack* dimana lokasi sudut segmen kunci berada di sisi sebelah kiri model terowongan.

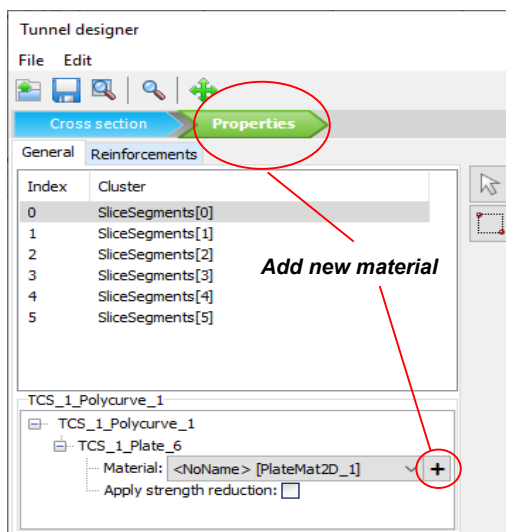
## 2. *Input Data Properti Terowongan*

*Input data properti terowongan* terdiri dari *input data material lining*, *negative interface*, dan nilai kontraksi pada dinding terowongan. Properti *negative interface* pada model digunakan untuk memodelkan sifat material terowongan yang *impermeable* dan juga untuk memodelkan reaksi terowongan dengan tanah di sekitarnya. Untuk nilai kontraksi terowongan digunakan untuk memodelkan kehilangan tanah (*volume loss*) akibat konstruksi terowongan.

### a) *Input Data Material Lining*

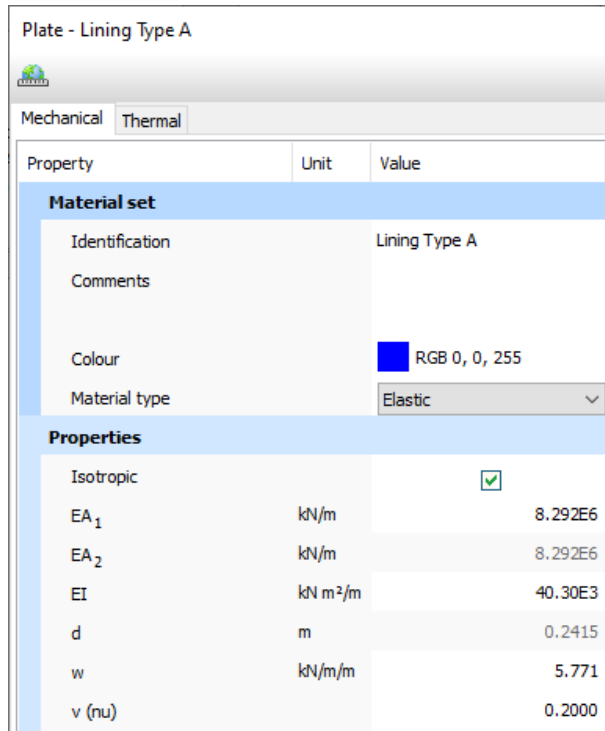
Langkah dalam *input data material lining* sebagai berikut:

- Langkah pertama yaitu menambahkan data material baru untuk struktur terowongan dengan cara memilih menu “*Properties*” kemudian dipilih “*add new material*” seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 3. 34 Membuat data material *lining*

- *Lining* terowongan dimodelkan sebagai *plate* dengan tipe material elastis. Data material *lining* kemudian di-input sesuai dengan data parameter-parameter struktur *lining* terowongan. Parameter yang di-input seperti parameter kekakuan *lining* ( $EA$  dan  $EI$ ), rasio Poisson beton ( $\nu$ ), dan berat struktur *lining* terowongan ( $w$ ).

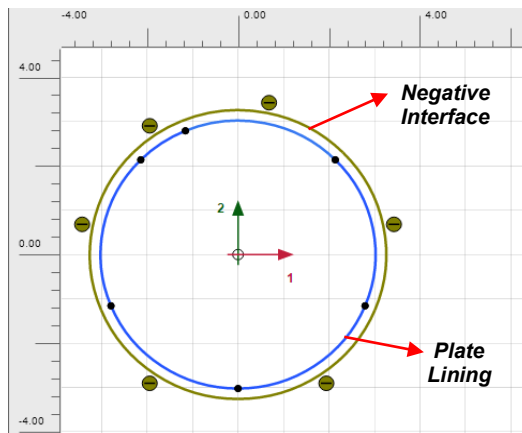
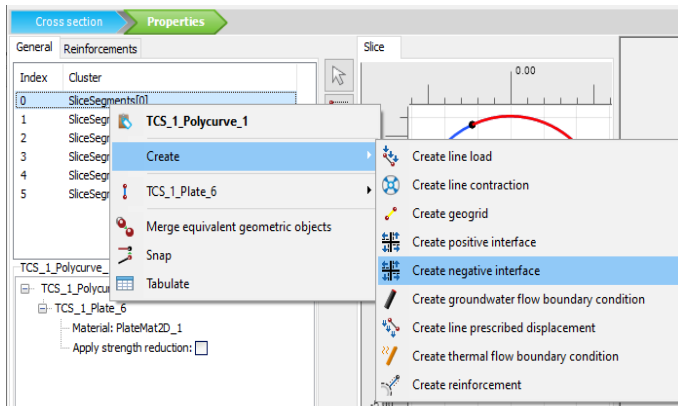


Property	Unit	Value
<b>Material set</b>		
Identification		Lining Type A
Comments		
Colour		RGB 0, 0, 255
Material type		Elastic
<b>Properties</b>		
Isotropic		<input checked="" type="checkbox"/>
$EA_1$	kN/m	8.292E6
$EA_2$	kN/m	8.292E6
$EI$	kN m <sup>2</sup> /m	40.30E3
$d$	m	0.2415
$w$	kN/m/m	5.771
$\nu$ (nu)		0.2000

Gambar 3. 35 Input parameter *lining* terowongan

b) Pemodelan *Negative Interface*

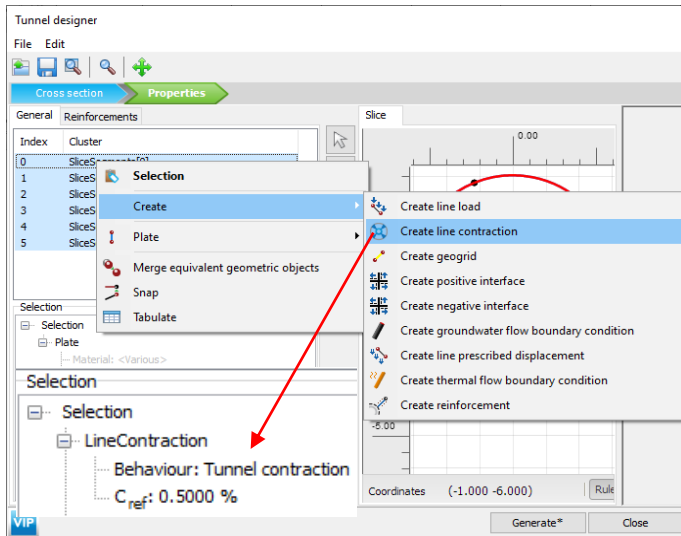
Pemodelan *negative interface* pada model struktur *lining* terowongan sebagai berikut:



Gambar 3. 36 Pemodelan *negative interface* terowongan

c) *Input* Nilai Kontraksi pada Model Terowongan

Nilai kontraksi dinding terowongan yang di-*input* pada pemodelan sebesar 0,5 % sesuai dengan data parameter terowongan yang telah didefinisikan. Pemberian nilai kontraksi diaplikasikan pada semua segmen-segmen *lining* terowongan. Untuk pemodelannya sebagai berikut:



Gambar 3. 37 Input nilai kontraksi lining terowongan

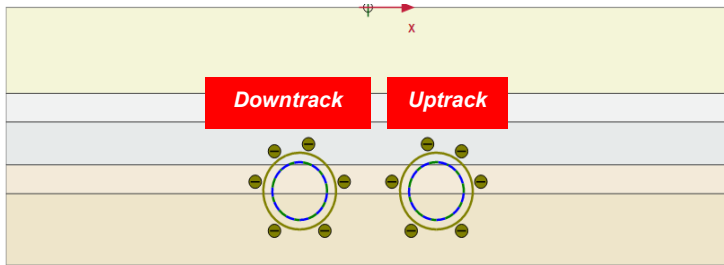
### 3. Pemodelan Posisi Kedalaman Terowongan

Pemodelan posisi kedalaman terowongan *downtrack* (Tunnel 1) dan terowongan *uptrack* (Tunnel 2) pada model tanah adalah sama yaitu sebesar 19,237 mbgl dan jarak antar kedua terowongan pada titik axis terowongan sebesar 15,1 m.



Gambar 3. 38 Model kedalaman terowongan

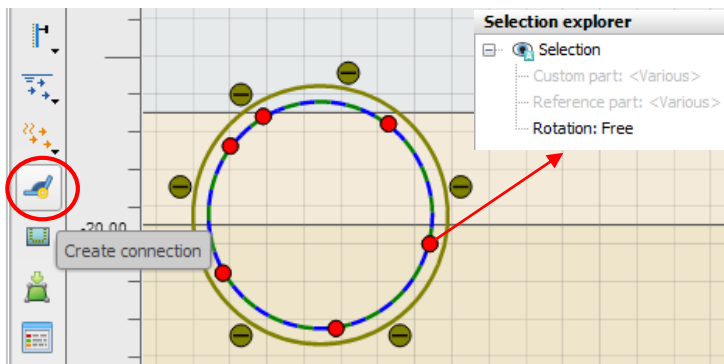
Setelah pemodelan posisi kedalaman terowongan, kemudian model terowongan diaplikasikan ke model tanah.



Gambar 3. 39 Penempatan terowongan pada model tanah

#### 4. Pemodelan Join Antar Segmen Terowongan

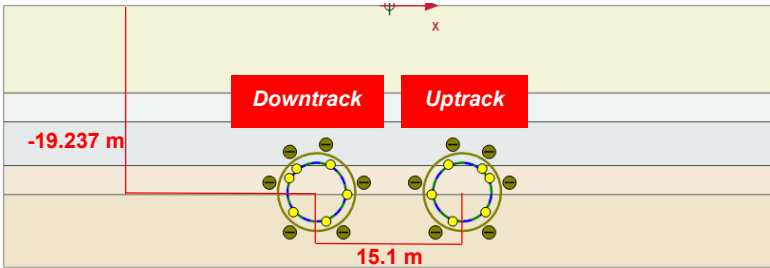
Join antar segmen *lining* terowongan, dimodelkan sebagai sendi (*free rotation-fixed moved*) dengan cara memberi *connection* pada diskontinuitas antar segmen *lining*.



Gambar 3. 40 Pemodelan join *lining*

Hasil akhir pemodelan struktur terowongan dari semua tahapan dapat dilihat pada gambar sebagai berikut:

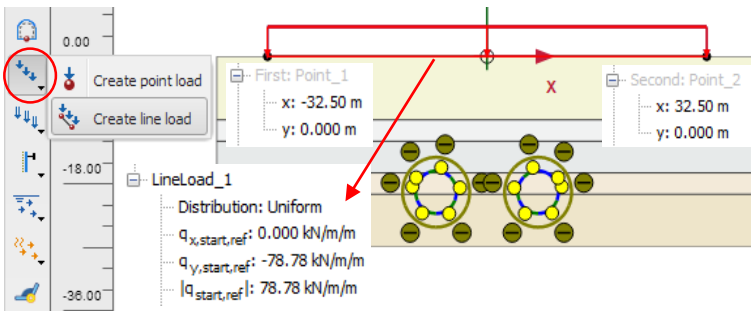




Gambar 3. 41 Hasil pemodelan struktur terowongan pada Plaxis

### 3.8.4. Pemodelan Beban Permukaan

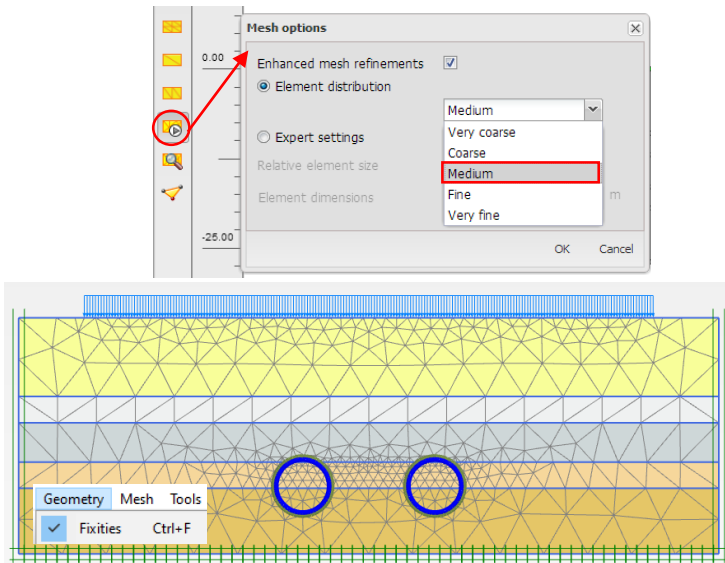
Beban dimodelkan sebagai beban garis terdistribusi merata dengan sepanjang 65 m sesuai dengan panjang bangunan eksiting yang ada dipermukaan tanah dengan nilai beban permukaan sebesar  $78,779 \text{ kN/m}^2$ .



Gambar 3. 42 Pemodelan beban permukaan pada Plaxis

### 3.8.5. Penyusunan Jaringan Elemen dan Kondisi Batas

Jaringan elemen yang digunakan dalam pemodelan ini pada tingkat kekasaran sedang (medium). Setelah dilakukan penyusunan jaringan elemen kemudian ditetapkan kondisi batas pemodelan, kondisi batas yang dipakai adalah *Standard Fixities* (Jepit Standar) dimana Plaxis secara otomatis akan menetapkan kondisi batas agar perilaku pemodelan serealistik mungkin.

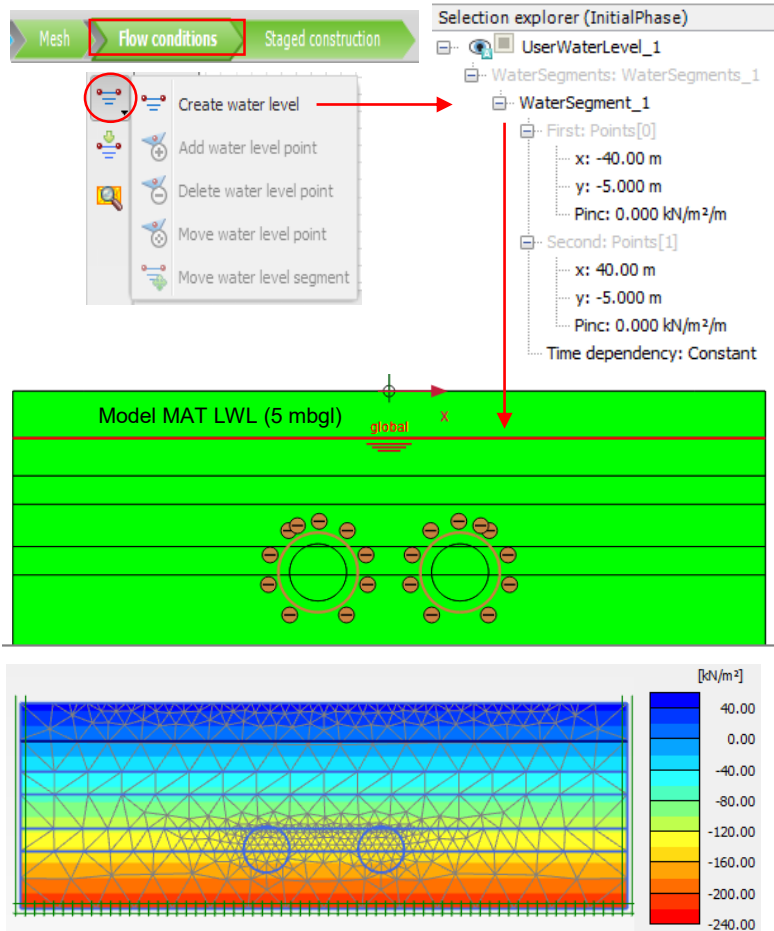


Gambar 3. 43 Penyusunan jaringan elemen

### 3.8.6. Pemodelan MAT dan Perhitungan Tekanan Air Pori

Dalam tahap *flow conditions*, kedalaman muka air tanah dimodelkan dengan cara *create water level*. Muka air tanah dalam analisa ini dimodelkan pada kedalaman 5 mbgl (LWL), 2 mbgl (HWL), dan 0 mbgl (FWL) dan menjadi variabel analisa dalam pemodelan ini. Kemudian setelah pemodelan MAT, dilakukan perhitungan tekanan air pori awal. Dalam memodelkan masing-masing kedalaman muka air tanah (MAT), pemodelan dilakukan secara terpisah atau dilakukan pada file yang berbeda. Hal ini dilakukan untuk mengurangi risiko kesalahan ketika pemodelan.

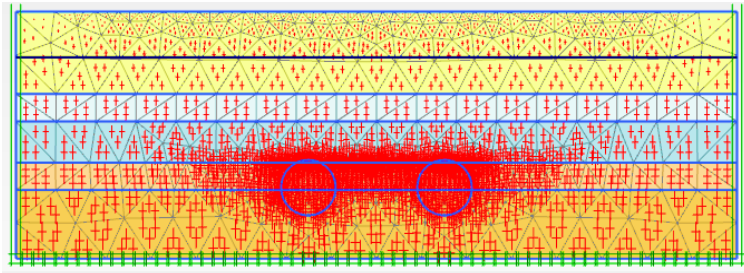
Untuk contoh dalam pemodelan in digunakan model muka air tanah (MAT) pada kondisi LWL (5 mbgl).



Gambar 3. 44 Pemodelan MAT dan perhitungan tekanan air pori

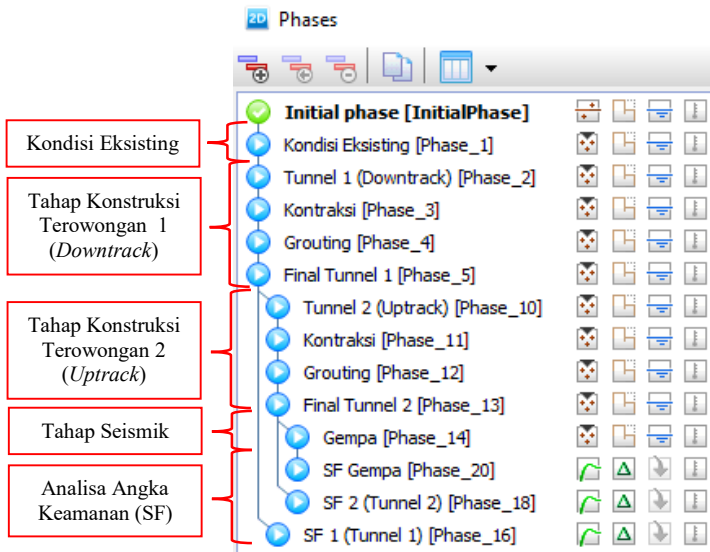
### 3.8.7. Tahap Prosedur $K_0$ (*Initial Phase*)

Dalam tahap ini digunakan untuk menganalisis tegangan efektif awal pada model, perhitungan analisis tersebut dapat dilakukan secara otomatis oleh Plaxis menggunakan nilai  $K_0$  yang telah dimasukkan pada data material tanah.

Gambar 3. 45 Tahap *initial phase*

### 3.8.8. Tahap Perhitungan (*Construction Stage*)

Pada tahap perhitungan, pemodelan tahap-tahap konstruksi terowongan, jenis analisis yang digunakan adalah analisis plastis dengan pembebanan secara bertahap dan analisis untuk perhitungan angka keamanan (SF) menggunakan jenis analisis *safety*.

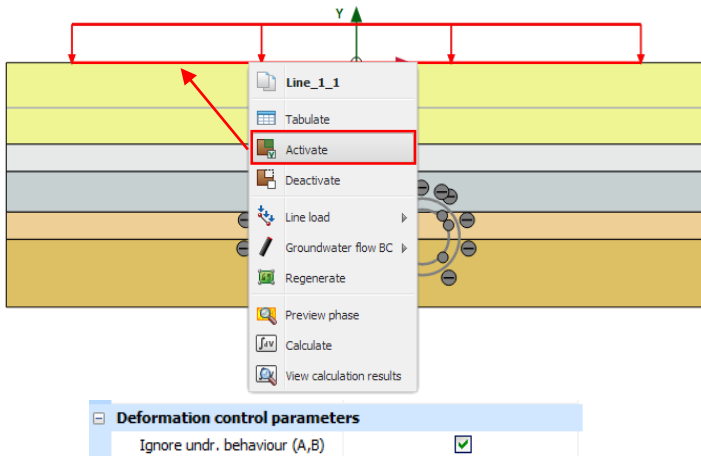


Gambar 3. 46 Tahap perhitungan analisa pada Plaxis

Pemodelan tahap-tahap perhitungan (*construction stage*) sebagai berikut:

### 1. Tahap Kondisi Eksisting

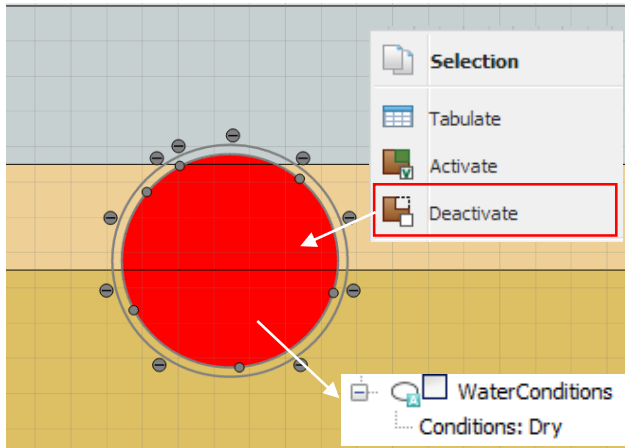
Tahap kondisi eksisting merupakan tahap awal sebelum pengeboran terowongan. Pada tahap ini, beban permukaan pada model diaktifkan dan pada lembar *deformation control parameter*, pilihan *ignore undrained behaviour* diaktifkan untuk kasus pemodelan yang menggunakan perilaku drainase tanah *Undrained B*.



Gambar 3. 47 Tahap kondisi eksisting

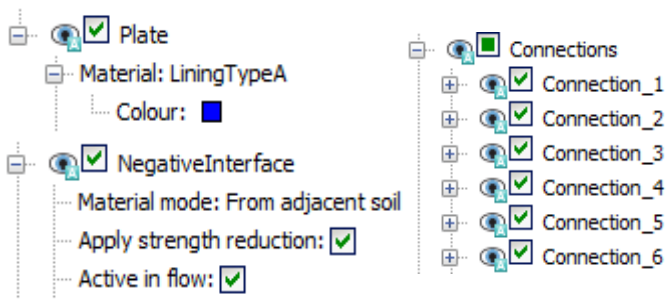
### 2. Tahap Pengeboran Terowongan *Downtrack*

Tahap pengeboran terowongan *downtrack* merupakan tahap pemodelan pengeboran terowongan dan pemasangan dinding-dinding terowongan. Pada tahap ini, klaster-klaster tanah yang ada di dalam terowongan di-nonaktifkan dan klaster tersebut diatur menjadi klaster kering untuk menghilangkan tekanan air pori di dalam terowongan.



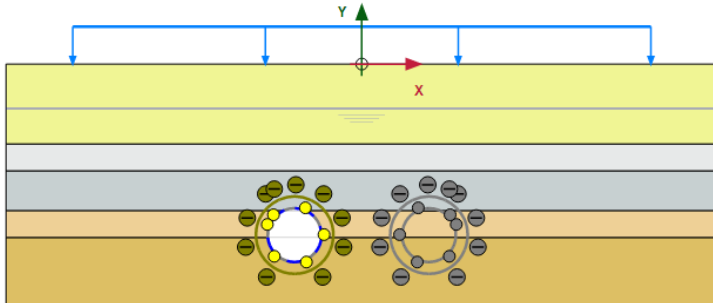
Gambar 3. 48 Deaktifasi klaster tanah di dalam terowongan

Kemudian properti *lining* terowongan diaktifkan seperti struktur terowongan, *negative interface*, dan join-join antar segmen *lining* terowongan. Pada tahap ini, perpindahan diatur menjadi nol, agar deformasi yang didapat pada akhir analisa perhitungan merupakan deformasi akibat terowongan saja.



Gambar 3. 49 Aktivasi properti *lining*

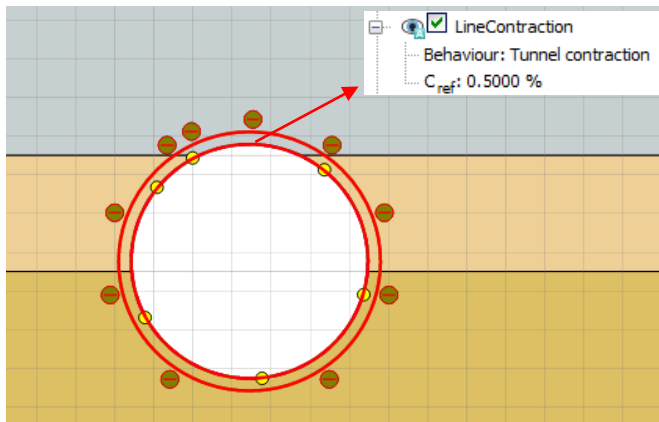
Hasil dari pemodelan konstruksi terowongan *downtrack* dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 3. 50 Pemodelan konstruksi terowongan *downtrack*

### 3. Tahap Kontraksi Terowongan *Downtrack*

Pada tahapan ini, nilai kontraksi pada dinding terowongan diaktifkan. Tahap kontraksi ini untuk memodelkan kehilangan volume tanah (*volume loss*) akibat konstruksi terowongan.



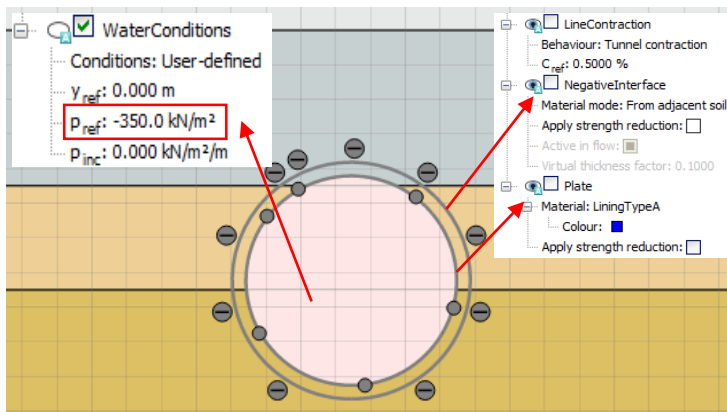
Gambar 3. 51 Tahap pemodelan kontraksi terowongan

### 4. Tahap *Grouting* Terowongan *Downtrack*

Tahap *grouting* ini memodelkan pemberian bahan *grouting* (*grouting injection*) untuk mengisi celah (*gap*) antara dinding

terowongan dengan tanah setelah proses pengeboran dengan TBM. Pada tahap ini, dimodelkan dengan cara memberi tekanan *grouting* ke arah klaster tanah di sekitar terowongan. Besarnya tekanan *grouting* yang diaplikasikan mengacu pada tekanan *grouting* maksimum ( $P_{g\ maks}$ ) yang dapat dilihat pada data profil TBM yaitu sebesar  $600\text{ kN/m}^2$ . Tekanan *grouting* yang dimodelkan pada Plaxis merupakan hasil coba-coba dalam rentang  $100 - 600\text{ kN/m}^2$  dan dipakai nilai *grouting* sebesar  $350\text{ kN/m}^2$ .

Pada tahap ini, klaster tanah yang ada di dalam terowongan dipilih dan diberi tekanan *grouting* yang terdistribusi merata ke arah tanah di sekitar area terowongan, sedangkan dinding terowongan, *negative interface*, dan nilai kontraksi di-nonaktifkan sementara.

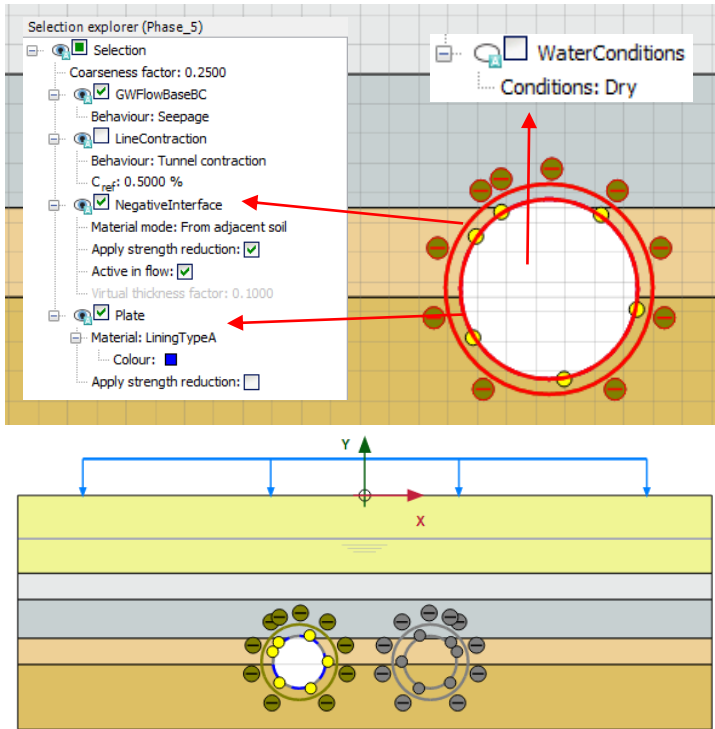


Gambar 3. 52 Tahap pemodelan *grouting*

##### 5. Tahap Final Terowongan *Downtrack*

Pada tahap final ini, dinding-dinding terowongan, join antar segmen, dan *negative interface* diaktifkan kembali, sedangkan nilai kontraksi tetap di-nonaktifkan. Klaster-klaster tanah di dalam terowongan diatur kembali menjadi klaster kering.

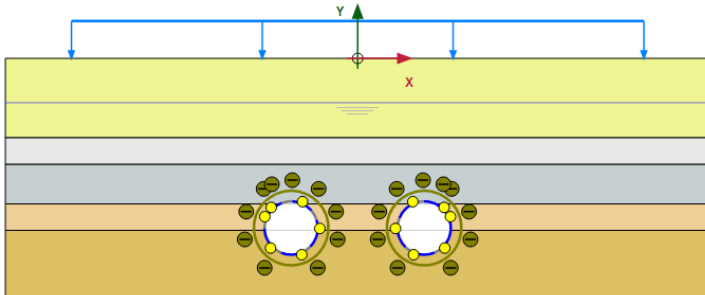




Gambar 3. 53 Tahap final terowongan *downtrack*

## 6. Tahap Terowongan *Uptrack*

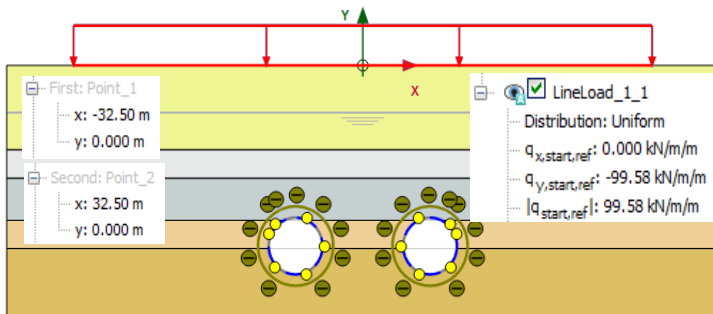
Pemodelan konstruksi terowongan *uptrack* dilakukan setelah pemodelan konstruksi terowongan *downtrack*. Prosedur pemodelan terowongan *uptrack* sama dengan prosedur pemodelan terowongan *downtrack*, dari tahap pengegeboran terowongan, tahapan kontraksi, tahapan *grouting* dan tahap final. Pada tahap pemodelan pengeboran terowongan *uptrack*, deformasi tidak diatur menjadi nol, agar deformasi dari hasil akhir perhitungan nantinya merupakan deformasi akibat konstruksi kedua terowongan.



Gambar 3. 54 Tahap final terowongan *uptrack*

#### 7. Tahap Pemodelan Kondisi Seismik (Beban Gempa)

Tahap pemodelan kondisi seismik dilakukan setelah tahap final *Tunnel 2* (Terowongan *Uptrack*), beban gempa yang dimodelkan sebagai beban garis merata pada permukaan tanah (*ground level*) sepanjang 65 m. Pada tahap ini, deformasi diatur menjadi nol, agar deformasi dari hasil akhir perhitungan merupakan deformasi akibat dari beban gempa saja. Kasus beban gempa dimodelkan pada kedalaman muka air tanah 5 mbgl (HWL) dan 2 mbgl (LWL). Nilai beban gempa sebesar  $99,576 \text{ kN/m}^2$ .



Gambar 3. 55 Pemodelan beban gempa pada Plaxis

## 8. Tahap Perhitungan Angka Keamanan (SF)

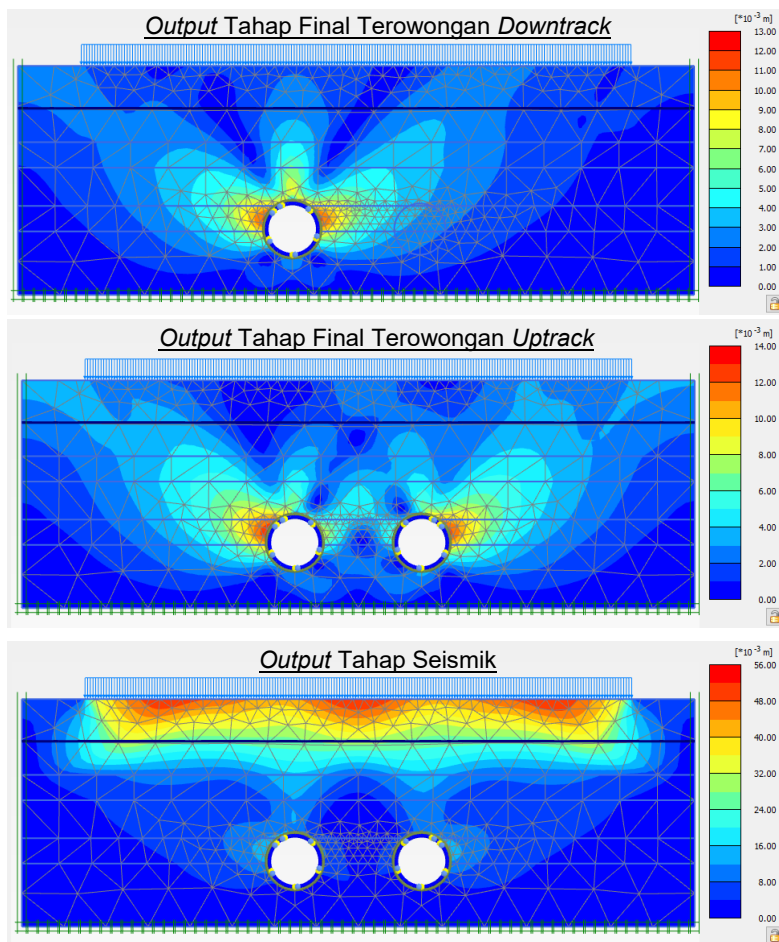
Pada tahap perhitungan angka keamanan (SF), perhitungan menggunakan jenis analisis *Safety*. Masing-masing dari tahap pemodelan yaitu tahap final terowongan *downtrack*, tahap final terowongan *uptrack*, dan tahap kondisi seismik dianalisa angka keamanannya.

General	
ID	SF 1 (Tunnel 1) [Phase_16]
Start from phase	Final Tunnel 1
Calculation type	Safety
Loading type	Incremental multipliers
$M_{sf}$	0.1000
Pore pressure calculation type	Use pressures from previous
Thermal calculation type	Ignore temperature
First step	447
Last step	546
Design approach	(None)
Special option	0

Gambar 3. 56 Tahap perhitungan SF

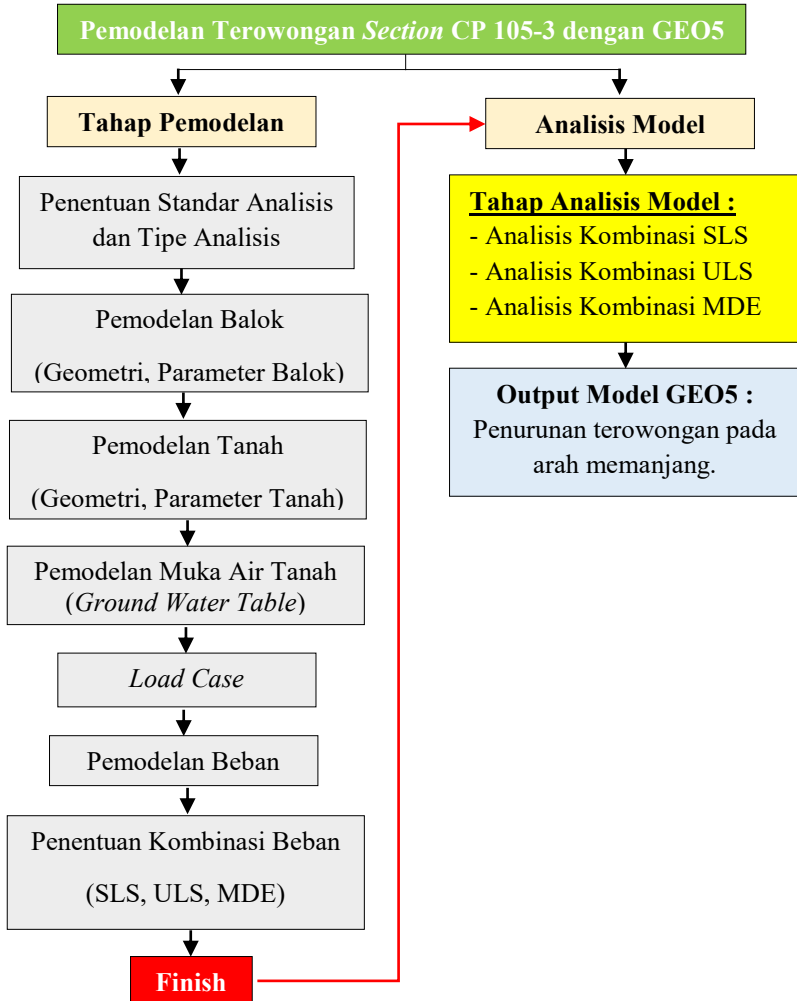
### 3.8.9. Output Pemodelan Plaxis

Hasil dari pemodelan terowongan arah melintang (*cross section*) dengan program Plaxis 2D v.20 berupa deformasi yang terjadi pada *lining* terowongan, penurunan tanah yang terjadi akibat konstruksi kedua terowongan, gaya-gaya dalam yang terjadi pada struktur terowongan, dan angka keamanan (SF) baik pada tahap konstruksi maupun angka keamanan (SF) pada tahap kondisi seismik. Hasil dari pemodelan terowongan nantinya akan dianalisa berdasarkan variabel-variabel model kedalaman muka air tanah (MAT).

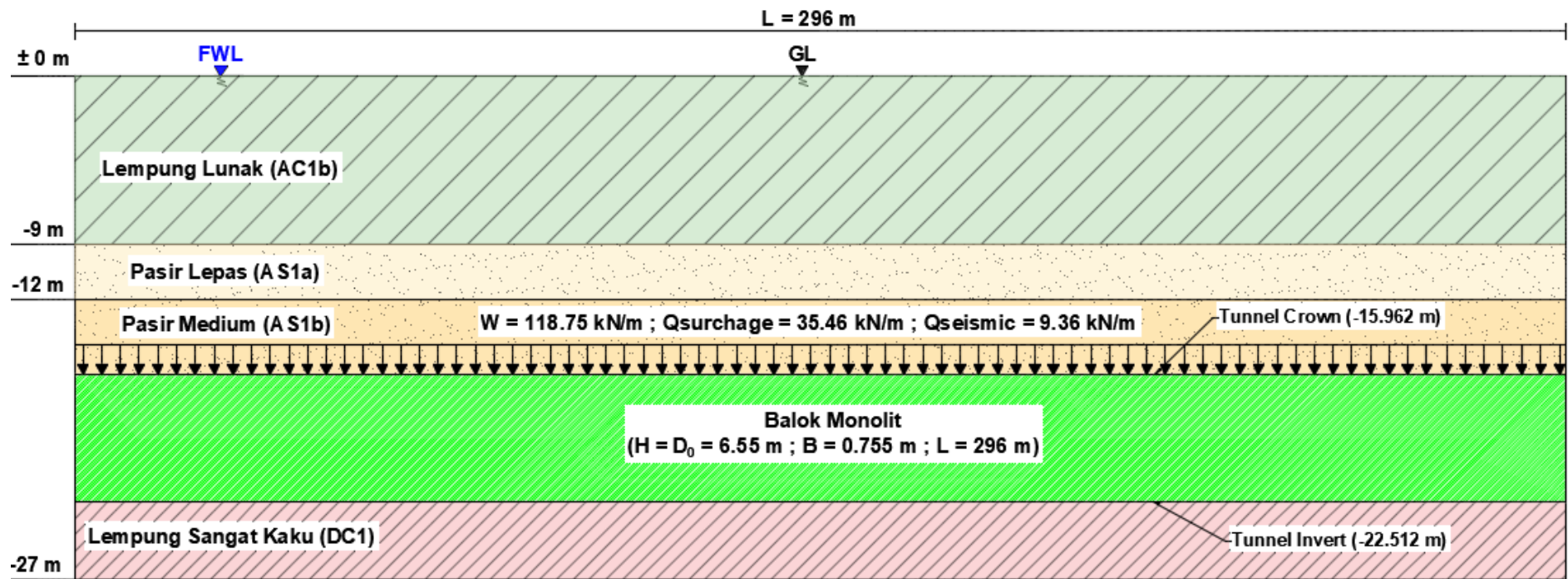
Gambar 3. 57 *Output* pemodelan Plaxis

### 3.9. Pemodelan Terowongan dengan GEO5

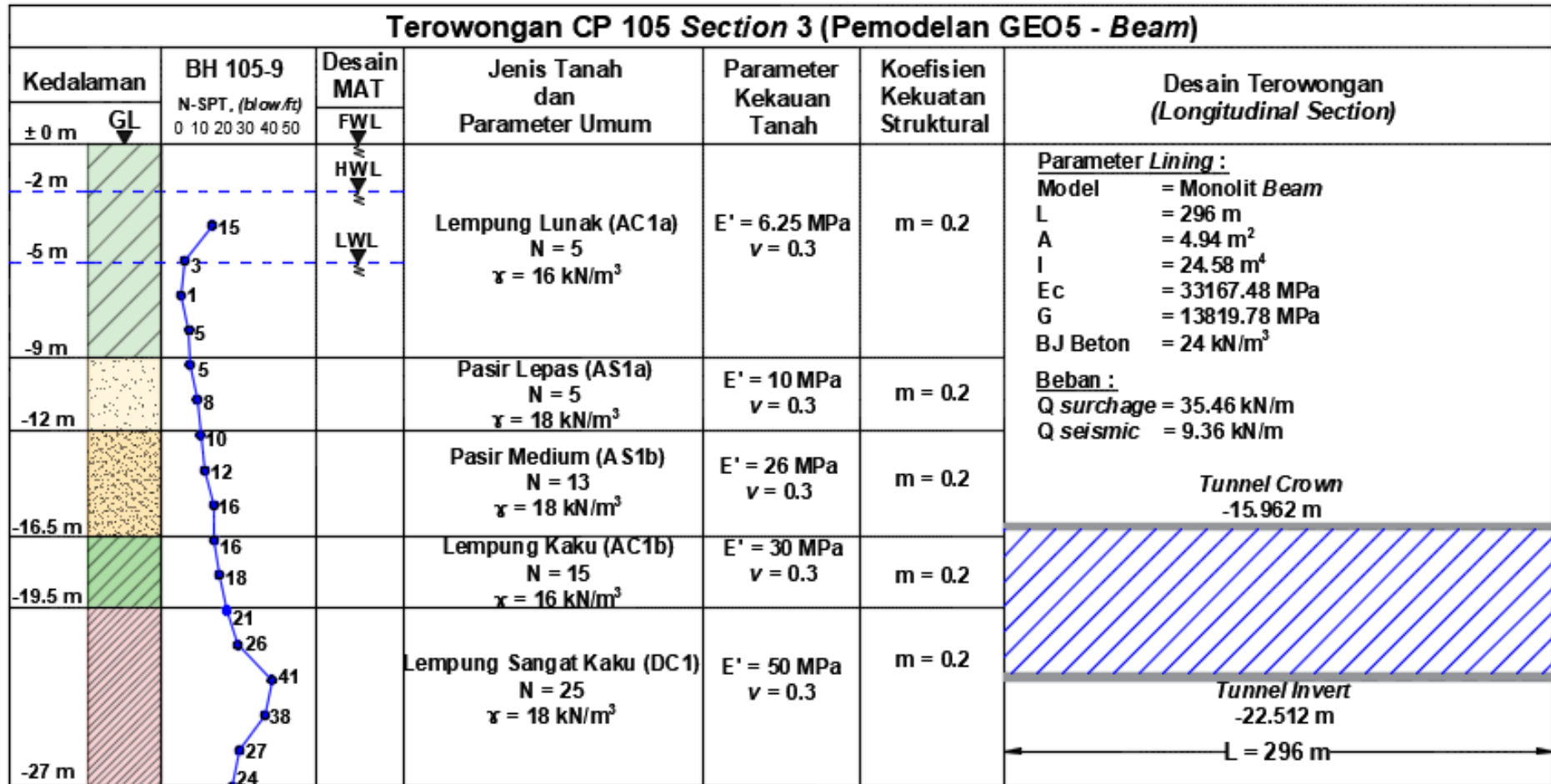
Prosedur pemodelan terowongan arah memanjang (*long section*) dengan program GEO5 - *Beam* sebagai berikut:



Gambar 3. 58 Analisis terowongan CP 105-3 dengan GEO5



Gambar 3. 59 Basis pemodelan terowongan dengan GEO5



Gambar 3. 60 Parameter-parameter pemodelan GEO5

### 3.9.1. Memulai Proyek Baru

Tahap awal dalam pemodelan terowongan CP 105-3 pada arah memanjang dengan GEO5 - *Beam* sebagai berikut:

#### 1. *Frame Project*

Pada lembar *frame project* berisi informasi umum *project* seperti nama file, diskripsi *project*, satuan yang digunakan dan lainnya. Dalam pemodelan ini menggunakan satuan *metric*.

The screenshot shows the 'Frame Project' form in the GEO5 software. The form is divided into several sections:

- Project Information:**
  - Task: Analisa Terowongan MRT Jakarta (Long Section)
  - Part: 1
  - Description: Mengetahui Penurunan pada Arah Memanjang Terowongan
  - Customer: (empty field)
- Author and Date:**
  - Author: Ahmad Ilmiawan Putra\_10111610013056
  - Date: 8/ 8/2020
- Project Identification:**
  - Project ID: (empty field)
  - Project number: (empty field)
- System of units:**
  - System of units: metric (highlighted with a red box)

On the right side of the form, there is a 'Frames' panel with buttons for 'Project' and 'Settings'.

Gambar 3. 61 Lembar "*frame project*" pemodelan GEO5

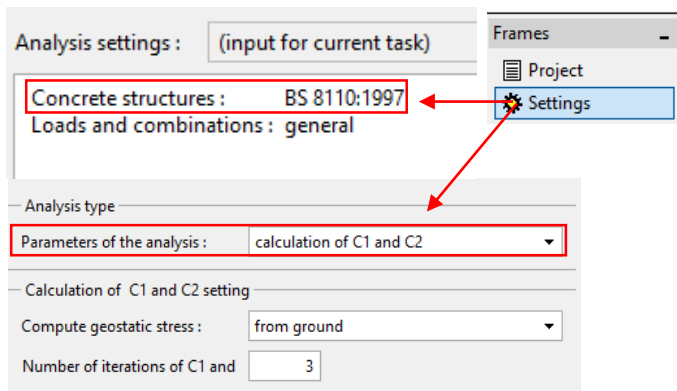
#### 2. Penentuan Standar dan Tipe Analisis (Tahap *Setting*)

Standar analisis adalah standar atau peraturan yang dipakai dalam analisa pemodelan struktur sedangkan tipe analisis adalah domain model atau model utama yang digunakan dalam mendefinisikan model lapisan tanah.

Dalam analisa pemodelan terowongan arah memanjang ini, standar analisis struktur yang dipakai adalah BS 8110 : 1997



sesuai dengan standar perencanaan yang dipakai oleh pihak proyek. Untuk tipe analisis yang dipakai dalam pemodelan adalah tipe “*calculation of C1 and C2*” agar lapisan-lapisan tanah nantinya dapat dimodelkan secara langsung.

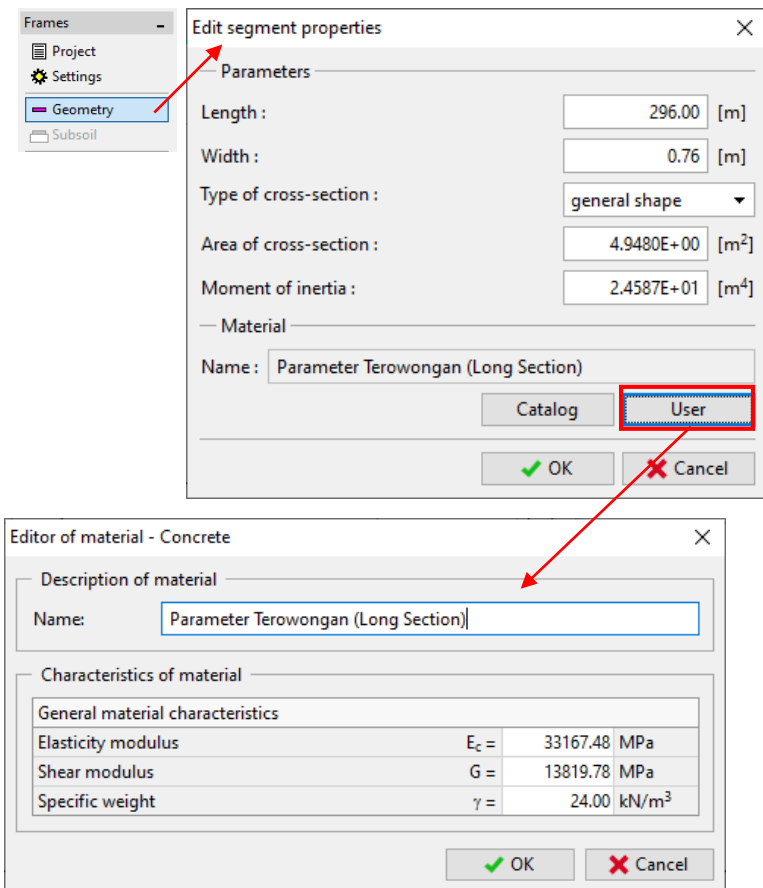


Gambar 3. 62 Standar dan tipe analisis model GEO5

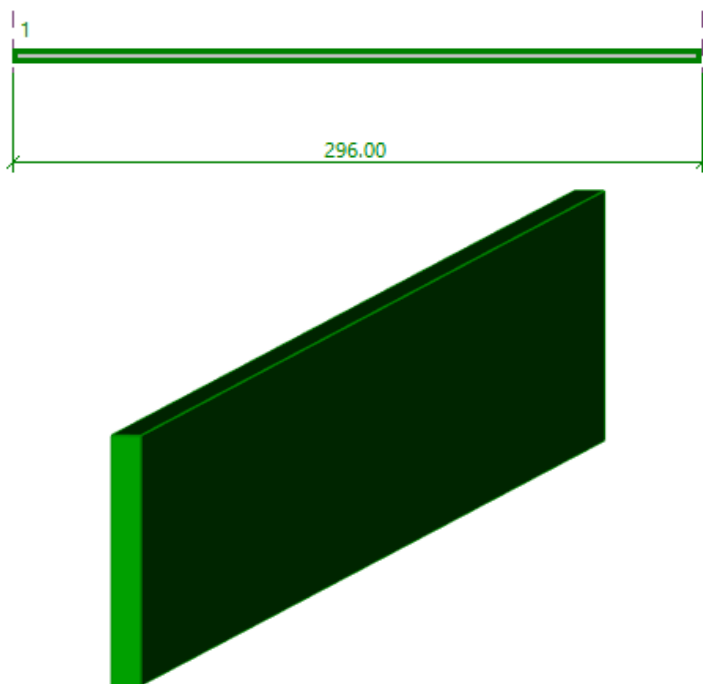
### 3.9.2. Pemodelan Balok

Pemodelan terowongan GEO5 - *Beam* dimodelkan sebagai balok monolit memanjang (*Beam*) dengan panjang 296 m ( $L = 296$  m) sesuai panjang *section* CP 105-3. Pemodelan terowongan arah memanjang pada program GEO5-*Beam* dimodelkan sebagai struktur balok berbentuk persegi yang telah dikonversikan atau diakumulasikan dengan penampang arah melintang terowongan (bentuk lingkaran) dengan parameter sesuai dengan parameter model terowongan pada GEO5 yang telah didefinisikan. Langkah dalam pemodelan balok yaitu pada menu *frame* “*geometry*”. Balok yang dimodelkan merupakan balok tanpa perletakan, dasar anggapan ini yaitu karena terowongan *section* CP 105-3 terletak di antara *section* CP 105-2 dan *section* CP 105-4 dan bukan pada ujung stasiun.

Langkah pertama dalam pemodelan yaitu dengan memilih menu *frame* “*Geometry*” pada program *GEO5-Beam*. Kemudian parameter-parameter struktur geometri balok dimasukkan. Setelah parameter model geometri sudah didefinisikan dalam pemodelan, kemudian data material struktur balok dimasukkan dalam pemodelan.



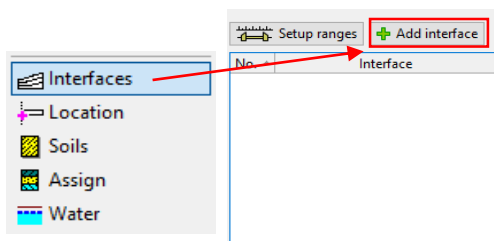
Gambar 3. 63 Pemodelan balok pada GEO5



Gambar 3. 64 Hasil pemodelan balok GEO5

### 3.9.3. Pemodelan Tanah

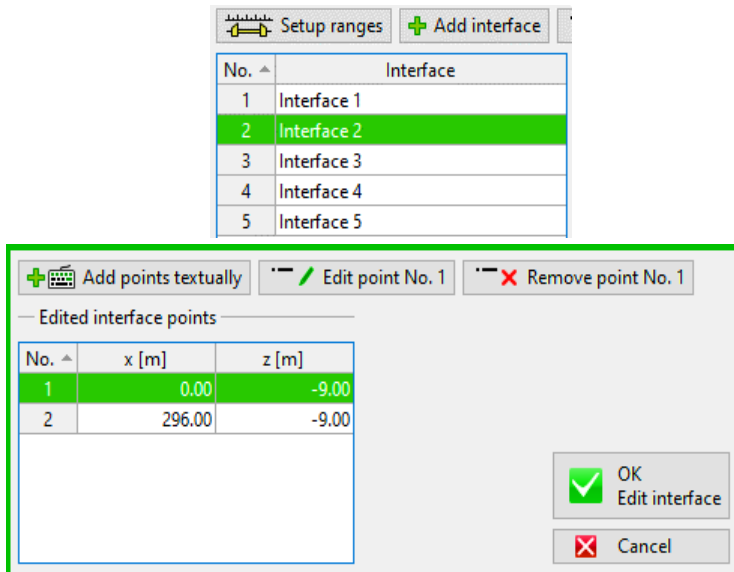
Pemodelan geometri lapisan-lapisan tanah pada GEO5-*Beam* dimodelkan pada menu *frame* “interface”.

Gambar 3. 65 *Frame interface* GEO5

Pemodelan geometri lapisan-lapisan tanah pada GEO5-*Beam* dimodelkan dengan memasukkan titik-titik kordinat pada menu “*interface*” pada model geometri dengan titik koordinat model lapisan tanah ditunjukkan pada Tabel 3.36.

Tabel 3. 36 Titik Koordinat Model Geometri Tanah GEO5

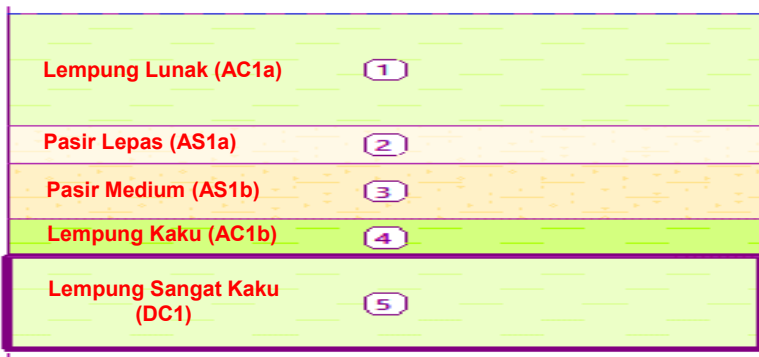
Lap.	Jenis Tanah	Kedalaman (mbgl)	Tebal (m)	Titik Koordinat (m)			
				Titik 1		Titik 2	
				X	Z	X	Z
1	AC1a	0 - 9	9	0	0	296	0
2	AS1a	9 -12	3	0	-9	296	-9
3	AS1b	12 - 16.5	4.5	0	-12	296	-12
4	AC1b	16.5 - 19.5	3	0	-16.5	296	-16.5
5	DC1	19.5 - 27	7.5	0	-19.5	296	-19.5



Gambar 3. 66 Input data *interface* tanah pada GEO5

Setelah pemodelan titik-titik koordinat, kemudian data material tanah atau parameter di-*input* sesuai dengan parameter-parameter tanah yang telah didefinisikan.

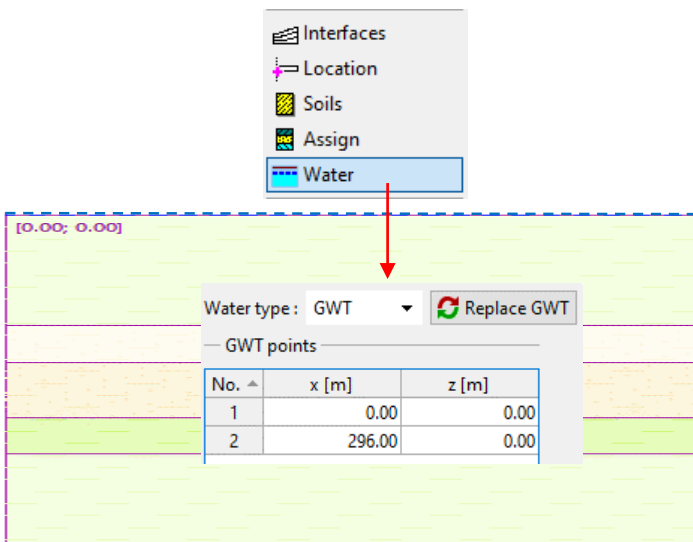
Gambar 3. 67 *Input* data material tanah pada GEO5



Gambar 3. 68 Hasil pemodelan tanah pada GEO5

### 3.9.4. Pemodelan Muka Air Tanah (GWT)

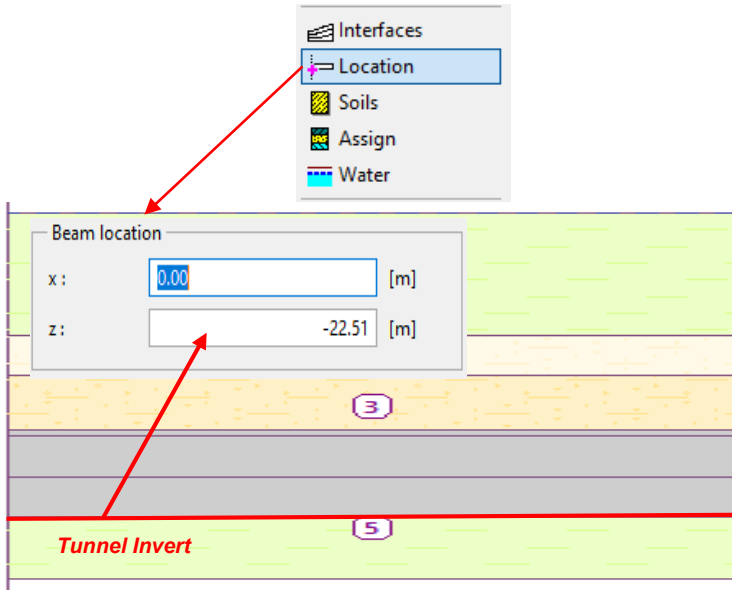
Pemodelan kedalaman Muka Air Tanah (MAT) dalam analisa terowongan arah memanjang (*long section*), dimodelkan pada kedalaman 0 mbgl (FWL) yaitu kondisi tegangan total tanah terbesar yang diterima oleh struktur terowongan. Pemodelan muka air tanah dengan cara *input* GWT (*Ground Water Table*) pada titik koordinat (0;0) dan (296;0). Untuk *input* GWT, dimodelkan melalui menu *frame* “*Water*”.



Gambar 3. 69 Pemodelan GWT pada GEO5

### 3.9.5. Pemodelan Lokasi Kedalaman Balok

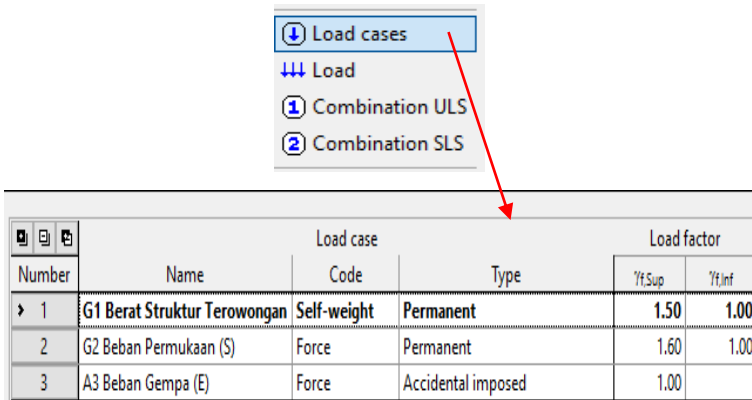
Setelah pemodelan tanah dan muka air tanah (MAT) selesai, kemudian lokasi kedalaman struktur balok dimodelkan, pemodelan kedalaman struktur balok dimodelkan dengan kedalaman bagian *invert* struktur terowongan (bagian bawah struktur terowongan). Kedalaman bagian *invert* terowongan yaitu sebesar 22,512 mbgl. Pemodelan lokasi kedalaman balok dimodelkan melalui menu *frame* “*Location*”.



Gambar 3. 70 Pemodelan kedalaman balok pada GEO5

### 3.9.6. Load Case

Penentuan nilai faktor pembebanan berdasarkan faktor pembebanan yang telah didefinisikan pada tabel (3.31) pada Sub-bab 3.6.4. Nilai faktor beban ini digunakan untuk pemodelan kombinasi pembebanan yang nantinya nilai beban yang di-*input* akan dikalikan dengan nilai faktor pembebanan yang akan didefinisikan. Pada tahap ini juga ditetapkan jenis beban yang akan dimodelkan, diantaranya yaitu beban berat sendiri terowongan ( $W$ ) dimodelkan sebagai beban permanen, beban permukaan ( $S$ ) dimodelkan sebagai beban gaya permanen, dan beban gempa ( $E$ ) dimodelkan sebagai beban *accidental-imposed* (beban sementara). Penetapan *load case* dilakukan pada menu *frame* “*Load Case*”.



Number	Name	Load case		Load factor	
		Code	Type	$\gamma_{f,Sup}$	$\gamma_{f,Inf}$
1	G1 Berat Struktur Terowongan	Self-weight	Permanent	1.50	1.00
2	G2 Beban Permukaan (S)	Force	Permanent	1.60	1.00
3	A3 Beban Gempa (E)	Force	Accidental imposed	1.00	

Gambar 3. 71 Penetapan *load case*

### 3.9.7. Pemodelan Beban

Pemodelan pembebanan pada pemodelan GEO5-*Beam*, dimodelkan pada struktur terowongan (balok) secara langsung atau dikenai kepada struktur secara langsung. Beban yang dimodelkan pada GEO5 terdiri dari beban berat sendiri struktur balok ( $W$ ), beban permukaan ( $S$ ), dan beban gempa ( $E$ ).

#### 1. Beban Berat Sendiri Struktur ( $W$ )

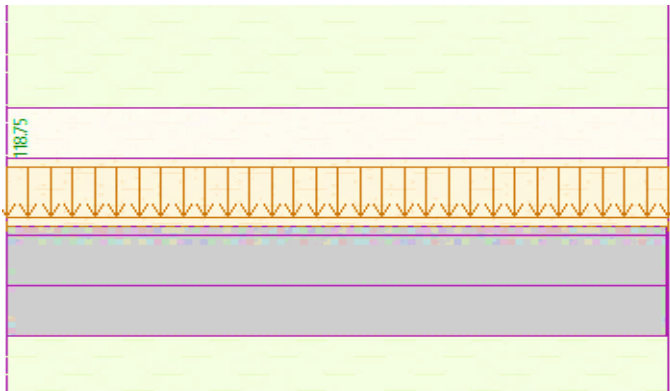
Pemodelan beban berat sendiri struktur terowongan (balok) dimodelkan secara otomatis oleh program GEO5 dimana besaran beban yang dimodelkan tergantung pada berat jenis beton ( $B_{beton}$ ) yang didefinisikan pada pemodelan parameter struktur.

Beban ini dimodelkan sebagai beban permanen (Kode Beban G1 pada GEO5). Beban berat sendiri struktur ( $W$ ) yang dimodelkan GEO5 sebesar 118,75 kN/m dengan sistem beban terdistribusi merata sepanjang model struktur balok ( $L = 296$  m).



Active load case : G1 Berat Sendiri Terowongan (W) ▾

No.	Type of load	Origin x [m]	Length l [m]	Magnitude		unit
				f, m, q, q <sub>1</sub>	q <sub>2</sub>	
1	distr. uniform	0.00	296.00	118.75		[kN/m]

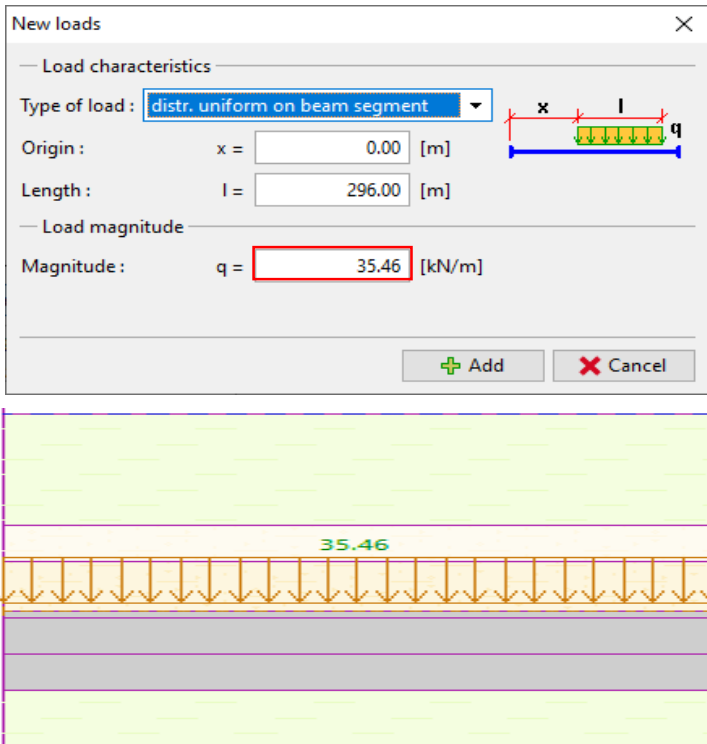


Gambar 3. 72 Beban berat struktur balok pada GEO5

## 2. Beban Permukaan (S)

Beban permukaan dimodelkan sebagai beban gaya permanen (Kode Beban G2 pada GEO5) dengan sistem beban terdistribusi merata sepanjang struktur balok atau pada titik *crown* terowongan yaitu sepanjang 296 m ( $L = 296$  m). Beban permukaan yang dimodelkan sebesar 35,46 kN/m.

Untuk pemodelan beban permukaan ini, dilakukan secara manual dengan pemodelan beban melalui menu *frame "Load"*.



Gambar 3. 73 Pemodelan beban permukaan pada GEO5

### 3. Beban Gempa ( $E$ )

Beban gempa dimodelkan sebagai beban gaya sementara atau dalam GEO5 disebut sebagai beban *accidental imposed-force* (Kode Beban A3 pada GEO5). Beban gempa dimodelkan dengan sistem beban terdistribusi merata sepanjang struktur balok atau pada titik *crow* terowongan yaitu sepanjang 296 m ( $L$  296 m). Nilai beban gempa yang dimodelkan sebesar 9,36 kN/m.

New loads ×

— Load characteristics —

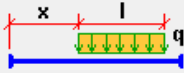
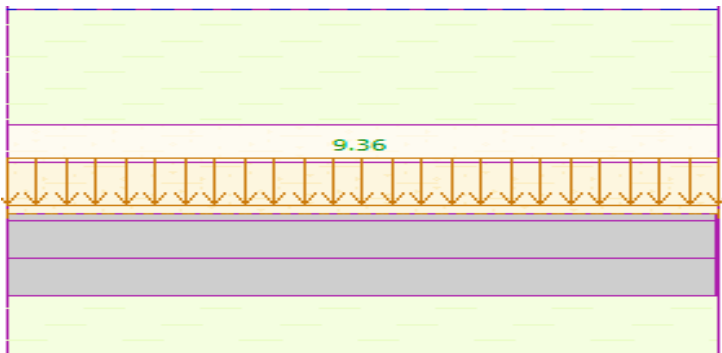
Type of load : distr. uniform on beam segment ▾

Origin :            x =  [m]

Length :            l =  [m]

— Load magnitude —

Magnitude :        q =  [kN/m]

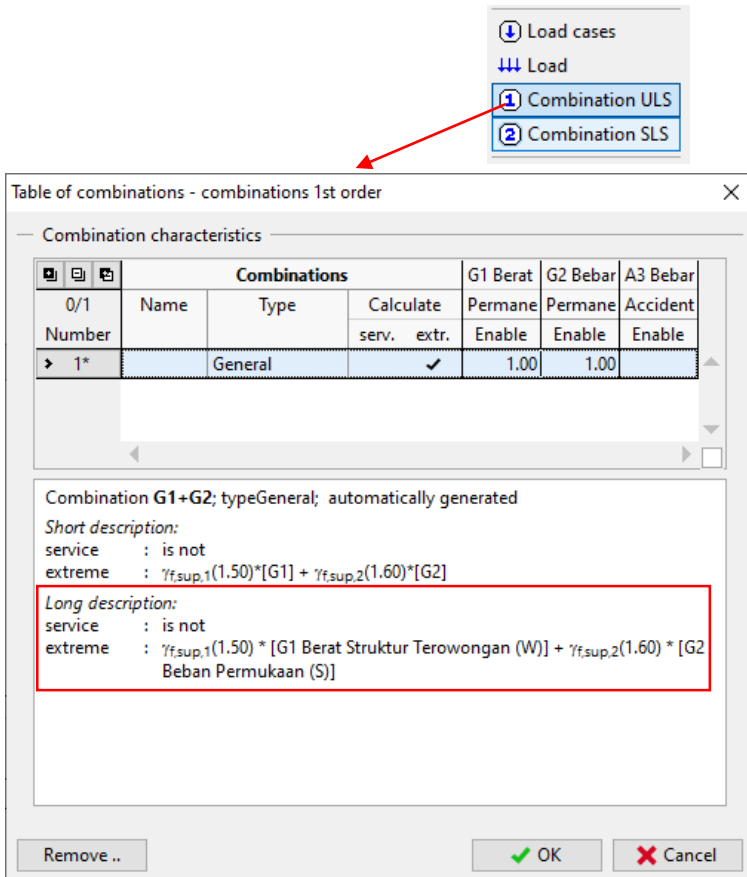



Gambar 3. 74 Pemodelan beban gempa pada GEO5

### 3.9.8. Penetapan Kombinasi Beban

Penetapan desain kombinasi beban sesuai dengan desain kombinasi beban yang telah didefinisikan pada tabel (3.32) pada Sub-bab 3.6.4. Pemodelan kombinasi beban ini untuk mengetahui sejauh mana kemampuan struktur terowongan mampu menerima sebuah pembebanan.

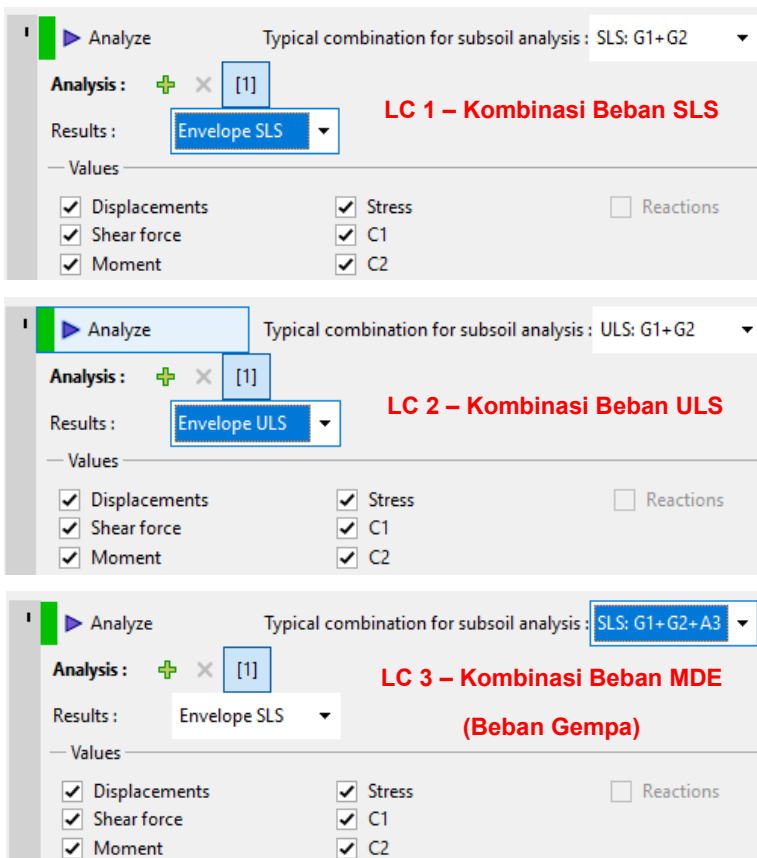
Kombinasi pembebanan pada model GEO5 ada tiga yaitu kombinasi beban servis (SLS-LC1), beban ultimit (ULS-LC2), dan beban gempa (MDE-LC3). Untuk contoh pemodelan berikut ditampilkan kombinasi dari kombinasi beban ultimit (ULS).



Gambar 3. 75 Pemodelan kombinasi beban pada GEO5

### 3.9.9. Analisis Pemodelan GEO5

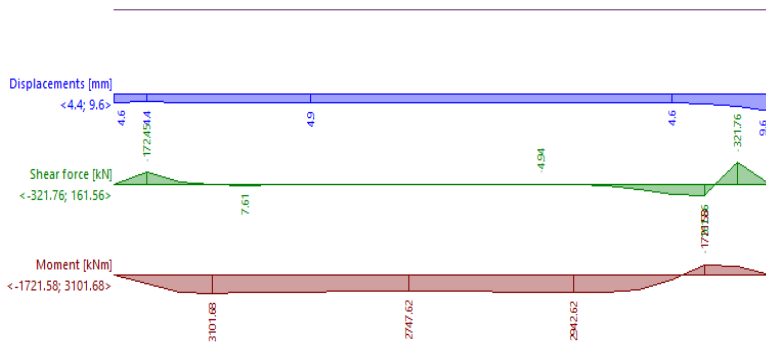
Perhitungan analisis pemodelan pada program GEO5 dilakukan menggunakan masing-masing kondisi kombinasi pembebanan (LC 1, LC2, dan LC 3) yang telah dimodelkan.



Gambar 3. 76 Analisis pemodelan GEO5

### 3.9.10. *Otuput* Pemodelan GEO5

Hasil keluaran perhitungan (*output*) dari pemodelan GEO5 - *Beam* ini berupa *displacement* atau penurunan dalam arah memanjang yang terjadi pada struktur terowongan yang nantinya akan dianalisa sesuai topik bahasan dalam tugas akhir ini.



Gambar 3. 77 *Output* hasil pemodelan GEO5

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

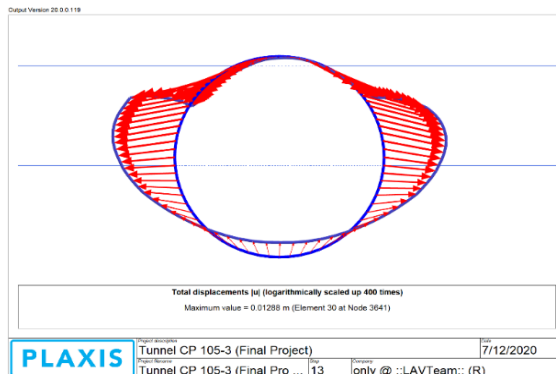
## BAB IV PEMBAHASAN

### 4.1. Analisa Terowongan Pemodelan Plaxis

Dalam pemodelan terowongan arah melintang pada Plaxis, yang dijadikan variabel dalam model adalah kedalaman muka air tanah (MAT) dimana kedalaman muka air tanah yang dimodelkan yaitu pada kedalaman 5 mbgl (LWL), 2 mbgl (HWL) dan 0 mbgl (FWL). Untuk kondisi beban gempa, kedalaman muka air tanah yang dimodelkan hanya pada kedalaman 5 mbgl (LWL) dan 2 mbgl (HWL). Pembahasan analisa ini dibagi menjadi dua garis besar yaitu analisa dalam kondisi non-seismik dan analisa dalam kondisi seismik (beban gempa). Analisa pola deformasi dan gaya dalam menggunakan satu model saja (gambar *output* Plaxis) yaitu pada model muka air tanah pada kedalaman LWL (5 mbgl), karena pola deformasi dan gaya dalam yang dihasilkan sama untuk setiap model kedalaman muka air tanah.

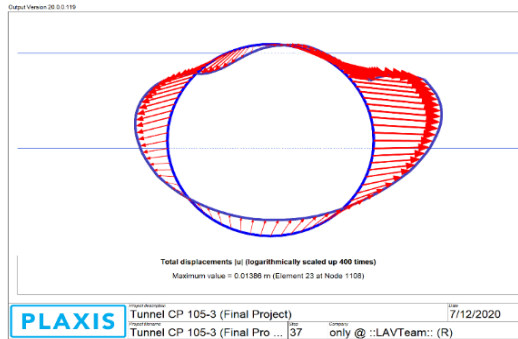
#### 4.1.1. Analisa Kondisi Non-Seismik

##### 4.1.1.1. Deformasi Terowongan Kondisi Non-Seismik



Gambar 4. 1 Pola deformasi terowongan *downtrack*



Gambar 4. 2 Pola deformasi terowongan *uptrack*

Tabel 4. 1 Deformasi Terowongan Non-Seismik

MAT	Terowongan	Deformasi maksimum yang terjadi ( $\Delta$ )
(mbgl)		(mm)
5	<i>Terowongan 1 (Downtrack)</i>	<b>14.770</b>
	<i>Terowongan 2 (Uptrack)</i>	<b>13.863</b>
2	<i>Terowongan 1 (Downtrack)</i>	12.732
	<i>Terowongan 2 (Uptrack)</i>	11.929
0	<i>Terowongan 1 (Downtrack)</i>	11.392
	<i>Terowongan 2 (Uptrack)</i>	10.693

Pada Gambar 4.1 menunjukkan pola deformasi yang terjadi pada terowongan *downtrack* dan pada Gambar 4.2 menunjukkan pola deformasi yang terjadi pada terowongan *uptrack*. Deformasi ini merupakan deformasi yang terjadi pada saat selesai tahapan konstruksi terowongan (*final tunnel*). Dapat dilihat bahwa pola

deformasi yang terjadi pada *lining* terowongan *downtrack* dan terowongan *uptrack* hampir sama yaitu pola deformasi *ovaling* dimana terjadi pengecilan diameter vertikal pada *crown* dan *invert* terowongan serta pembesaran diameter horizontal pada *springline* terowongan.

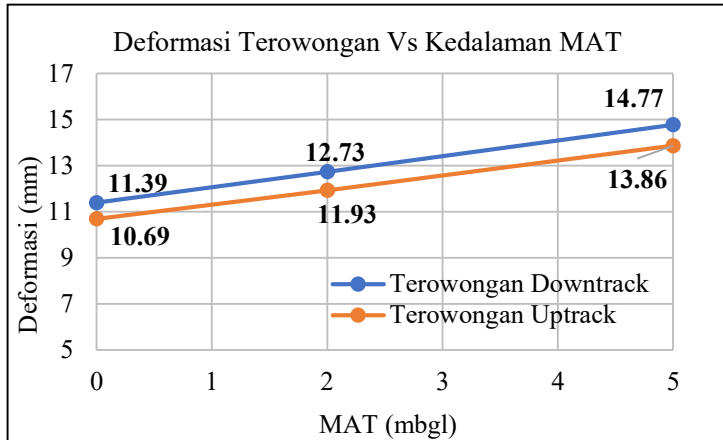
Pada Tabel 4.1 menunjukkan deformasi maksimum pada masing-masing terowongan tiap variabel model kedalaman muka air tanah. Deformasi yang terjadi pada terowongan kemudian dikontrol dengan persyaratan deformasi dari LTA Singapura pada persamaan (2.28) dimana deformasi maksimum yang terjadi tidak boleh melebihi 25 mm.

Tabel 4. 2 Cek Deformasi Terowongan Non-Seismik

MAT	Terowongan	Deformasi yang Terjadi ( $\Delta$ )	$\Delta$ maks	Cek
(mbgl)		(mm)	(mm)	$\Delta \leq \Delta$ maks
5	<i>Downtrack</i>	14.7699	25	<b>OK</b>
	<i>Uptrack</i>	13.8626	25	<b>OK</b>
2	<i>Downtrack</i>	12.7317	25	<b>OK</b>
	<i>Uptrack</i>	11.9293	25	<b>OK</b>
0	<i>Downtrack</i>	11.3921	25	<b>OK</b>
	<i>Uptrack</i>	10.6933	25	<b>OK</b>

Dapat dilihat pada Tabel 4.2 menunjukkan bahwa deformasi maksimum yang terjadi pada *lining* terowongan *downtrack* dan terowongan *uptrack* pada masing-masing kondisi muka air tanah memenuhi persyaratan batas deformasi.

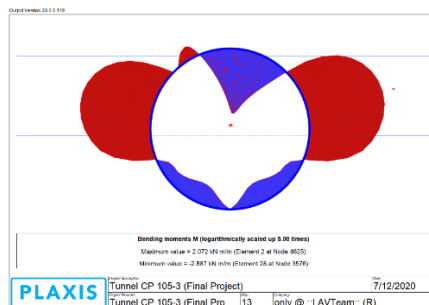
Deformasi maksimum yang terjadi yaitu pada kedalaman muka air tanah LWL (5 mbgl) baik deformasi yang terjadi pada terowongan *downtrack* maupun terowongan *uptrack*. Deformasi ini semakin turun dengan seiringnya kenaikan muka air tanah.



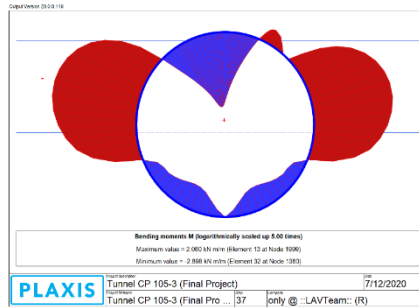
Gambar 4. 3 Grafik deformasi terowongan non-seismik

Pada Gambar 4.3 menunjukkan grafik antara deformasi yang terjadi pada *lining* terowongan dengan kedalaman muka air tanah yang berbeda-beda. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa semakin naik ketinggian muka air tanah, semakin kecil deformasi yang terjadi pada terowongan baik pada terowongan *downtrack* maupun terowongan *uptrack*. Hal ini menunjukkan bahwa ketinggian muka air tanah memengaruhi deformasi yang terjadi pada kedua terowongan.

#### 4.1.1.2. Gaya-gaya Dalam pada Kondisi Non-Seismik



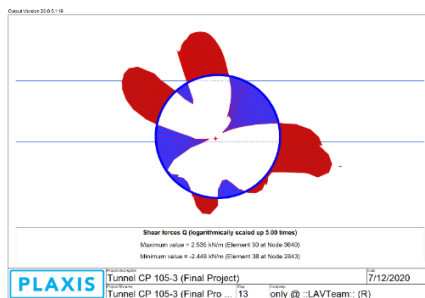
Gambar 4. 4 Gaya momen terowongan *downtrack*



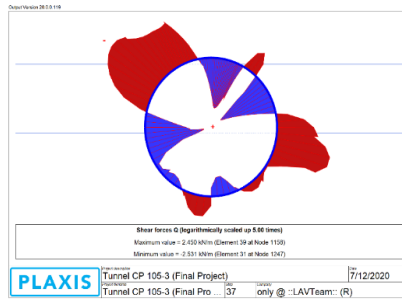
Gambar 4. 5 Gaya momen terowongan *uptrack*

Tabel 4. 3 Gaya Momen Terowongan

MAT	Gaya Momen (Maks)	
	M (kNm/m)	
(mbgl)	<i>Downtrack</i>	<i>Uprack</i>
<b>5</b>	<b>9.526</b>	<b>2.898</b>
2	7.906	2.897
0	6.862	2.896



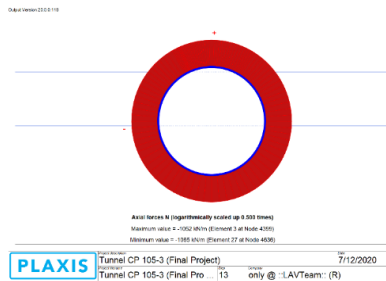
Gambar 4. 6 Gaya geser terowongan *downtrack*



Gambar 4. 7 Gaya geser terowongan *uptrack*

Tabel 4. 4 Gaya Geser Terowongan

MAT	Gaya Geser (Maks)	
	Q (kN/m)	
(mbgl)	<i>Downtrack</i>	<i>Uprack</i>
<b>5</b>	<b>9.191</b>	<b>2.531</b>
2	7.644	2.530
0	6.689	2.528



Gambar 4. 8 Gaya aksial terowongan

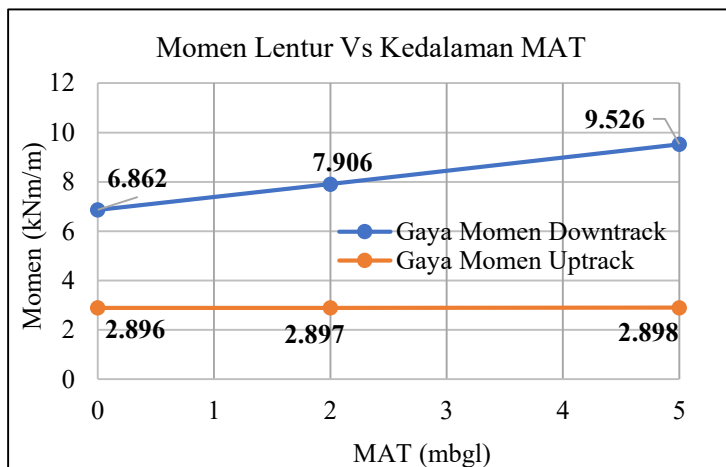
Tabel 4. 5 Gaya Aksial Terowongan

MAT	Gaya Aksial (Maks)	
	N (kN/m)	
(mbgl)	<i>Downtrack</i>	<i>Uptrack</i>
5	1082.222	1064.547
2	1085.040	1064.557
<b>0</b>	<b>1089.480</b>	<b>1064.570</b>

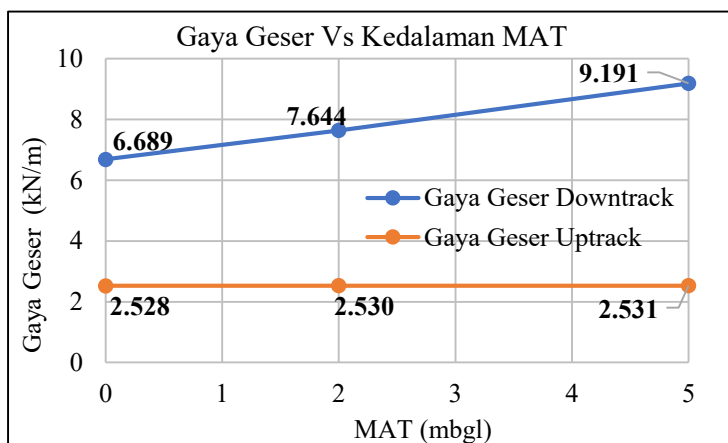
Pada Gambar 4.4 hingga Gambar 4.8 menunjukkan pola gaya-gaya dalam yang terjadi pada terowongan pada kondisi non-seismik (tahap konstruksi terowongan). Terlihat jelas bahwa pola gaya momen dan gaya geser yang terjadi pada terowongan *downtrack* dan terowongan *uptrack* berbeda, hal ini dipengaruhi oleh posisi-posisi join antar segmen *lining* terowongan. Pada join antar segmen *lining* terowongan, momen yang terjadi adalah nol ( $M = 0$ ) karena pada join atau sambungan antar segmen *lining* terowongan (*radial joint*) merupakan bidang lemah dalam badan terowongan sehingga diusahakan tidak ada momen yang bekerja. Sedangkan untuk pola gaya aksial yang terjadi sama baik pada terowongan *downtrack* maupun pada terowongan *uptrack*.

Pada Tabel 4.3 hingga Tabel 4.5 menunjukkan nilai maksimum dari gaya-gaya dalam yang terjadi pada kedua terowongan pada kondisi non-seismik (tahap konstruksi terowongan). Nilai terbesar gaya aksial yang terjadi pada kondisi kedalaman muka air tanah FWL (0 mbgl), sedangkan gaya geser dan gaya momen terbesar yang terjadi pada kondisi kedalaman muka air tanah LWL (5 mbgl).

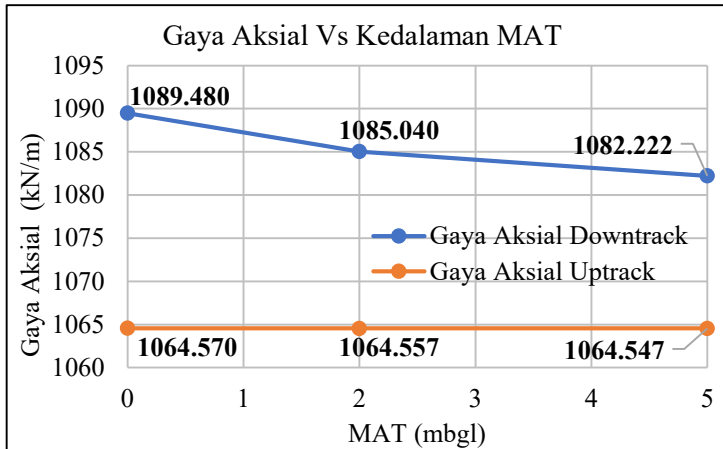
Untuk dapat mengetahui pengaruh dari variabel kedalaman muka air tanah (MAT), ditunjukkan pada grafik-grafik antara gaya dalam dengan variabel kedalaman muka air tanah sebagai berikut:



Gambar 4. 9 Grafik gaya momen terowongan



Gambar 4. 10 Grafik gaya geser terowongan



Gambar 4. 11 Grafik gaya aksial terowongan

Pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10 menunjukkan grafik gaya momen dan gaya geser terhadap variabel kedalaman muka air tanah (MAT) pada kondisi non-sesimik (tahap konstruksi terowongan), dapat dilihat bahwa seiring dengan naiknya ketinggian muka air tanah, gaya geser dan gaya momen yang terjadi semakin kecil. Hal ini dapat menunjukkan bahwa ketinggian muka air tanah memengaruhi gaya-gaya dalam yang terjadi pada terowongan.

Sedangkan pada Gambar 4.11 menunjukkan grafik antara gaya aksial yang terjadi pada terowongan terhadap variabel kedalaman muka air tanah pada kondisi non-sesimik (tahap konstruksi terowongan). Dapat dilihat bahwa dengan naiknya ketinggian muka air tanah, gaya aksial yang terjadi semakin besar.

#### 4.1.1.3. Analisa Deformasi dan Gaya-gaya Dalam

Telah dibahas sebelumnya bahwa deformasi dan gaya-gaya dalam yang terjadi pada kedua terowongan dipengaruhi oleh kedalaman muka air tanah.



Deformasi yang terjadi pada kedua terowongan semakin kecil seiring dengan meningkatnya ketinggian muka air tanah, begitu juga gaya momen dan gaya geser yang terjadi pada terowongan semakin kecil seiring dengan meningkatnya ketinggian muka air tanah. Hal ini dikarenakan terjadi peningkatan tekanan air pori di dalam tanah. Persamaan tegangan tanah pada persamaan (2.2) menunjukkan tegangan air pori mempunyai pengaruh terhadap tegangan total tanah yang terjadi ( $\sigma = \gamma_{sat} Z + \gamma_w Z$ ).

Hal ini menyebabkan perbedaan ketinggian muka air tanah berpengaruh terhadap tegangan-tegangan tanah dan menyebabkan terjadinya perubahan tegangan antarmuka pada terowongan seiring dengan meningkatnya ketinggian muka air tanah. Tegangan antarmuka terowongan adalah tegangan yang terjadi pada titik antarmuka model terowongan yang dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Tegangan-tegangan Antarmuka Terowongan

MAT	Tegangan Normal, ( $\sigma_N$ )	Tegangan Geser, ( $\tau$ )	Tekanan Air Pori ( $P_{aktif}$ )
(mbgl)	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>2</sup> )
5	498.58	15.26	226.16
2	487.99	13.54	246.15
0	484.83	12.33	259.78

Pada Tabel 4.6 menunjukkan bahwa seiring meningkatnya ketinggian muka air tanah, tegangan normal dan tegangan geser semakin turun dan tekanan air pori yang terjadi semakin tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan air pori sangat memengaruhi deformasi dan gaya-gaya dalam yang terjadi pada terowongan. Semakin naik ketinggian muka air tanah, tegangan normal dan tegangan geser yang terjadi semakin kecil, sehingga untuk deformasi dan gaya momen yang terjadi pada terowongan

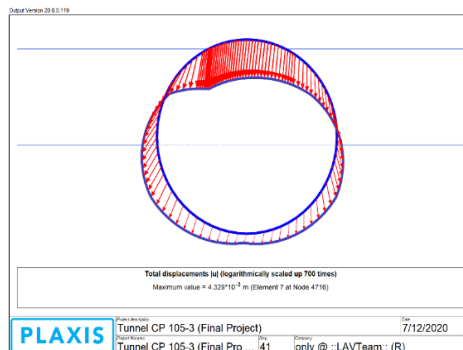
semakin kecil. Oleh karena itu gaya momen dan gaya geser terbesar pada kedalaman muka air tanah LWL (5 mbgl).

Sedangkan pada gaya aksial, semakin naik ketinggian muka air tanah nilai dari gaya tersebut semakin besar dikarenakan tegangan total tanah yang diterima oleh struktur terowongan semakin besar karena peningkatan tekanan air pori, sehingga gaya aksial terbesar terjadi pada kedalaman muka air tanah FWL (0 mbgl). Dapat disimpulkan bahwa ketinggian muka air tanah sangat memengaruhi deformasi dan gaya dalam yang terjadi pada terowongan.

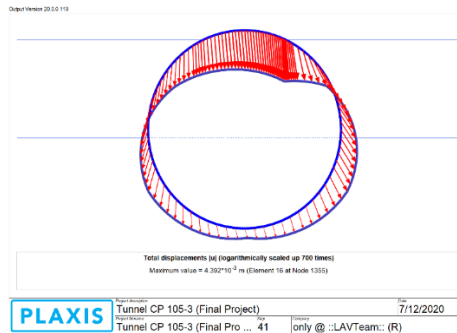
#### 4.1.2. Analisa Kondisi Seismik

Dalam pembahasan ini akan dibahas tentang perbandingan deformasi dan gaya-gaya dalam yang terjadi pada struktur terowongan *downtrack* dan struktur terowongan *uptrack* akibat beban gempa. Beban gempa dimodelkan pada Plaxis merupakan beban permukaan yang terdistribusi merata sepanjang bangunan eksiting, karena beban bangunan eksiting merupakan beban luar yang diterima oleh struktur terowongan.

##### 4.1.2.1. Deformasi Terowongan Kondisi Seismik



Gambar 4. 12 Pola deformasi terowongan *downtrack* seismik



Gambar 4. 13 Pola deformasi terowongan *uptrack* seismik

Tabel 4. 7 Deformasi Terowongan Kondisi Seismik

MAT	Terowongan	Deformasi maksimum yang terjadi ( $\Delta$ )
(mbgl)		(mm)
5	<i>Terowongan 1 (Downtrack)</i>	<b>16.660</b>
	<i>Terowongan 2 (Uprack)</i>	<b>15.756</b>
2	<i>Terowongan 1 (Downtrack)</i>	14.718
	<i>Terowongan 2 (Uprack)</i>	13.922

Pada Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 menunjukkan pola deformasi yang terjadi pada terowongan *downtrack* maupun terowongan *uptrack* akibat beban gempa. Dapat dilihat bahwa pola deformasi yang terjadi pada terowongan kedua terowongan hampir sama dengan pola deformasi kondisi non-seismik yaitu pola deformasi *ovaling* dimana terjadi pengecilan diameter vertikal pada *crown* dan *invert* terowongan serta pembesaran

diameter horizontal pada *springline* terowongan akibat beban yang diterima oleh terowongan. Hal ini dikarenakan beban gempa hanya dimodelkan sebagai beban permukaan saja.

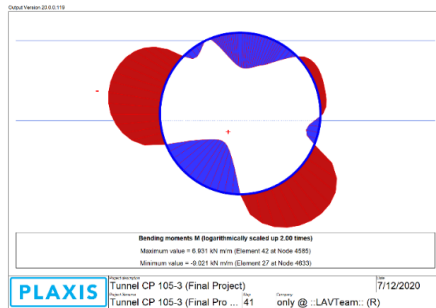
Pada Tabel 4.7 menunjukkan deformasi maksimum yang terjadi pada terowongan akibat beban gempa pada tiap variabel model kedalaman muka air tanah. Deformasi yang terjadi pada *lining* terowongan kemudian dikontrol dengan persyaratan deformasi dari LTA Singapura pada persamaan (2.28) dimana deformasi maksimum yang terjadi tidak boleh melebihi 25 mm.

Tabel 4. 8 Cek Persyaratan Deformasi Kondisi Seismik

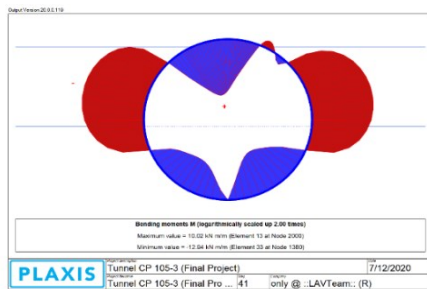
MAT	Terowongan	Defleksi yang Terjadi ( $\Delta$ )	$\Delta$ maks	Cek
(mbgl)		(mm)	(mm)	$\Delta \leq \Delta$ maks
5	<i>Downtrack</i>	16.6596	25	<b>OK</b>
	<i>Uptrack</i>	15.7559	25	<b>OK</b>
2	<i>Downtrack</i>	14.7181	25	<b>OK</b>
	<i>Uptrack</i>	13.9218	25	<b>OK</b>

Dapat dilihat pada Tabel 4.8 yang menunjukkan bahwa deformasi maksimum yang terjadi pada kedua terowongan akibat beban gempa memenuhi persyaratan batas deformasi yang ditentukan. Deformasi terbesar yang terjadi pada kedua terowongan yaitu pada kondisi kedalaman muka air tanah LWL (5 mbgl). Jika dibandingkan antara deformasi terowongan kondisi non-seismik (Tabel 4.1) dengan deformasi terowongan kondisi seismik akibat beban gempa (Tabel 4.7), deformasi terowongan ketika kondisi seismik lebih besar dibandingkan deformasi kondisi non-seismik (saat konstruksi terowongan).

### 4.1.2.2. Gaya-gaya Dalam pada Kondisi Seismik



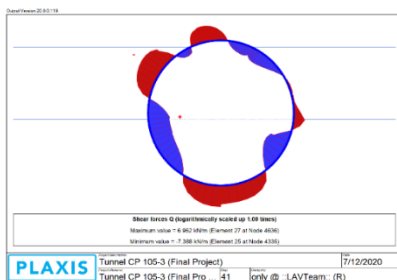
Gambar 4. 14 gaya momen terowongan *downtrack* seismik



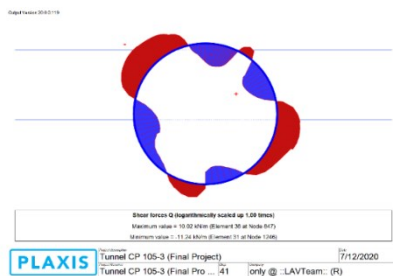
Gambar 4. 15 Gaya momen terowongan *uptrack* seismik

Tabel 4. 9 Gaya Momen Terowongan Seismik

MAT	Gaya Momen	
	M (kNm/m)	
(mbgl)	<i>Downtrack</i>	<i>Uprack</i>
5	9.659	12.938
2	9.021	12.872



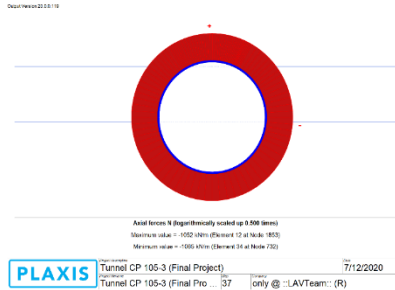
Gambar 4. 16 Gaya geser terowongan  
*downtrack* seismik



Gambar 4. 17 gaya geser terowongan  
*uptrack* seismik

Tabel 4. 10 Gaya Geser Terowongan Seismik

MAT	Gaya Geser	
	Q (kN/m)	
(mbgl)	<i>Downtrack</i>	<i>Uprack</i>
5	7.876	11.240
2	7.388	11.164



Gambar 4. 18 Gaya aksial terowongan seismik

Tabel 4. 11 Gaya Aksial Terowongan Seismik

MAT	Gaya Aksial	
	N (kN/m)	
(mbgl)	<i>Downtrack</i>	<i>Uptrack</i>
5	1141.949	1135.884
<b>2</b>	<b>1145.875</b>	<b>1135.895</b>

Pada Gambar 4.14 hingga Gambar 4.18 menunjukkan pola gaya-gaya dalam yang terjadi pada kedua terowongan akibat beban gempa. Pada Tabel 4.9 hingga Tabel 4.11 menunjukkan nilai gaya-gaya dalam yang terjadi pada kedua terowongan akibat beban gempa. Nilai gaya momen dan gaya geser terbesar yang terjadi pada kedua terowongan yaitu pada kedalaman muka air tanah LWL (5 mbgl). Sedangkan gaya aksial yang terbesar yang terjadi pada kedua terowongan yaitu pada kedalaman muka air tanah HWL (2 mbgl).

Jika dibandingkan gaya momen yang terjadi pada kedua terowongan antara kondisi non-seismik dengan kondisi seismik, menunjukkan bahwa gaya momen yang terjadi pada terowongan

pada kondisi seismik merupakan kondisi maksimum. Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.12.

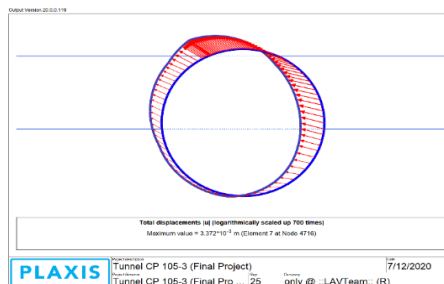
Tabel 4. 12 Perbandingan Gaya Momen

MAT	Kondisi Non-Seismik		Kondisi Seismik	
	Gaya Momen (kNm/m)		Gaya Momen (kNm/m)	
(mbgl)	<i>Downtrack</i>	<i>Uptrack</i>	<i>Downtrack</i>	<i>Uptrack</i>
5	9.526	2.898	<b>9.659</b>	<b>12.938</b>
2	7.906	2.897	9.021	12.872

Maka dapat disimpulkan bahwa dalam kondisi seismik pada kedalaman muka air tanah LWL (5 mbgl), deformasi dan gaya momen yang terjadi pada kedua terowongan merupakan kondisi maksimum sehingga dalam perencanaan terowongan kondisi gempa harus diperhatikan dengan baik.

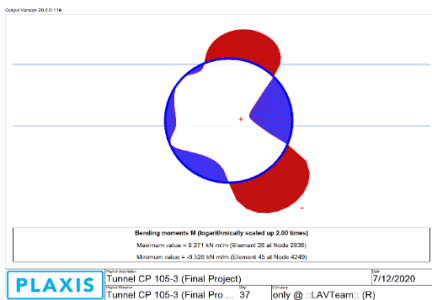
#### 4.1.3. Pengaruh Konstruksi Terowongan *Uptrack*

Pelaksanaan pengeboran terowongan yang dilaksanakan secara bertahap, akan mengakibatkan efek terhadap terowongan eksisting (terowongan *downtrack*). Oleh karena itu, perlu ditinjau deformasi dan gaya-gaya dalam yang terjadi pada terowongan *downtrack* akibat dari konstruksi terowongan *uptrack*.

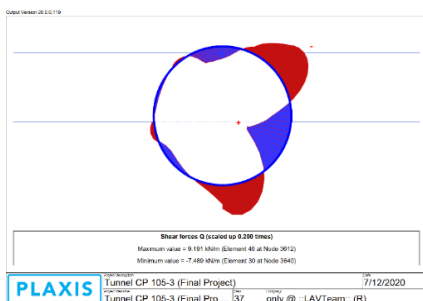


Gambar 4. 19 Pola deformasi *downtrack* akibat konstruksi *uptrack*





Gambar 4. 20 Gaya momen *downtrack* akibat konstruksi *uptrack*



Gambar 4. 21 Gaya geser terowongan *downtrack* akibat konstruksi *uptrack*

Tabel 4. 13 Deformasi *Downtrack* Akibat Konstruksi *Uptrack*

MAT (mbgl)	Terowongan	Deformasi (mm)
5	Terowongan <i>Downtrack</i>	3.372
2		2.777
0		2.399

Tabel 4. 14 Perbandingan Gaya Dalam Sebelum dan Sesudah Konstruksi *Uptrack*

MAT	Gaya Momen (kNm/m)		Gaya Geser (kN/m)	
	(mbgl)	Sebelum	Sesudah	Sebelum
5	2.888	<b>9.526</b>	2.535	<b>9.191</b>
2	2.887	<b>7.906</b>	2.536	<b>7.644</b>
0	2.878	<b>6.862</b>	2.525	<b>6.689</b>

Pada Gambar 4.19 menunjukkan pola deformasi yang terjadi pada terowongan *downtrack* akibat efek dari konstruksi terowongan *uptrack*. Pada Tabel 4.13 menunjukkan nilai deformasi yang terjadi pada terowongan *downtrack*. Dapat dilihat bahwa proses konstruksi terowongan secara bertahap mempunyai efek terhadap terowongan eksisting (terowongan *downtrack*). Hal itu dikarenakan terganggunya tanah di sekitar terowongan eksisting akibat penggalian terowongan *uptrack*.

Hal ini juga didukung dengan peningkatan gaya dalam yang terjadi pada terowongan *downtrack* antara sebelum dan sesudah konstruksi terowongan *uptrack*, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.14. Peningkatan gaya dalam terbesar terjadi pada kondisi kedalaman muka air tanah LWL (5 mbgl). Untuk deformasi dan gaya dalam terbesar yang terjadi pada terowongan *downtrack* yaitu pada kondisi kedalaman muka air tanah LWL (5 mbgl).

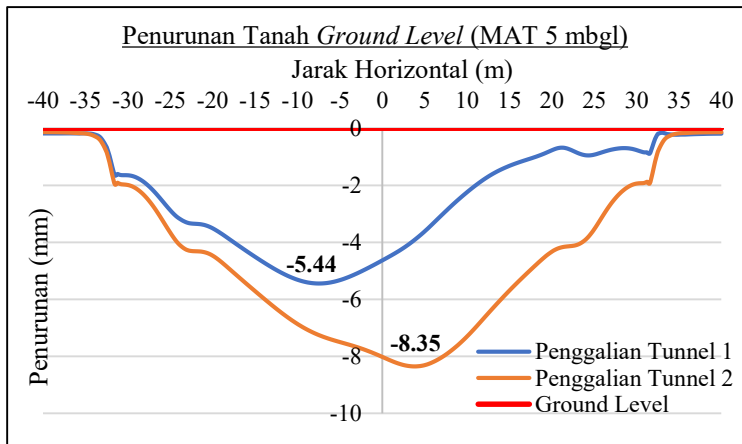
#### 4.1.4. Penurunan Tanah Akibat Konstruksi Terowongan

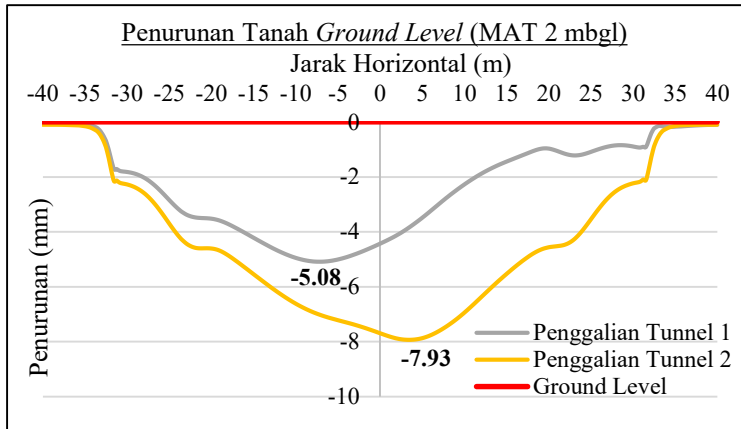
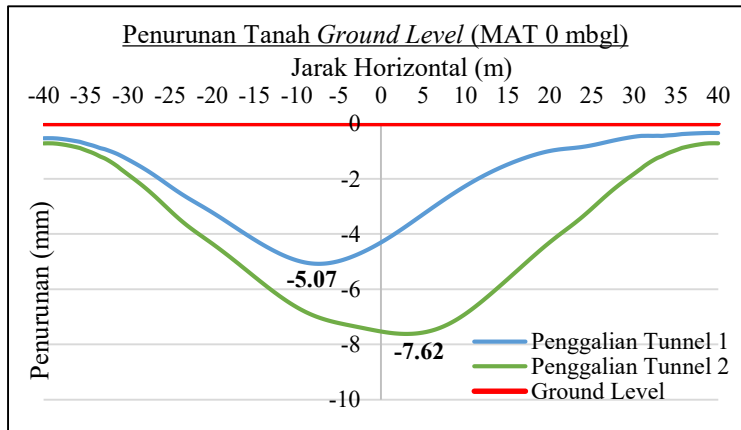
Dalam bahasan ini akan dibahas penurunan permukaan tanah yang terjadi pada *ground level* akibat konstruksi kedua terowongan. Pembahasan ini berfokus kepada pola penurunan yang terjadi dan besaran penurunan yang terjadi pada masing-masing variabel model kedalaman muka air tanah (MAT).

Tabel 4. 15 Penurunan Tanah pada *Ground Level*

MAT (mbgl)	Tahap Konstruksi	Penurunan Tanah
		S (mm)
5	Terowongan <i>Downtrack</i>	5.441
	Terowongan <i>Uptrack</i>	<b>8.353</b>
2	Terowongan <i>Downtrack</i>	5.083
	Terowongan <i>Uptrack</i>	7.934
0	Terowongan <i>Downtrack</i>	5.079
	Terowongan <i>Uptrack</i>	7.615

Pada Tabel 4.15 menunjukkan besar penurunan tanah pada *ground level* yang terjadi akibat tahapan konstruksi terowongan pada tiap-tiap model kedalaman muka air tanah. Penurunan tanah yang terjadi pada kondisi kedalaman muka air tanah LWL (5 mbgl) merupakan penurunan maksimum yaitu sebesar 8,353 mm. Penurunan tanah yang terjadi meningkat tiap tahapan konstruksi.

Gambar 4. 22 Penurunan tanah *ground level* kondisi LWL

Gambar 4. 23 Penurunan tanah *ground level* kondisi HWLGambar 4. 24 Penurunan tanah *ground level* kondisi FWL

Dapat dilihat pada Gambar 4.22 hingga Gambar 4.24 penurunan tanah yang terjadi pada *ground level* semakin bertambah dari penggalian terowongan *downtrack* (Tunnel 1)

hingga terowongan *uptrack* (*Tunnel 2*). Hal ini disebabkan semakin banyaknya kehilangan volume tanah (*volume loss*) akibat konstruksi dari kedua terowongan. Pola penurunan tanah pada *ground level* dari masing-masing model kedalaman muka air tanah menunjukkan pola penurunan yang sama, yaitu penurunan tanah di atas titik *crown* terowongan atau puncak terowongan pada saat proses penggalian terowongan.

Untuk persyaratan maksimum penurunan tanah pada *ground level* berdasarkan SNI 8460 : 2017 dihitung sesuai persamaan (2.24) sebagai berikut:

$$S_{max} = \frac{0.0031 V_L D^2}{i}$$

$$i = KZ_0$$

dengan,

$K$  = Parameter penurunan tanah = 0,5 (Lempung)

$Z_0$  = Kedalaman dari permukaan tanah ke titik *crown* = 15,962 m

$V_L$  = Volume kehilangan tanah saat penggalian = 0,5 %

$D$  = Diameter luar terowongan = 6.55 m

$$i = KZ_0 = (0,5) \times 15,962 = 7,981$$

$$S_{max} = \frac{0.0031 V_L D^2}{i}$$

$$S_{max} = \frac{0.0031 (2 \times 0,5) (6.55)^2}{7,981} = 0,0166 \text{ m} = 16,6 \text{ mm}$$

Jadi maksimum penurunan tanah pada *ground level* yang terjadi untuk konstruksi dua terowongan adalah 16,6 mm. Dari hasil perhitungan  $S_{max}$  tersebut digunakan untuk mengontrol penurunan tanah pada *ground level* akibat penggalian kedua terowongan dari masing-masing model kedalaman muka air tanah.

Tabel 4. 16 Cek Penurunan Tanah pada *Ground Level*

MAT	Penurunan Tanah yang Terjadi (S)	S maks	Cek
(mbgl)	(mm)	(mm)	$S \leq S_{maks}$
5	8.353	16.6	<b>OK</b>
2	7.934	16.6	<b>OK</b>
0	7.615	16.6	<b>OK</b>

Dari hasil kontrol penurunan menunjukkan bahwa penurunan yang terjadi akibat konstruksi kedua terowongan masih di bawah penurunan maksimum ( $S_{max}$ ).

Pada *ground level* terdapat bangunan eksisting yaitu bangunan jalan raya, walaupun bangunan eksisting tersebut sudah dimodelkan sebagai beban pada model Plaxis, perlu juga dikontrol risiko terhadap bangunannya. Untuk kontrol risiko dapat dilihat pada tabel (2.4) yang mengacu pada SNI 8460:2017 tentang klasifikasi tipikal kerusakan berdasarkan penurunan bangunan maksimum akibat konstruksi terowongan. Dari Tabel 4.15 penurunan yang terjadi pada *ground level* maksimum sebesar 8,353 mm dimana penurunan yang terjadi merupakan Kategori Risiko 1 karena penurunan yang terjadi kurang dari 10 mm sehingga risiko dapat diabaikan. Dari kedua kontrol terhadap penurunan tersebut disimpulkan bahwa konstruksi dari kedua terowongan dapat dikatakan aman terhadap bangunan sekitar.

#### 4.1.5. Stabilitas Terowongan

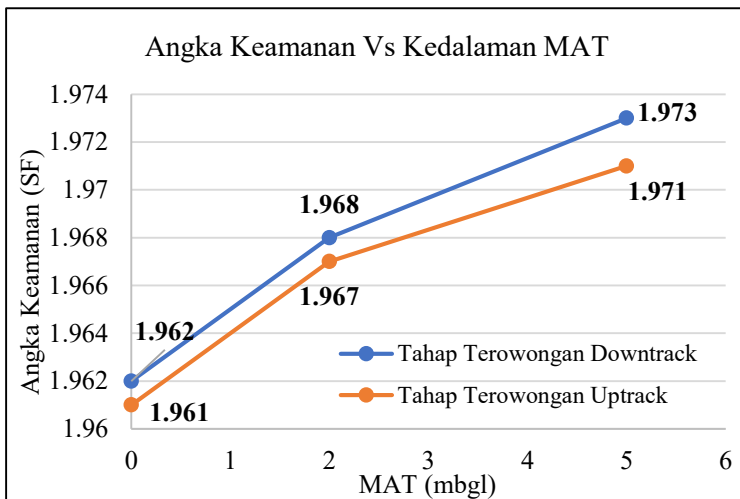
Analisa stabilitas terowongan menggunakan nilai angka keamanan (SF) yang didapat dari analisa perhitungan Plaxis. Kemudian hasil dari angka keamanan tersebut akan dikontrol dengan persyaratan stabilitas terowongan dari LTA Singapura tentang *Bored Tunnel* yang juga dipakai oleh proyek MRT Jakarta untuk kontrol stabilitas terowongan. Nilai persyaratan stabilitas terowongan yaitu sebesar 1,2 ( $SF \geq 1,2$ ).

Tabel 4. 17 Cek Angka Keamanan Tahap Konstruksi

MAT (mbgl)	Tahap Konstruksi Terowongan	Angka Keamanan (SF)	SF min	Cek
				SF > SF min
5	<i>Downtrack</i>	1.973	1.2	<b>OK</b>
	<i>Uptrack</i>	1.971	1.2	<b>OK</b>
2	<i>Downtrack</i>	1.968	1.2	<b>OK</b>
	<i>Uptrack</i>	1.967	1.2	<b>OK</b>
0	<i>Downtrack</i>	1.962	1.2	<b>OK</b>
	<i>Uptrack</i>	1.961	1.2	<b>OK</b>

Tabel 4. 18 Cek Angka Keamanan Tahap Gempa

MAT (mbgl)	Angka Keamanan (SF)	SF min	Cek
			SF > SF min
5	1.559	1.2	<b>OK</b>
2	1.559	1.2	<b>OK</b>



Gambar 4. 25 Grafik angka keamanan tahap konstruksi

Dari hasil kontrol angka keamanan (Tabel 4.17 dan Tabel 4.18) baik angka keamanan tahap konstruksi maupun angka keamanan kondisi seismik kedua-duanya memenuhi persyaratan aman.

Pada Tabel 4.17 juga menunjukkan nilai angka keamanan (SF) terowongan *uptrack* yang diperoleh dari pemodelan lebih kecil dibandingkan dengan angka keamanan terowongan *downtrack*. Hal ini dikarenakan terganggunya tanah di sekitar terowongan *downtrack* akibat penggalian terowongan *uptrack* sehingga angka keamanan yang diperoleh semakin kecil.

Dapat dilihat pada Gambar 4.25, nilai angka keamanan (SF) paling kecil terjadi pada kedalaman muka air tanah FWL (0 mbgl), sedangkan angka keamanan terbesar terjadi pada kedalaman muka air tanah LWL (5 mbgl) dan semakin naik ketinggian muka air tanah, angka keamanan semakin kecil, sehingga air tanah mempunyai pengaruh terhadap stabilitas terowongan yang terjadi. Hal ini sesuai dengan persamaan stabilitas terowongan terhadap gaya *uplift* yang ditunjukkan pada persamaan (2.25) bahwa stabilitas terowongan dipengaruhi air tanah ( $SF = R/U$ ).

Air dalam tanah menimbulkan tekanan hidrostatik pada terowongan yang berdampak pada pengurangan berat efektif *lining* terowongan karena tekanan hidrostatik yang terjadi pada terowongan akibat adanya air tanah berlawanan dengan arah gaya gravitasi. Sehingga dapat dikatakan ketinggian muka air tanah dapat memengaruhi stabilitas terowongan yang terjadi karena semakin tinggi muka air tanah, semakin besar tekanan hidrostatik yang ditimbulkan atau yang bekerja pada terowongan. Dapat disimpulkan bahwa semakin dalam kedalaman muka air tanah, stabilitas terowongan yang terjadi semakin besar.

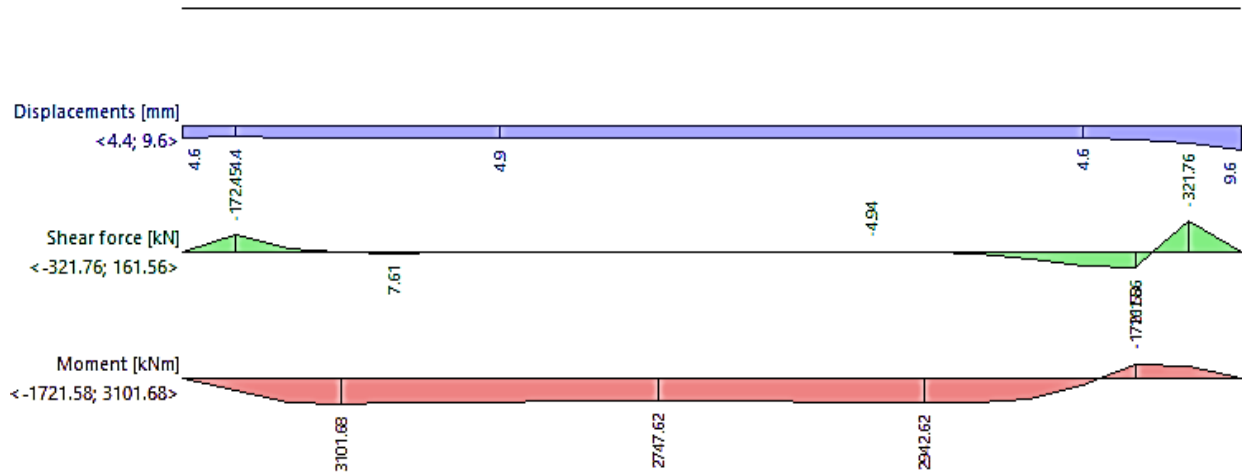
#### 4.2. Analisa Terowongan Pemodelan GEO5

Detail hasil pemodelan terowongan pada GEO5 (*Output* GEO5 - Program *Beam*) sebagai berikut:



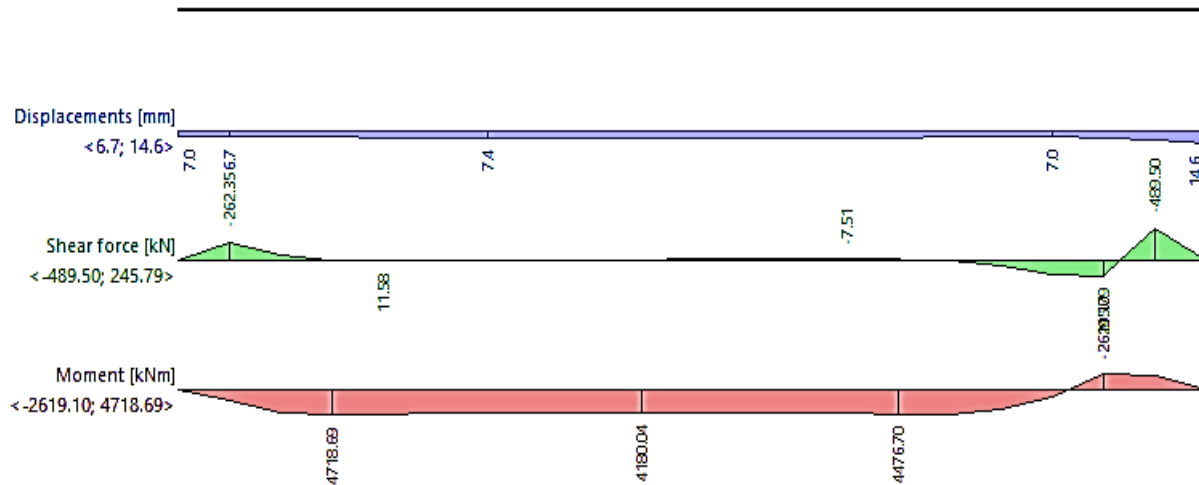
### 4.2.1. Hasil Pemodelan GEO5

1. Kombinasi Beban LC 1 (SLS = 1.0 W + 1.0 S)



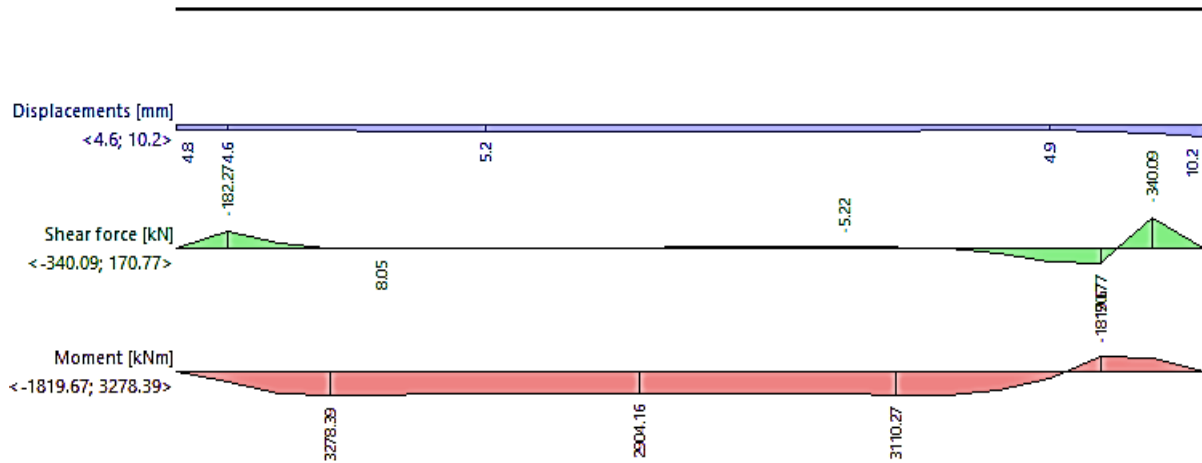
Gambar 4. 26 *Output* GEO5 kombinasi beban LC 1

2. Kombinasi Beban LC 2 (ULS = 1.5 W + 1.6 S)



Gambar 4. 27 Output GEO5 kombinasi beban LC 2

3. Kombinasi Beban LC 3 (MDE = 1.0 W + 1.0 S + 1.0 E)



Gambar 4. 28 Output GEO5 kombinasi beban LC 3

Dalam analisa pemodelan terowongan arah memanjang pada GEO5-*Beam*, balok yang dimodelkan merupakan balok tanpa perletakan (tertanam pada tanah). Dari hasil pemodelan ini, beda penurunan yang terjadi sepanjang *section* akan dianalisa terhadap syarat kemiringan (*slope*) maksimum yang diijinkan akibat perbedaan penurunan yang terjadi.

Tabel 4. 19 Rangkuman Hasil Pemodelan GEO5

<b>Terowongan Section CP 105-3 (STA 12+403 - 12+699)</b>						
Kombinasi Beban	Penurunan, S (mm)		Gaya Geser (kN)		Momen Lentur (kNm)	
	Min	Maks	Min	Maks	Min	Maks
LC 1	4.4	9.6	-321.76	161.56	-1721.58	3101.68
<b>LC 2</b>	<b>6.7</b>	<b>14.6</b>	<b>-489.5</b>	<b>245.79</b>	<b>-2619.1</b>	<b>4718.69</b>
LC 3	4.6	10.2	-340.90	170.77	-1819.67	3278.39

Pada Gambar 4.26 hingga Gambar 4.28 menunjukkan pola penurunan dan pola gaya dalam yang terjadi pada arah memanjang struktur terowongan. Pada gambar-gambar tersebut menunjukkan pola penurunan yang terjadi pada terowonga arah memanjang yaitu nilai terkecil terjadi pada bagian ujung kiri model struktur dan penurunan terbesar terjadi pada bagian ujung kanan model struktur, hal ini menunjukkan terdapat beda penurunan yang terjadi pada terowongan dalam arah memanjang seiring dengan bertambahnya panjang dari model struktur.

Pada Tabel 4.19 menunjukkan hasil dari pemodelan GEO5 dari masing-masing kombinasi beban. Dapat dilihat bahwa penurunan terbesar terjadi pada kasus kombinasi beban LC 2 (ULS) yaitu sebesar 14,6 mm. Gaya dalam terbesar terjadi pada kasus kombinasi LC 2 (ULS) dengan nilai gaya geser maksimum

sebesar 489,5 kN/m dan nilai momen lentur maksimum sebesar 4718,9 kNm.

#### 4.2.2. Analisa Penurunan Terowongan Arah Memanjang

Dalam analisa ini, penurunan yang terjadi akibat dari masing-masing kombinasi beban akan dianalisa beda penurunan yang terjadi sehingga. Karena pola dari penurunan yang terjadi pada masing-masing kombinasi beban (terdapat kemiringan) dari ujung kiri model struktur hingga ujung kanan model struktur, dan nilai minimal yang terjadi yaitu pada ujung kiri model struktur sedangkan penurunan terbesar terjadi pada ujung kanan struktur, maka untuk mencari perbedaan penurunannya ( $\Delta S$ ) adalah nilai penurunan maksimum ( $S_{maks}$ ) dikurangi dengan nilai penurunan minimum ( $S_{min}$ ).

Tabel 4. 20 Beda Penurunan yang Terjadi

Kombinasi Beban	Penurunan, S (mm)		Beda Penurunan yang Terjadi, $\Delta S$ (mm)
	S min	S maks	$\Delta S = S_{maks} - S_{min}$
LC 1 (SLS)	4.4	9.6	5.2
<b>LC 2 (ULS)</b>	<b>6.7</b>	<b>14.6</b>	<b>7.9</b>
LC 3 (MDE)	4.6	10.2	5.6

Dapat dilihat pada Tabel 4.20, beda penurunan terbesar terjadi pada kondisi beban ultimit (LC 2) yaitu sebesar 7,9 mm. Dalam hal ini yang akan dianalisa adalah beda penurunan terbesar saja. Untuk mencari nilai dari gradien kemiringannya, nilai perbedaan penurunan yang ditinjau dibagi dengan panjang struktur yang dimodelkan (panjang *section*) yaitu tinggi vertikal dibagi dengan jarak horizontal beda tingginya. Panjang *section* yang dimodelkan sebesar 296 m. Maka gradien kemiringannya adalah sebagai berikut:

$$Slope = \frac{V}{H} = \frac{7,9}{296 \times 10^3} = \frac{1}{37468,354}$$

Jadi gradien kemiringannya (*slope*) yaitu 1 : 37.468,354.

Untuk persyaratan batas maksimum kemiringan (*slope*) ijin, mengacu pada standar dari LTA Singapura tentang *Bored Tunnel* bahwa nilai kemiringan maksimum yaitu 1 (V) : 2000 (H). Sedangkan kemiringan yang terjadi yaitu 1 (V) : 37.468,354 (H) maka dengan ini dapat dikatakan beda penurunan yang terjadi pada terowongan arah memanjang akibat dari masing-masing desain kombinasi pembebanan masih dikatakan aman dan penurunan yang terjadi pada arah memanjang juga tidak terlalu besar.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

Dari hasil analisa dapat disimpulkan bahwa:

1. Deformasi dan stabilitas terowongan dipengaruhi oleh kedalaman muka air tanah (MAT).
2. Pada kondisi non-seismik (tahap konstruksi), deformasi dan gaya-gaya dalam terbesar terjadi pada kedalaman muka air tanah LWL (5 mbgl).
3. Semakin tinggi muka air tanah, tekanan air pori yang terjadi semakin besar dan menyebabkan tegangan-tegangan antarmuka terowongan semakin turun, sehingga deformasi dan gaya-gaya dalam yang terjadi semakin kecil.
4. Penurunan tanah pada *ground level* yang terjadi akibat konstruksi kedua terowongan dapat dikatakan aman terhadap bangunan eksisting yang ada.
5. Deformasi dan gaya momen terbesar yang terjadi pada terowongan yaitu ketika kondisi seismik, oleh karena itu, perhitungan beban gempa harus dipertimbangkan dalam analisa terowongan.
6. Konstruksi dari terowongan *uptrack* menyebabkan peningkatan gaya-gaya dalam yang terjadi pada terowongan *downtrack* yang diakibatkan terganggunya stabilitas tanah di sekitar terowongan *downtrack*.
7. Stabilitas yang terjadi pada terowongan semakin kecil seiring dengan meningkatnya ketinggian muka air tanah, karena semakin tinggi muka air tanah tekanan hidrostatik yang terjadi pada terowongan semakin besar, sehingga gaya *uplift* pada terowongan juga semakin besar.



8. Penurunan dan perbedaan penurunan yang terjadi pada terowongan arah memanjang dapat dikatakan aman.
9. Semakin panjang *section* terowongan, semakin besar penurunan yang terjadi d terowongan arah memanjang.
10. Dari keseluruhan hasil analisa yang telah didapatkan, dapat disimpulkan bahwa kedalaman muka air tanah sangat memengaruhi konstruksi terowongan baik dari segi deformasi, gaya dalam, dan stabilitas terowongan, sehingga kedalaman muka air tanah yang ada menjadi faktor yang sangat penting untuk dipertimbangkan dalam perencanaan konstruksi terowongan.

## 5.2. Saran

Dari pembahasan dan analisa dalam tugas akhir ini, penulis ingin menyampaikan saran sebagai berikut:

1. Beban gempa yang dimodelkan dalam analisa ini merupakan pendekatan sederhana yang dianggap sebagai beban permukaan dengan model *pseudo-static*. Penulis menyarankan beban gempa dimodelkan dengan pemodelan dinamik agar lebih akurat.
2. Tebal perkerasan lapisan jalan yang dihitung dalam beban permukaan merupakan asumsi dari penulis. Sehingga penulis menyarankan untuk meninjau data lapangan secara langsung agar informasi yang didapat lebih akurat.
3. Dalam meninjau persyaratan-persyaratan tentang konstruksi terowongan, sebaiknya berpedoman pada daerah dengan kondisi geologi yang hampir sama dengan Indonesia, agar persyaratan yang diperoleh sesuai dengan kondisi-kondisi geologi yang ada di Indonesia.

## DAFTAR PUSTAKA

- Das, Braja M. 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Das, Braja M. 1985. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.
- Bowles, Joseph E. 1988. *Analisis dan Desain Pondasi Edisi Keempat Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Hardiyatmo, H. C. 2002. *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. 2002. *Mekanika Tanah II*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Rahardjo, Paulus. P. 2004. *Teknik Terowongan*. Bandung: Geotechnical Engineering Center.
- Ameratunga, J. 2016. *Correlation of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. Townsville: Springer.
- Hung, J. 2009. *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnel – Civil Element*. New York: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
- British Tunneling Society. 2004. *Specifications for Tunneling Third Edition*. London: Thomas Telford Ltd.
- BS 8110. 1997. *Structural Use of Concrete Part 1 – Code of Practice for Design and Construction*. London: British Standard Institution.
- Wang, J. N. 1993. *Seismic Design of Tunnel*. New York: A State of the art Approach Monograph 7. Parsons Brinckerhoff.
- Kuesel, T. R. 1969. Earthquake Design Criteria for Subways. *Journal of The Structure Divisions ASCE*, 1213-1231.
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE). 2018. *Standard Specifications for Tunneling 2016 - Shield Tunnel*. Tokyo: Working Group for Shield Tunneling; Subcommittee on

- English Edition of the Japanese Standard for Tunneling.  
 Land Transport and Authority (LTA). 2019. *Civil Design Criteria for Road and Rail Transit System*. Republic of Singapore.
- International Tunnelling Association (ITA). 2000. *Guidelines for The Design of Shield Tunnel Lining*. Tunnelling and Underground Space Technology, Pergammon Press, Vol. 15, No. 3, pp. 303-331. Elsevier Science Ltd.
- Carranza-Torres, C.Reich, T.Safer D. 2013. *Stability of shallow circular tunnels in soils using analytical and numerical models*. In: *Proceedings of the 61st Minnesota Annual Geotechnical Engineering Conference*. St. Paul Campus: University of Minnesota.
- Hendarto, Standing, J. 2017. *Ground Response to Tunnel Construction for the Jakarta MRT*. London: Departemen of Civil and Environmental Engineering; Imperial College London.
- SNI 8460. 2017. *Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional Indonesia.
- SNI 1725. 2016. *Pembebanan untuk Jembatan*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional Indonesia.
- SNI 2847. 2013. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional Indonesia.
- Departemen PU. 1987. *Petunjuk Perencanaan Perkerasan Lentur Jalan Raya Metode Analisa Komponen*. Jakarta: Yayasan Badan Penerbit PU.
- Departemen PU. 1985. *Petunjuk Perencanaan Perkerasan Kaku*. Jakarta: Yayasan Badan Penerbit PU.
- Republik Indonesia. *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 34 Tahun 2006 Tentang Jalan*.
- Yulianto, Alfredo J. 2016. *Studi Perilaku Terowongan Bor di Bawah Fondasi Tiang-Rakit Menggunakan Plaxis 8.6*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.

- Hakim, Muhammad. I. 2016. *Analisis Stabilitas Muka Terowongan Berdasarkan Metode Earth Pressure Balanced Shield*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Effendi, Luthfi. 2018. *Hubungan Korelasi Stratigrafi Bawah Permukaan dengan Kestabilan Terowongan (Studi Kasus: Terowongan MRT Jakarta)*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- PLAXIS 2D Reference Manual Connect Edition V20.*
- PLAXIS 2D Tutorial Manual Connect Edition V20.*
- PLAXIS 2D Material Models Connctet V20.*
- GEO5 User's Guide Edition 2020.*
- PT. MRT Jakarta. 2016. *MRT Jakarta Annual Report 2016*. <https://www.jakartamrt.co.id/mrt-jakarta/annual-report/>. Di akses pada 8 Agustus 2020.
- SOWJ. 2013. *Geotechnical Interpretative Report*. Jakarta: PT. MRT Jakarta.
- SOWJ. 2014. *Bored Tunnel Design for Section CP 105-3*. Jakarta: PT MRT Jakarta.
- SOWJ. 2014. *Ground Movement Analysis Report*. Jakarta: PT. MRT Jakarta.
- SOWJ. 2014. *Seismic Hazard Assesement for MRT Project of DKI Jakarta*. Jakarta: PT. MRT Jakarta.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **LAMPIRAN**

# BORING NUMBER 105-09

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** Sakrib

**DRILLING METHOD** Wash Boring

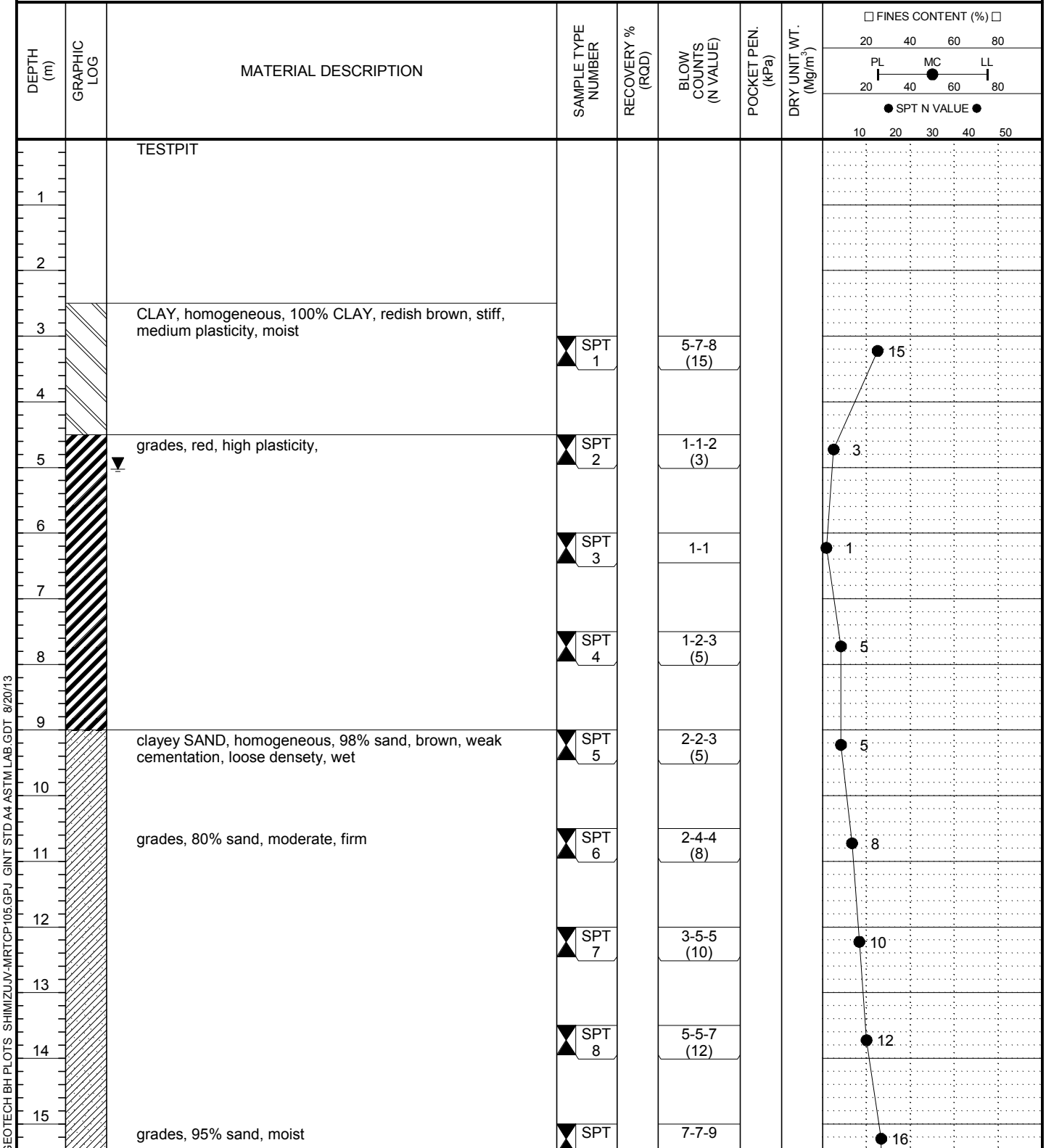
**LOGGED BY** M. Hirzan **CHECKED BY** Andrianto

**REMARKS** TBM 12+500

**NORTHING, EASTING, ELEV.** 9312889.53 , 701351.618 , 14.266 m

**GROUND WATER LEVELS, AVERAGE:** 5.03

DATE	START	END	DATE	START	END	DATE	START	END
20/06/2013	5.75 m	4.30 m						



GEOTECH BH PLOTS SHIMIZU-JV-MRTP105.GPJ GINT STD A4 ASTM LAB.GDT 8/20/13

(Continued Next Page)

# BORING NUMBER 105-09

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

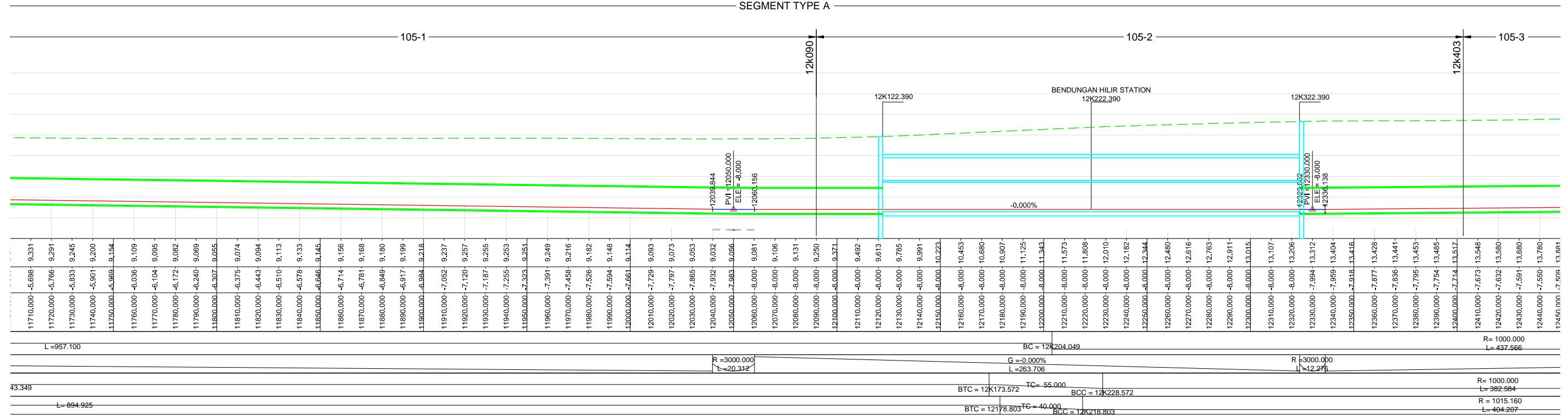
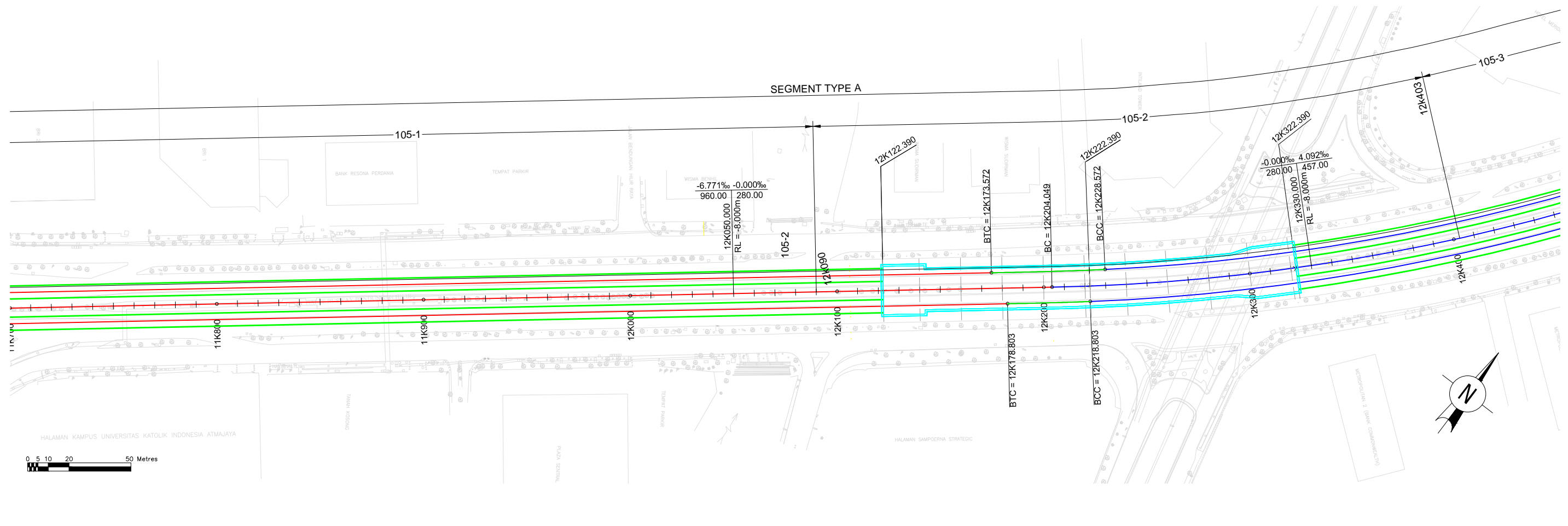
DEPTH (m)	GRAPHIC LOG	MATERIAL DESCRIPTION	SAMPLE TYPE NUMBER	RECOVERY % (ROD)	BLOW COUNTS (N VALUE)	POCKET PEN. (kPa)	DRY UNIT WT. (Mg/m <sup>3</sup> )	FINES CONTENT (%)	
								PL	MC LL
16		clayey SAND, homogeneous, 98% sand, brown, weak cementation, loose density, wet ( <i>continued</i> )	9		(16)				
17		CLAY, homogeneous, 100% clay, light gray, soft, medium plasticity, moist	▲ SPT 10		7-8-8 (16)				● 16
18		grades, brown, stiff,	▲ SPT 11		7-8-10 (18)				● 18
19									
20		grades, gray	▲ SPT 12		9-9-12 (21)				● 21
21									
22		grades, brown, hard, low plasticity	▲ SPT 13		10-12-14 (26)				● 26
23			▲ SPT 14		15-18-23 (41)				● 41
24		grades, firm, medium plasticity	▲ SPT 15		13-17-21 (38)				● 38
25									
26			▲ SPT 16		12-12-15 (27)				● 27
27		grades, gray	▲ SPT 17		10-11-13 (24)				● 24

Bottom of borehole at 27.00 meters.

GEOTECH BH PLOTS SHIMIZU-JV-MRTP105.GPJ GINT STD A4 ASTM LAB.GDT 8/20/13







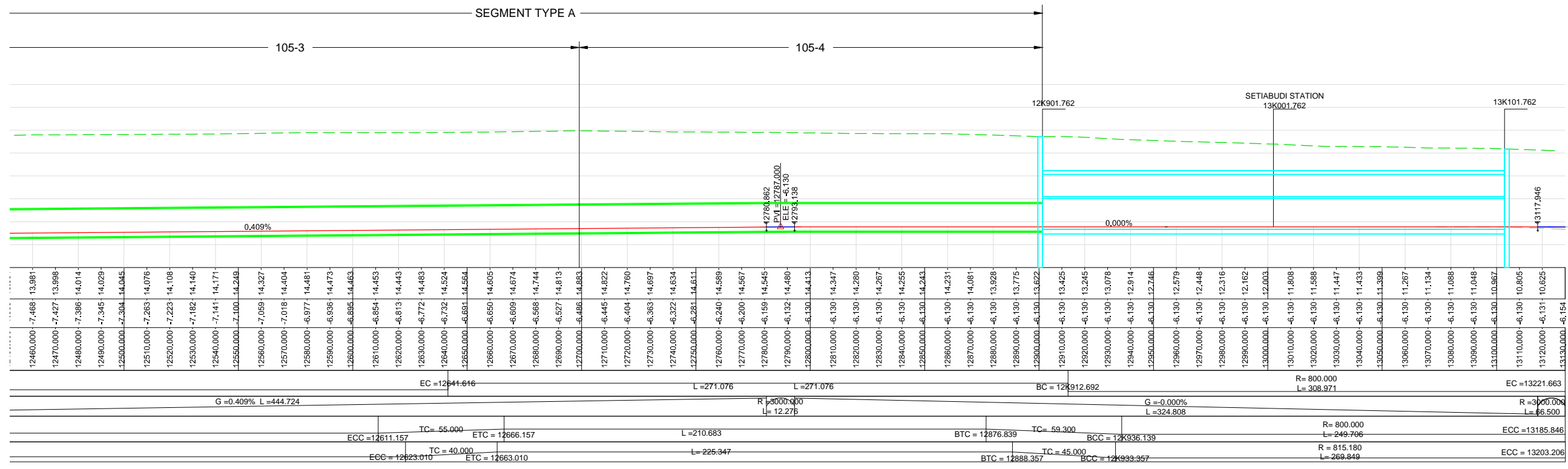
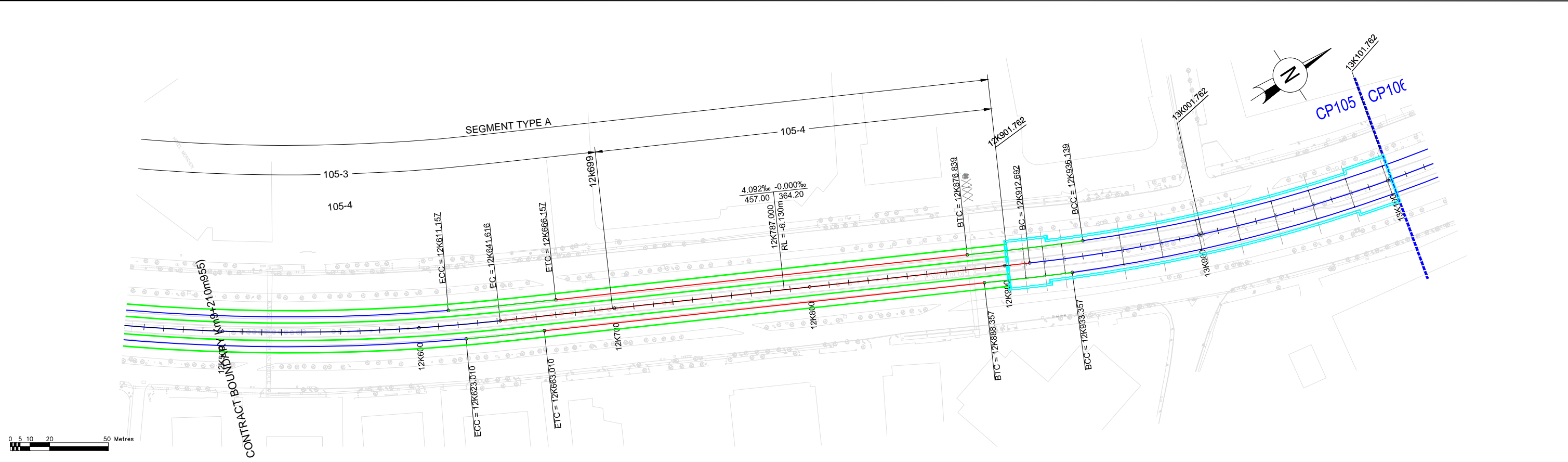
Rev.	Date	Drawn By	Description	Designed by	Chk'd	App'd
-	07.11.2014	JAC	ISSUED FOR APPROVAL	YCL	AV	AW

ENDORSED BY	KENJI KAJIKAWA	Engineers :		Employer :	
APPROVED BY	KAZUYA OSAKO	Contractors :		NOTICED BY	NAME
VERIFIED BY	KHO CHZA MAIN	Third Party Verifier :		PRESIDENT DIRECTOR	DONO BOESTAMI
DESIGNED BY	IRAWAN TANI	Designers :		DIRECTOR OF CONSTRUCTION	M. NASYIR
DESIGNED BY	PAULUS P. RAHARDJO			PROJECT MANAGER	ALLAN TANDIONO

Project Title :		CONSTRUCTION OF JAKARTA MASS RAPID TRANSIT PROJECT UNDERGROUND SECTION - CP 105 : 11K+043~13K+102	
Drawing Title :		RANGE OF SEGMENT TYPE (Km11+700.000m TO Km12+450.000m)	
Scale :	1:1000 @ A1	Drawing No. :	5/BTN/ALN/0002
	1:2000 @ A3	Rev.	-
		Status	T
CAD File Name : SBTNALN0001-.dwg			



NOTES:

Rev.	Date	Drawn By	Description	Designed by	Chk'd	App'd
-	07.11.2014	JAC	ISSUED FOR APPROVAL	YCL	AV	AW

ENDORSED BY	KENJI KAJIKAWA
APPROVED BY	KAZUYA OSAKO
VERIFIED BY	KHO CHZA MAIN
DESIGNED BY	IRAWAN TANI NO.0043/PJK-A/DPPB/I-2012
DESIGNED BY	PAULUS P. RAHARDJO NO.0123/PJG-A/DPPB/I-2012

Engineers : **JCMC**

Contractors : **SOWJ**

Third Party Verifier : **CPG CONSULTANTS**

Designers : **Mott MacDonald** in association with **ONG & ONG**

Employer : **mrt jakarta PT MRT Jakarta**

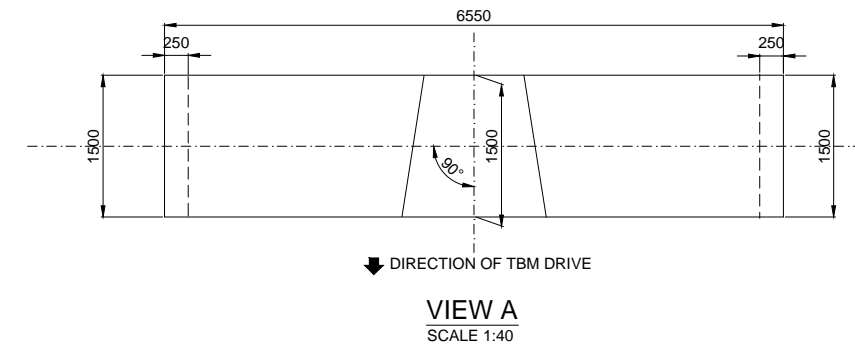
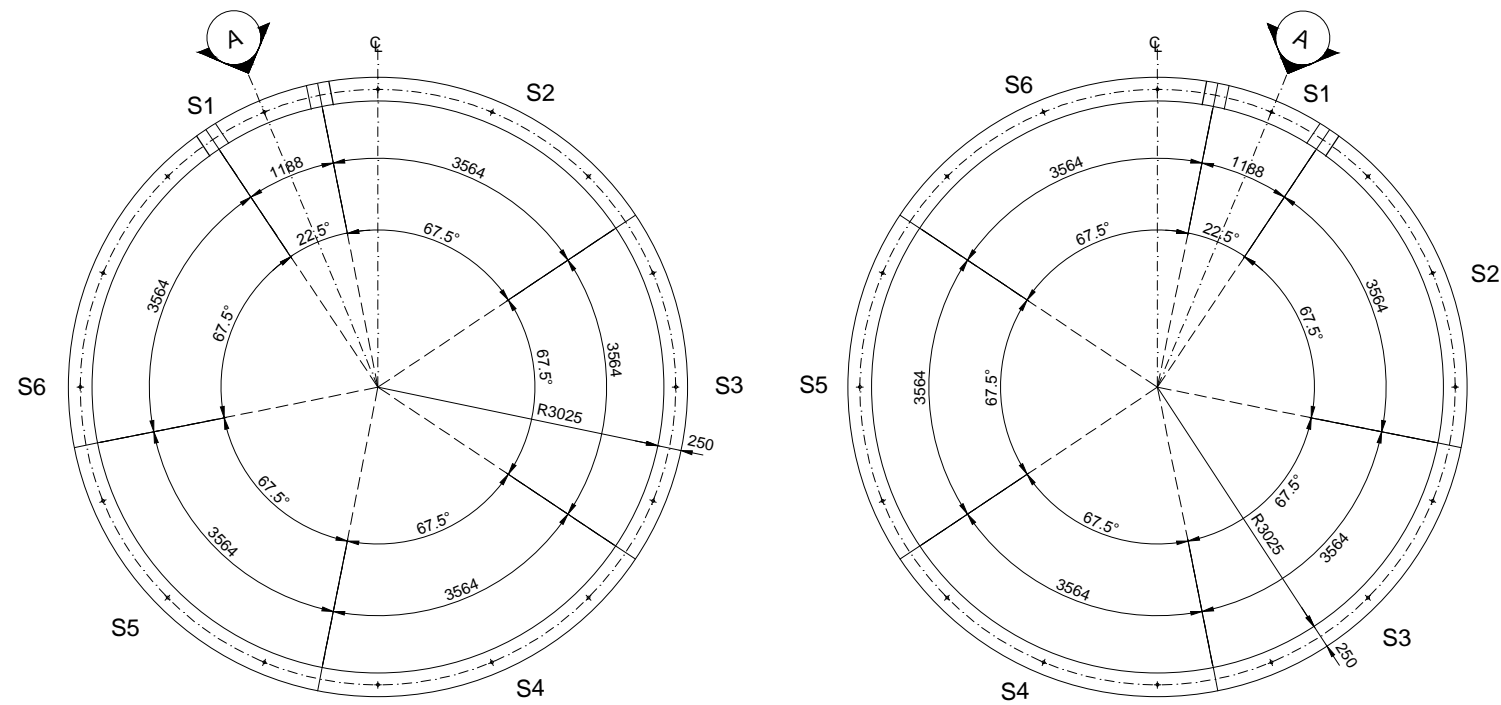
NOTICED BY	NAME	SIGNATURE
PRESIDENT DIRECTOR	DONO BOESTAMI	
DIRECTOR OF CONSTRUCTION	M. NASYIR	
PROJECT MANAGER	ALLAN TANDIONO	

Project Title : CONSTRUCTION OF JAKARTA MASS RAPID TRANSIT PROJECT UNDERGROUND SECTION - CP 105 : 11K+043~13K+102

Drawing Title : RANGE OF SEGMENT TYPE (Km12+450.000m TO Km12+901.762m)

Scale : 1:1000 @ A1 1:2000 @ A3	Drawing No. : 5/BTN/ALN/0001	Rev. : -	Status : T
------------------------------------	------------------------------	----------	------------

CAD File Name : 5BTN\ALN0001-.dwg



**TYPICAL ELEVATION TAPER RING**  
SCALE 1:40  
(LOOKING FROM TUNNEL BORING MACHINE)

- NOTES:**
- ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
  - PROPERTIES OF MATERIAL : CONCRETE(SEGMENTS): CHARACTERISTIC COMPRESSIVE CUBE STRENGTH OF CONCRETE AT 28 DAYS  $f_{cu}=60N/mm^2$  REINFORCEMENT: CHARACTERISTIC YIELD STRESS  $f_{yk}=390N/mm^2$
  - BOLTS, NUTS AND WASHERS SHALL BE GRADE 8.8 TO BS 5950-1:2000.
  - THE M12 BOLT SOCKET: TO BE ADVISED IN CONSTRUCTION DESIGN
  - TAPER VOLUME TO BE ADVISED IN CONSTRUCTION DESIGN

Rev.	Date	Drawn By	Description	Designed by	Chk'd	App'd
-	07.11.2014	JAC	ISSUED FOR APPROVAL	YCL	AV	AW

ENDORSED BY	KENJI KAJIKAWA
APPROVED BY	KAZUYA OSAKO <i>Yosako</i>
VERIFIED BY	KHO CHZA MAIN <i>khochza</i>
DESIGNED BY	IRAWAN TANI NO.0043/PIK-A/DPPB/I-2012 <i>Irawan</i>
DESIGNED BY	PAULUS P. RAHARDJO NO.0123/PIG-A/DPPB/I-2012 <i>Paulus</i>

Engineers : **JMCMC**

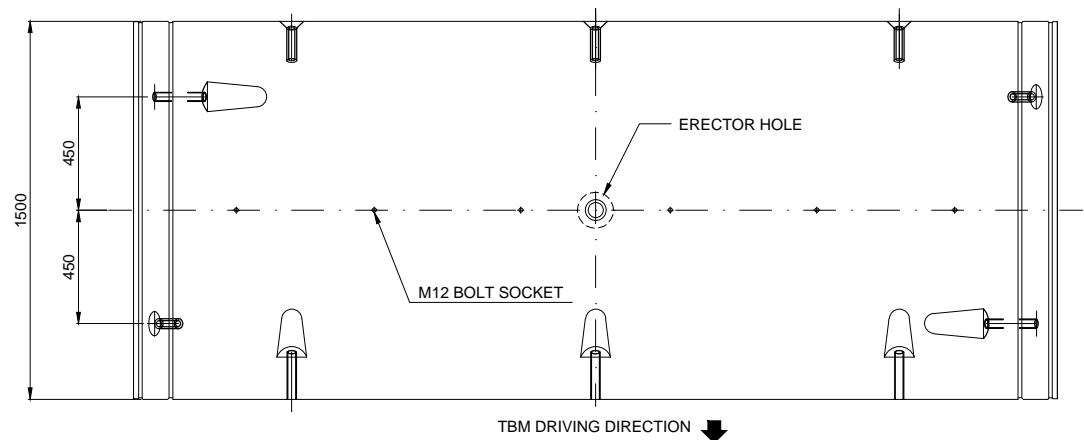
Contractors : **SOWJ**  
PT. SOWJ (INDONESIA) Tbk

Third Party Verifier : **CPG**  
CONSULTANTS

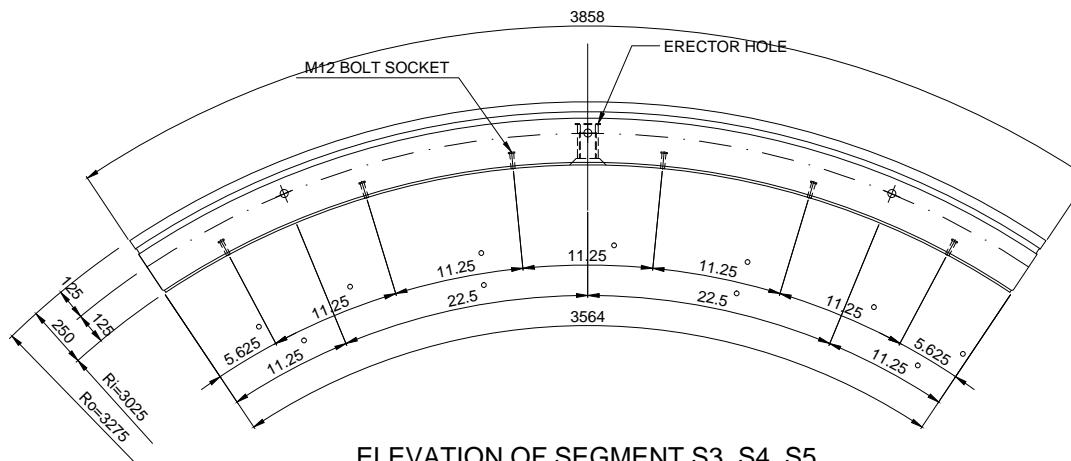
Designers : **Mott MacDonald** in association with **ONG&ONG**

Employer : <b>mrt jakarta</b> PT MRT Jakarta		
NOTICED BY	NAME	SIGNATURE
PRESIDENT DIRECTOR	DONO BOESTAMI	
DIRECTOR OF CONSTRUCTION	M. NASYIR	
PROJECT MANAGER	ALLAN TANDIONO	

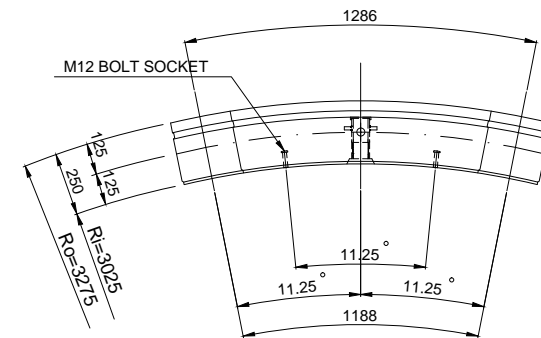
Project Title : CONSTRUCTION OF JAKARTA MASS RAPID TRANSIT PROJECT UNDERGROUND SECTION - CP 105 : 11K+043~13K+102			
Drawing Title : BORED TUNNEL SEGMENTAL LINING GENERAL ARRANGEMENT SHEET 1 OF 3			
Scale : AS SHOWN	Drawing No. : 5/BTN/SEG/0021	Rev. : -	Status : T
CAD File Name : 5BTNSEG0021-dwg			



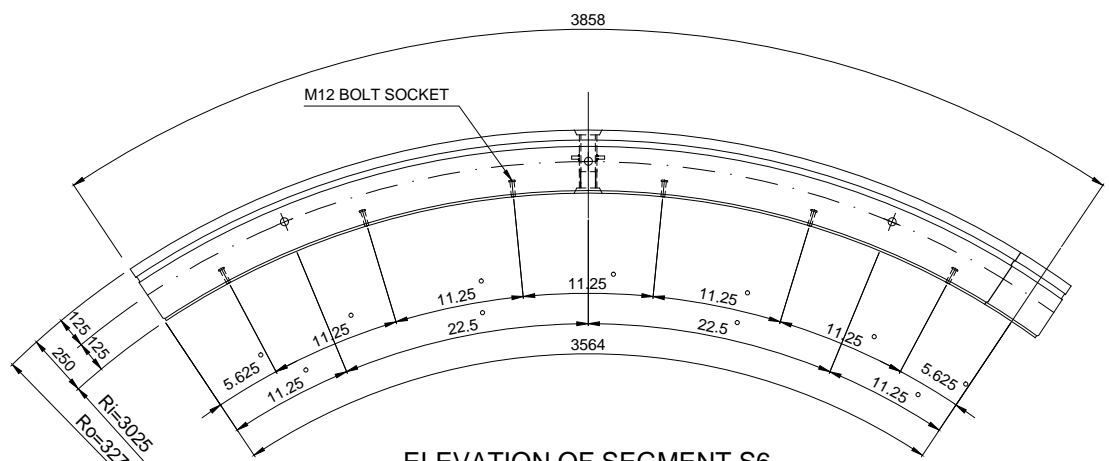
**PLAN OF TYPE SEGMENT S3, S4, S5**  
SCALE 1:15



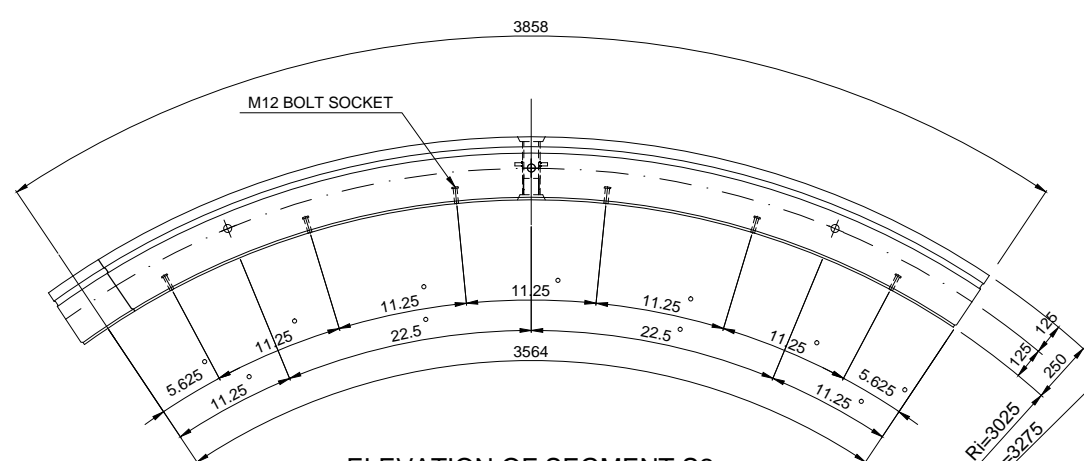
**ELEVATION OF SEGMENT S3, S4, S5**  
SCALE 1:15



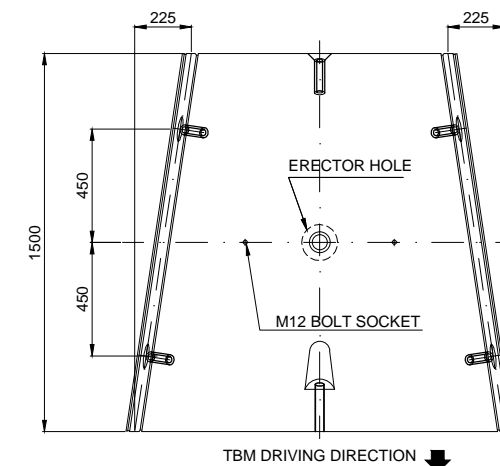
**ELEVATION OF KEY SEGMENT S1**  
SCALE 1:15



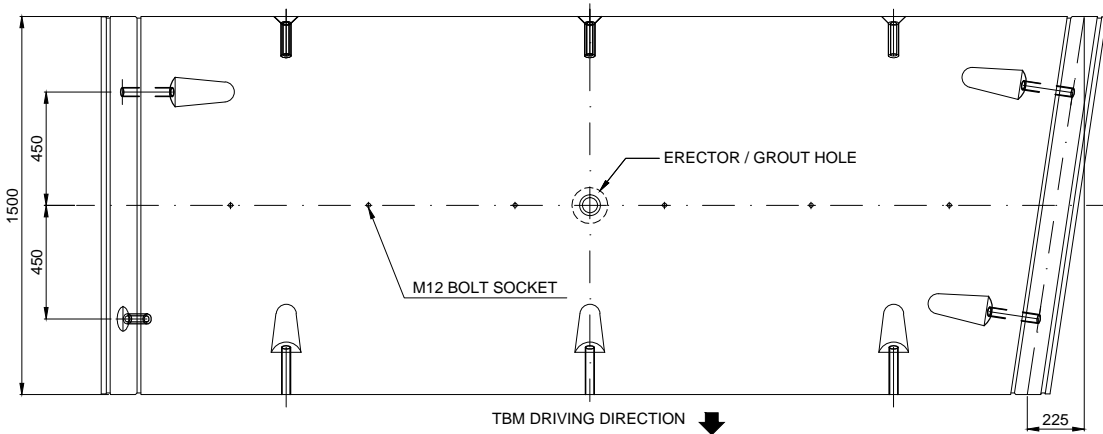
**ELEVATION OF SEGMENT S6**  
SCALE 1:15



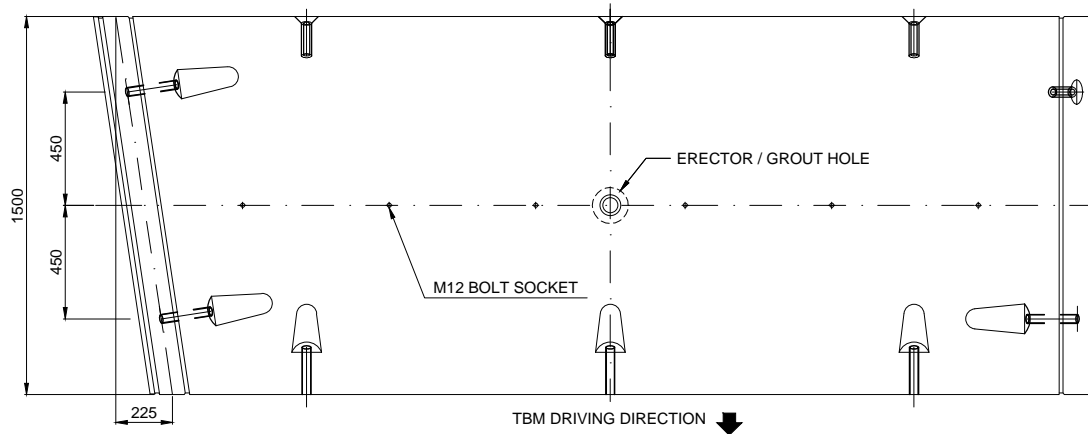
**ELEVATION OF SEGMENT S2**  
SCALE 1:15



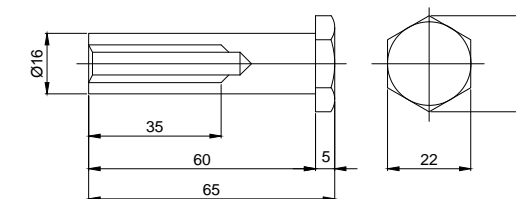
**PLAN OF KEY SEGMENT S1**  
SCALE 1:15



**PLAN OF SEGMENT S6**  
SCALE 1:15



**PLAN OF SEGMENT S2**  
SCALE 1:15



**M12 BOLT SOCKET**  
SCALE 1:1

- NOTES:**
- ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
  - PROPERTIES OF MATERIAL: CONCRETE(SEGMENTS): CHARACTERISTIC COMPRESSIVE CUBE STRENGTH OF CONCRETE AT 28 DAYS  $f_{cu}=60N/mm^2$  REINFORCEMENT: CHARACTERISTIC YIELD STRESS  $f_{yk}=390N/mm^2$
  - BOLTS, NUTS AND WASHERS SHALL BE GRADE 8.8 TO BS 5950-1:2000. 4. THE M12 BOLT SOCKET: SUS OR CERAMIC.

Rev.	Date	Drawn By	Description	Designed by	Chk'd	App'd
-	07.11.2014	JAC	ISSUED FOR APPROVAL	YCL	AV	AW

ENDORSED BY	KENJI KAJIKAWA
APPROVED BY	KAZUYA OSAKO
VERIFIED BY	KHO CHZA MAIN
DESIGNED BY	IRAWAN TANI NO.0043/PIK-A/DPPB/I-2012
DESIGNED BY	PAULUS P. RAHARDJO NO.0123/PIG-A/DPPB/I-2012

Engineers : **JCMC**

Contractors : **SOWJ**

Third Party Verifier : **CPG CONSULTANTS**

Designers : **Mott MacDonald** in association with **ONG&ONG**

Employer :	<b>mrt jakarta</b> PT MRT Jakarta		
NOTICED BY	NAME	SIGNATURE	
PRESIDENT DIRECTOR	DONO BOESTAMI		
DIRECTOR OF CONSTRUCTION	M. NASYIR		
PROJECT MANAGER	ALLAN TANDIONO		

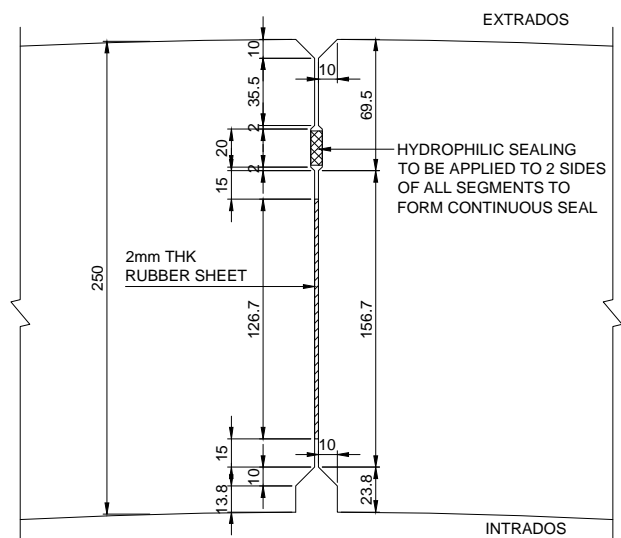
Project Title : CONSTRUCTION OF JAKARTA MASS RAPID TRANSIT PROJECT UNDERGROUND SECTION - CP 105 : 11K+043-13K+102

Drawing Title : **BORED TUNNEL SEGMENTAL LINING GENERAL ARRANGEMENT SHEET 2 OF 3**

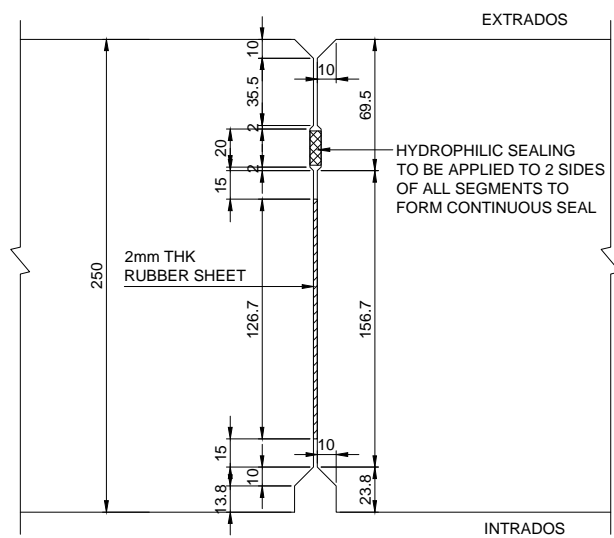
Scale :	Drawing No. :	Rev.	Status
AS SHOWN	5/BTN/SEG/0022	-	T

CAD File Name : 5BTNSEG0022.dwg

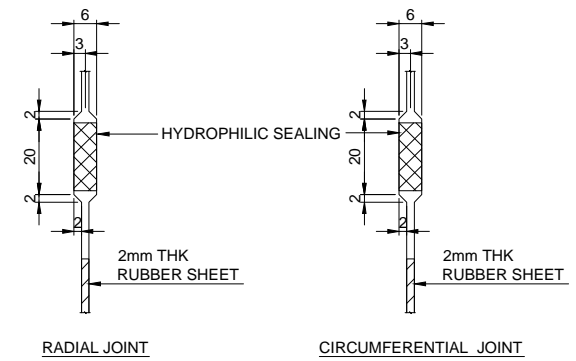
The Contractor is solely responsible for the contents of this drawing according to the Contract.



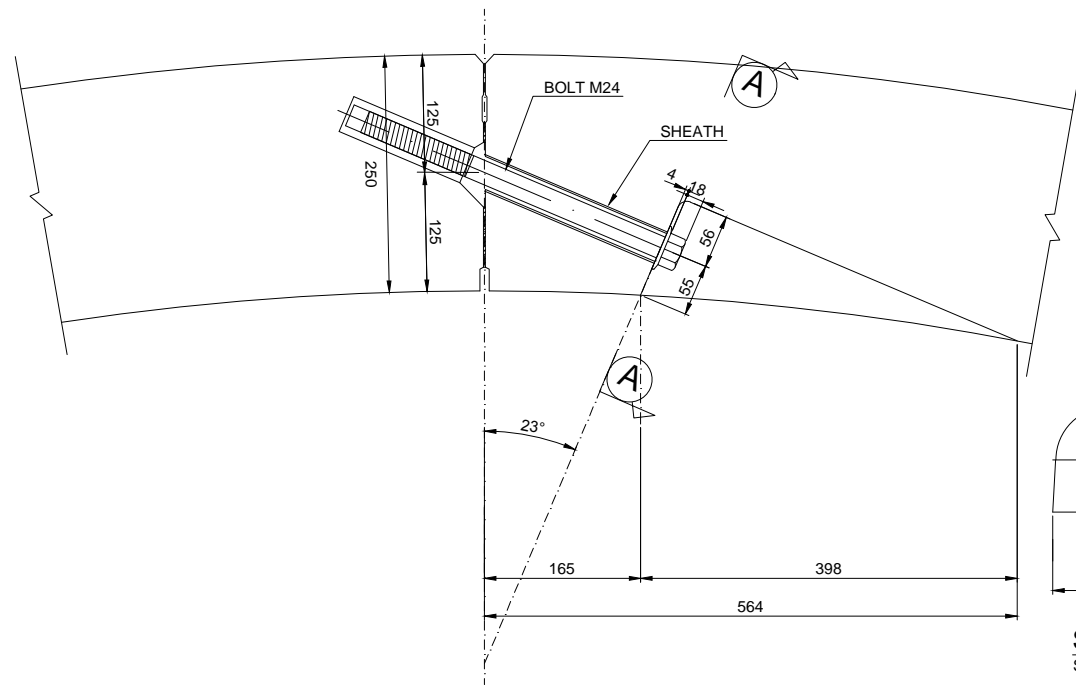
**GEMETRY OF RADIAL JOINT**  
SCALE 1:2



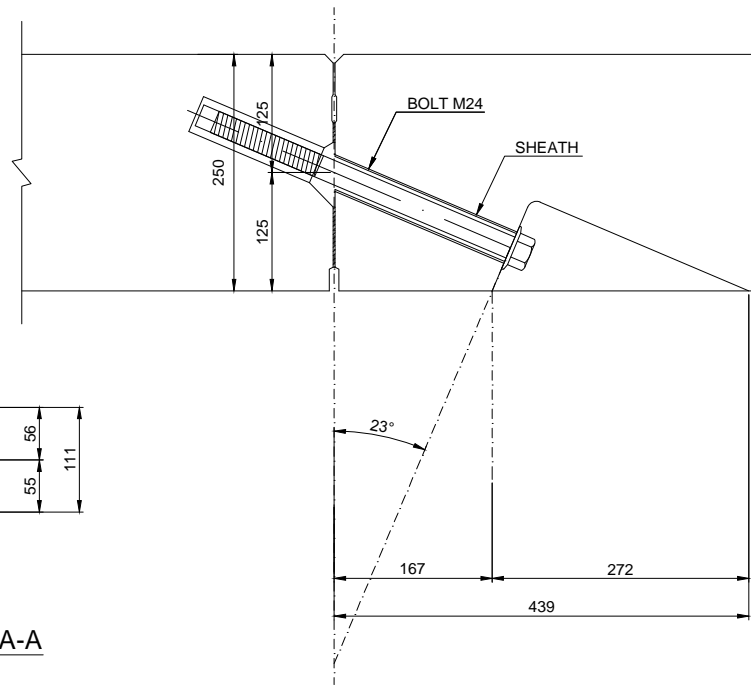
**GEOMETRY OF CIRCUMFERENTIAL JOINT**  
SCALE 1:2



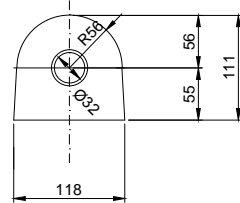
**SEALING GROOVE**  
SCALE 1:1



**BOLT CONNECTION DETAILS AT RADIAL JOINT**  
SCALE 1:4



**BOLT CONNECTION DETAILS AT CIRCUMFERENTIAL JOINT**  
SCALE 1:4



**SECTION A-A**  
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:**
- ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
  - PROPERTIES OF MATERIAL : CONCRETE(SEGMENTS): CHARACTERISTIC COMPRESSIVE CUBE STRENGTH OF CONCRETE AT 28 DAYS  $f_{cu}=60N/mm^2$  REINFORCEMENT: CHARACTERISTIC YIELD STRESS  $f_{yk}=390N/mm^2$
  - BOLTS, NUTS AND WASHERS SHALL BE GRADE 8.8 TO BS 5950-1:2000.
  - THE M12 BOLT SOCKET: SUS OR CERAMIC.

Rev.	Date	Drawn By	Description	Designed by	Chk'd	App'd
-	07.11.2014	JAC	ISSUED FOR APPROVAL	YCL	AV	AW

ENDORSED BY	KENJI KAJIKAWA
APPROVED BY	KAZUYA OSAKO
VERIFIED BY	KHO CHZA MAIN
DESIGNED BY	IRAWAN TANI NO.0043/PIK-A/DPPB/I-2012
DESIGNED BY	PAULUS P. RAHARDJO NO.0123/PIG-A/DPPB/I-2012

Engineers : **JMCMC**

Contractors : **SOWJ**

Third Party Verifier : **CPG CONSULTANTS**

Designers : **Mott MacDonald** in association with **ONG&ONG**

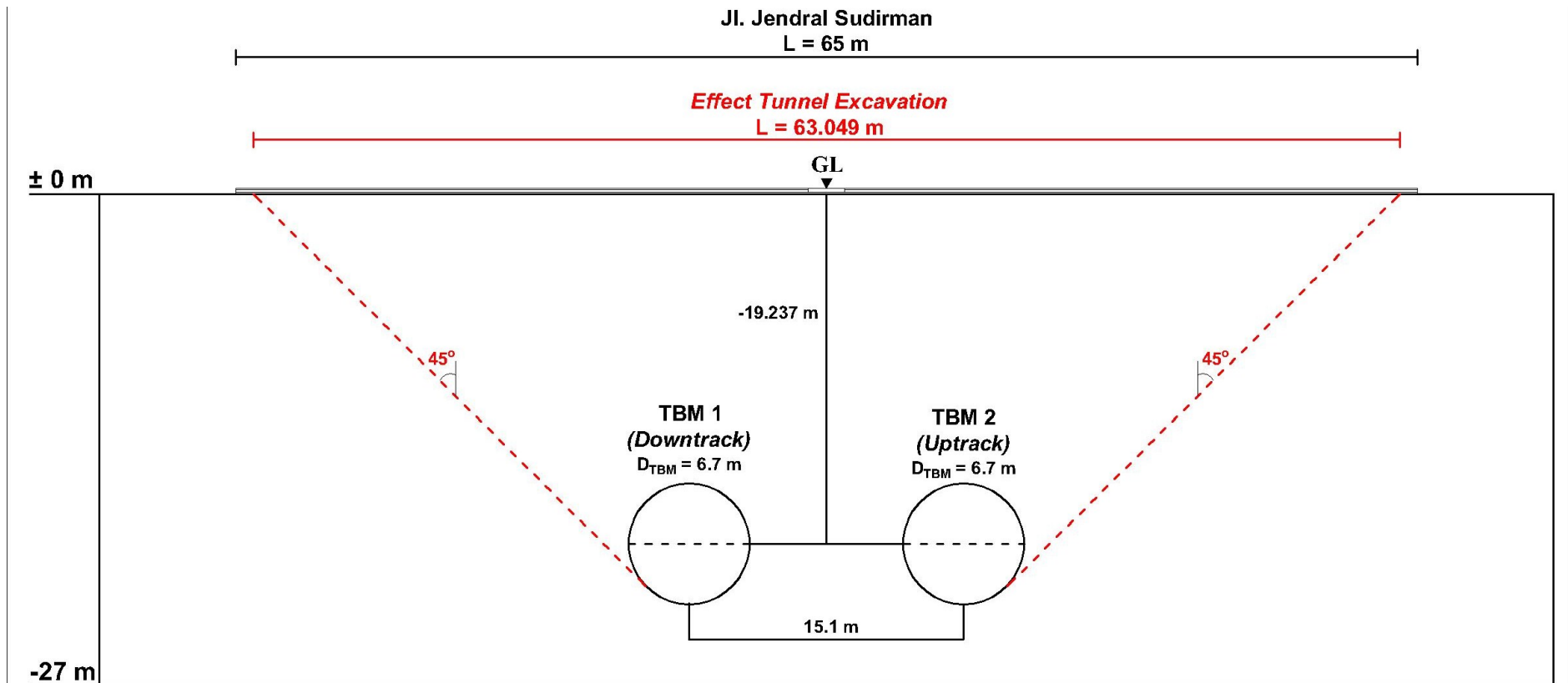
Employer :		NOTICED BY		NAME	SIGNATURE
PT MRT Jakarta		PRESIDENT DIRECTOR		DONO BOESTAMI	
		DIRECTOR OF CONSTRUCTION		M. NASYIR	
		PROJECT MANAGER		ALLAN TANDIONO	

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 :	Drawing No. :	Rev.	Status
AS SHOWN	5/BTN/SEG/0023	-	T

CAD File Name : 5BTNSEG0023-dwg



**Efek Penggalian Terowongan**

## KORELASI PARAMETER TANAH

### 1. Korelasi Kuat Geser *Undrained* ( $C_u$ ) untuk Tanah Kohesif

$$C_u = 6 N \text{ (kPa)}$$

dengan,

$$C_u = \text{Kuat Geser Tanah } \textit{Undrained}$$

$$N = \text{Nilai SPT}$$

#### Lapisan 1

$$\begin{aligned} \text{Jenis tanah} &= \text{AC1a } (\textit{Clay Soft}) \\ N &= 5 \\ C_u &= 6 \times N \\ &= 6 \times 5 \\ &= 30 \quad \text{kN/m}^2 \end{aligned}$$

#### Lapisan 4

$$\begin{aligned} \text{Jenis tanah} &= \text{AC1b } (\textit{Clay Stiff}) \\ N &= 15 \\ C_u &= 6 \times N \\ &= 6 \times 15 \\ &= 90 \quad \text{kN/m}^2 \end{aligned}$$

#### Lapisan 5

$$\begin{aligned} \text{Jenis tanah} &= \text{DC1 } (\textit{Clay Very Stiff}) \\ N &= 25 \\ C_u &= 6 \times N \\ &= 6 \times 25 \\ &= 150 \quad \text{kN/m}^2 \end{aligned}$$



## 2. Korelasi Modulus Tanah Undrained ( $E_u$ ) dengan Kuat Geser *Undrained* untuk Tanah Kohesif (Lempung)

### Lapisan 1

Jenis tanah = AC1a (*Clay Soft*)

$$C_u = 30 \quad \text{kN/m}^2$$

*Modulus Young Undrained ( $E_u$ ) :*

$$\begin{aligned} E_u &= 250 \times C_u \\ &= 250 \times 30 \\ &= 7500 \quad \text{kN/m}^2 \end{aligned}$$

*Modulus Young Drained ( $E'$ ) :*

$$\begin{aligned} E' &= \frac{E_u}{1.2} \\ &= \frac{7500}{1.2} \\ &= 6250 \quad \text{kN/m}^2 \end{aligned}$$

### Lapisan 4

Jenis tanah = AC1b (*Clay Stiff*)

$$C_u = 90 \quad \text{kN/m}^2$$

*Modulus Young Undrained ( $E_u$ ) :*

$$\begin{aligned} E_u &= 400 \times C_u \\ &= 400 \times 90 \\ &= 36000 \quad \text{kN/m}^2 \end{aligned}$$

*Modulus Young Drained ( $E'$ ) :*

$$\begin{aligned} E' &= \frac{E_u}{1.2} \\ &= \frac{36000}{1.2} \\ &= 30000 \quad \text{kN/m}^2 \end{aligned}$$

**Lapisan 5**

Jenis tanah = DC1 (*Clay Very Stiff*)

$$C_u = 150 \quad \text{kN/m}^2$$

*Modulus Young Undrained (Eu) :*

$$\begin{aligned} E_u &= 400 \times C_u \\ &= 400 \times 150 \\ &= 60000 \quad \text{kN/m}^2 \end{aligned}$$

*Modulus Young Drained (E') :*

$$\begin{aligned} E' &= \frac{E_u}{1.2} \\ &= \frac{60000}{1.2} \\ &= 50000 \quad \text{kN/m}^2 \end{aligned}$$

### 3. Korelasi Modulus Tanah (E') dengan N-SPT untuk Tanah Non-Kohesif (Pasir)

**Lapisan 2**

Jenis tanah = AS1a (*Loose Sand*)

$$N = 5$$

*Modulus Young Drained (E') :*

$$\begin{aligned} E' &= 2 \times N \\ &= 2 \times 5 \\ &= 10 \quad \text{Mpa} \\ &= 10000 \quad \text{kN/m}^2 \end{aligned}$$

**Lapisan 3**

Jenis tanah = AS1b (*Medium Dense Sand*)

$$N = 13$$

*Modulus Young Drained (E') :*

$$\begin{aligned}
 E' &= 2 \quad \times \quad \text{N} \\
 &= 2 \quad \times \quad 13 \\
 &= 26 \quad \text{Mpa} \\
 &= 26000 \quad \text{kN/m}^2
 \end{aligned}$$

#### 4. Koefisien Tekanan Tanah *At-rest* ( $K_0$ )

##### Lapisan 1

$$\begin{aligned}
 \text{Jenis tanah} &= \text{AC1a} \quad (\text{Clay Soft}) \\
 \phi' &= 28 \quad ^\circ \\
 K_0 &= 1 - \sin(\phi') \\
 &= 1 - 0.4695 \\
 &= 0.531
 \end{aligned}$$

##### Lapisan 2

$$\begin{aligned}
 \text{Jenis tanah} &= \text{AS1a} \quad (\text{Loose Sand}) \\
 \phi' &= 30 \quad ^\circ \\
 K_0 &= 1 - \sin(\phi') \\
 &= 1 - 0.5 \\
 &= 0.5
 \end{aligned}$$

##### Lapisan 3

$$\begin{aligned}
 \text{Jenis tanah} &= \text{AS1b} \quad (\text{Medium Dense Sand}) \\
 \phi' &= 32 \quad ^\circ \\
 K_0 &= 1 - \sin(\phi') \\
 &= 1 - 0.5299 \\
 &= 0.470
 \end{aligned}$$

**Lapisan 4**

$$\begin{aligned}\text{Jenis tanah} &= \text{AC1b} \quad (\text{Clay Stiff}) \\ \phi' &= 28^\circ \\ K_0 &= 1 - \sin(\phi') \\ &= 1 - 0.4695 \\ &= 0.531\end{aligned}$$

**Lapisan 5**

$$\begin{aligned}\text{Jenis tanah} &= \text{DC1} \quad (\text{Clay Very Stiff}) \\ \phi' &= 32^\circ \\ K_0 &= 1 - \sin(\phi') \\ &= 1 - 0.5299 \\ &= 0.470\end{aligned}$$

### PERHITUNGAN PARAMETER LINING (PLAXIS)

- Mutu Beton  $(f_{cu}) = 60 \text{ Mpa}$   
 $(f_c') = 0.83 \times K$   
 $= 0.83 \times 60$   
 $= 49.8 \text{ Mpa}$
- Luas Lining Tunnel  $(A) = b \times t_s \quad ; b = 1 \text{ m}$   
 $= 1 \times 0.25$   
 $= 0.25 \text{ m}^2$
- Modulus Young  $(E_c) = 4700 \times \sqrt{f_c'}$   
 $= 4700 \times 7.1$   
 $= 33167.484 \text{ Mpa}$   
 $= 33167484 \text{ kN/m}^2$
- Momen Inersia Efektif,  $(I_e) = I_j + \left(\frac{4}{n}\right)^2 \times I_s$

Momen Inersia Awal  $(I_s) = \frac{1}{12} \times b \times t_s^3$   
 $= \frac{1}{12} \times 1 \times 0.25^3$   
 $= 0.001302083 \text{ m}^4$

Momen Inersia *Lining Joint*  $(I_j) = 0.000382 \text{ m}^4$

Jumlah Segmen  $(n) = 5 \text{ (exclude key)}$

$$\begin{aligned}
 \text{Momen Inersia Efektif, (I_e)} &= I_j \times \left(\frac{4}{n}\right)^2 I \\
 &= 0.0003816 \times \frac{4}{5}^2 \times 0.0013 \\
 &= 0.0012149 \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

- Modulus Kekauan Aksial (EA) =  $E_c \times A$   
 =  $33167484 \times 0.25$   
 = **8291871 kN/m**
- Modulus Kekauan Flexural (EI) =  $E_c \times I_e$   
 =  $33167484 \times 0.00121$   
 = **40295.287 kNm<sup>2</sup>/m**
- Angka Poisson's Beton ( $\nu$ ) = 0.2

- Berat Lining Terowongan (w) =  $\frac{W_{total}}{\pi D}$   
 Volume Total Lining (V) =  $(A_0 - A_1) \times b$   
 Diameter Luar (Do) = 6.55 m  
 Diameter Dalam (Di) = 6.05 m  
 Lebar (b) = 1 m

$$\begin{aligned}
 A_0 &= 0.25 \pi D_0^2 \\
 &= 33.695545 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

$$A_i = 0.25 \pi D_i^2$$

$$= 28.747536 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} V &= 33.695545 - 28.7475 \times 1 \\ &= 4.9480084 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat Total Lining, } (w_{\text{tot}}) &= BJ_{\text{beton}} \times V \\ &= 24 \times 4.94801 \\ &= 118.7522 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w &= \frac{118.75}{20.577} \\ &= \mathbf{5.771 \text{ kN/m}} \\ &\quad (\text{Berat Lining per } 1 \text{ m}) \end{aligned}$$

### PERHITUNGAN PARAMETER LINING (GEO)

- Mutu Beton  $(f_{cu}) = 60 \text{ Mpa}$   
 $(f_c') = 0.83 \times K$   
 $= 0.83 \times 60$   
 $= 49.8 \text{ Mpa}$
- BJ Beton Bertulang  $(\gamma_c) = 24 \text{ kN/m}^3$
- Luas Lining Tunnel  $(A_T) = A_0 - A_1$

$$A_0 = 0.25 \pi D_0^2$$

$$= 33.7 \text{ m}^2$$

$$A_1 = 0.25 \pi D_1^2$$

$$= 28.7 \text{ m}^2$$

$$(A_T) = A_0 - A_1$$

$$= 33.7 - 28.7$$

$$= \mathbf{4.95 \text{ m}^2}$$
- Modulus Young  $(E_c) = 4700 \times \sqrt{f_c'}$   
 $= 4700 \times 7.06$   
 $= \mathbf{33167.5 \text{ Mpa}}$
- Angka Poisson Rasio  $(\nu) = 0.2$



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

$$= \frac{33167}{2(1 + 0.2)}$$

$$= \mathbf{13819.8 \text{ Mpa}}$$
  
- Momen Inersia Lining (I) =  $\frac{1}{4} \times \pi \times (r_o^4 - r_i^4)$   
 Jari-jari luar (r<sub>o</sub>) = 3.275 m  
 Jari-jari dalam (r<sub>i</sub>) = 3.025 m  

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

$$I = \mathbf{24.587 \text{ m}^4}$$
  
- Panjang *Section* (L) = **296 m**
- Luas Lining Tunnel (A<sub>T</sub>) = 4.94801 m<sup>2</sup>
- Tinggi Balok (H) = 6.55 m  
(H = D<sub>i</sub> = Diameter Luar Tunnel)
- Lebar Balok (B) =  $\frac{A_T}{H}$   

$$= \frac{4.94801}{6.55}$$

$$= \mathbf{0.75542 \text{ m}}$$

## PERHITUNGAN BEBAN PERMUKAAN

### Data Geometri Jalan :

- Nama Bangunan = Bangunan Jalan Raya
- Jenis Lapisan Jalan = Perkerasan Kaku
- Lebar Jalan (B) = 65 m
- Lebar Jalan per 1 m (b) = 1 m
- Tebal Lapisan Jalan :
  - Tebal Lapis Aspal ( $t_a$ ) = 7 cm = 0.07 m
  - Tebal Lapis Beton ( $t_b$ ) = 15 cm = 0.15 m
  - Tebal Lapis Pondasi ( $t_p$ ) = 10 cm = 0.1 m

### Data Material 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 ( $\gamma_{\text{beton}}$ ) = 24 kN/m<sup>3</sup>
- Berat Jenis Aspal ( $\gamma_{\text{aspal}}$ ) = 22 kN/m<sup>3</sup>

### Perhitungan Beban :

*(Mengacu pada SNI 1725:2016)*

#### ● Faktor Pembebanan :

- Beton Cor di Tempat  $\gamma_{uMS} = 1.3$   
 $\gamma_{SMS} = 1.0$
- Beban Mati tambahan  $\gamma_{uMA} = 1.4$   
 $\gamma_{SMA} = 1.0$
- Beban Lalu Lintas "D"  $\gamma_{uTD} = 1.8$   
 $\gamma_{STD} = 1.0$

- **Beban Sendiri Pekerasan Kaku :**

$$\begin{aligned}
 \text{- Berat Lapisan Kaku} \quad q_D &= \gamma_{\text{beton}} \times \text{tebal} \\
 &= 24 \times 0.15 \\
 &= 3.6 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Beban Mati Ultimit} &= \gamma_{uMS} \times q_D \\
 &= 1.3 \times 3.6 \\
 &= 4.68 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Beban Mati Layan} &= \gamma_{SMS} \times q_D \\
 &= 1.0 \times 3.6 \\
 &= 3.6 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

- **Beban Mati Tambahan :**

$$\begin{aligned}
 \text{- Berat Aspal} \quad q_{SD} &= \gamma_{\text{aspal}} \times \text{tebal} \\
 &= 22 \times 0.07 \\
 &= 1.54 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Beban Mati Ultimit} &= \gamma_{uMA} \times q_{SD} \\
 &= 1.4 \times 1.54 \\
 &= 2.16 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Beban Mati Layan} &= \gamma_{SMA} \times q_{SD} \\
 &= 1.0 \times 1.54 \\
 &= 1.54 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

- **Beban Lalu Lintas "D" :**

$$\begin{aligned}
 \text{Bentang Jalan} \quad L &= 296 \text{ m} \\
 \text{- Beban Terbagi Rata} \quad q_{BTR} &= 9 \times [0.5 + (15/L)] \\
 &= 4.956 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Beban Ultimit BTR} &= q_{BTR} \times \gamma_{uTD} \\
 &= 4.956 \times 1.8
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 8.921 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Beban Layan BTR} &= q_{\text{BTR}} \times \gamma_{\text{STD}} \\
 &= 4.956 \times 1.0 \\
 &= 4.956 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{- Beban Garis Terpusat,} & q_{\text{BGT}} = \text{FBD} \times p_{\text{BGT}} \\
 \text{Faktor Beban Dinamis,} & \text{FBD} = 1.4 \\
 \text{Intensitas } p_{\text{BGT}} & p_{\text{BGT}} = 49 \text{ kN/m} \\
 & q_{\text{BGT}} = \text{FBD} \times p_{\text{BGT}} \\
 & = 1.4 \times 49 \\
 & = 68.6 \text{ kN/m} \\
 & = 24.95 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Beban Ultimit BGT} &= q_{\text{BGT}} \times \gamma_{\text{UTD}} \\
 &= 24.9 \times 1.8 \\
 &= 44.90 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Beban Layan BGT} &= q_{\text{BGT}} \times \gamma_{\text{STD}} \\
 &= 24.95 \times 1.0 \\
 &= 24.9 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

- **Beban Bus :**

$$\text{- Beban Bus Bermuatan} \quad q_{\text{bus}} = 15 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Total Beban Lalu Lintas Ultimit} = 68.8 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Total Beban Lalu Lintas Layan} = 44.9 \text{ kN/m}^2$$

- **Total Beban Jalan (Ultimit) :**

- Total Beban Mati	=	4.680	kN/m <sup>2</sup>
- Total Beban Mati Tambahan	=	2.156	kN/m <sup>2</sup>
- Total Beban Lalu Lintas	=	68.823	kN/m <sup>2</sup> +
<b>Total Beban Ultimit</b>	<b>=</b>	<b>75.659</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>

- **Total Beban Jalan (Layan) :**

- Total Beban Mati	=	3.600	kN/m <sup>2</sup>
- Total Beban Mati Tambahan	=	1.540	kN/m <sup>2</sup>
- Total Beban Lalu Lintas	=	44.902	kN/m <sup>2</sup> +
<b>Total Beban Layan</b>	<b>=</b>	<b>50.042</b>	<b>kN/m<sup>2</sup></b>

- **Beban Sendiri Lapis Pondasi:**

$$\begin{aligned}
 \text{- Berat Lapisan Kaku} &= \gamma_{\text{beton}} \times \text{tebal} \\
 &= 24 \times 0 \\
 &= 2.4 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Beban Mati Ultimit} &= \gamma_{\text{uMS}} \times q_p \\
 &= 1.3 \times 2 \\
 &= 3.12 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Beban Mati Layan} &= \gamma_{\text{sMS}} \times q_p \\
 &= 1.0 \times 2 \\
 &= 2.4 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

- **Beban Sendiri Lapis Pondasi:**

$$\begin{aligned}
 \text{- Berat Lapisan Kaku} &= \gamma_{\text{beton}} \times \text{tebal} \\
 &= 24 \times 0 \\
 &= 2.4 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Beban Mati Ultimit} &= \gamma_{uMS} \times q_p \\
 &= 1.3 \times 2 \\
 &= 3.12 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{Beban Mati Layan} &= \gamma_{sMS} \times q_p \\
 &= 1.0 \times 2 \\
 &= 2.4 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

- **Total Pembebanan (Ultimit) :**

$$\begin{aligned}
 \text{- Total Beban Jalan} &= 75.659 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{- Beban Pondasi Jalan} &= 3.120 \text{ kN/m}^2 \quad + \\
 \hline
 \text{Total Pembebanan Ultimit} &= \mathbf{78.779 \text{ kN/m}^2}
 \end{aligned}$$

- **Total Pembebanan (Layan) :**

$$\begin{aligned}
 \text{- Total Beban Jalan} &= 50.042 \text{ kN/m}^2 \\
 \text{- Beban Pondasi Jalan} &= 2.400 \text{ kN/m}^2 \quad + \\
 \hline
 \text{Total Pembebanan Layan} &= \mathbf{52.442 \text{ kN/m}^2}
 \end{aligned}$$

## PERHITUNGAN BEBAN GEMPA

### Data Percepatan Puncak Gempa (PGA) :

- a) ODE :
- $$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$
- $$\text{PGA} = 0.107 \text{ g}$$
- $$= 1.0497 \text{ m/s}^2$$
- $$= 104.97 \text{ cm/s}^2$$
- b) MDE :
- $$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$
- $$\text{PGA} = 0.264 \text{ g}$$
- $$= 2.5898 \text{ m/s}^2$$
- $$= 258.98 \text{ cm/s}^2$$

### Beban Luar (Non-Seismic, Q) :

- Beban Permukaan :
  - Beban Jalan Raya = 78.779 kN/m<sup>2</sup>

### Perhitungan Beban Gempa (Beban Seismic) :

- a) Gempa ODE :
- **Beban Gempa** = **K** x **Beban**
  - Koef. Gempa (K) = 0.107
  - Beban Gempa :
  - Beban Permukaan = K x Beban
  - = 0.107 x 78.779
  - = 8.429 kN/m<sup>2</sup>

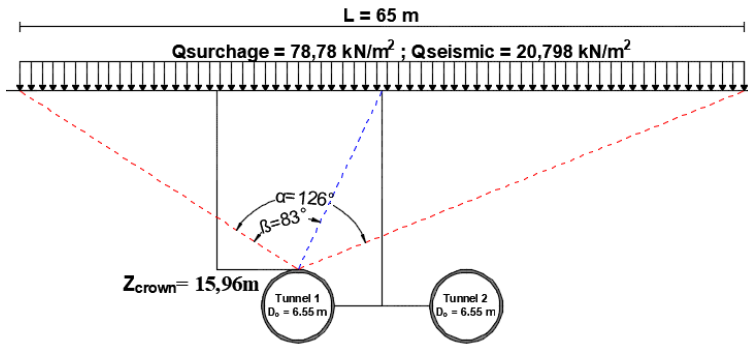
- **Beban Total** = **Q** + **Q<sub>Seismic</sub>**
- **Beban Permukaan** = **Q** + **Q<sub>Seismic</sub>**
- = 78.78 + 8.429
- = 87.21 kN/m<sup>2</sup>

b) Gempa MDE :

- **Beban Gempa** = **K** x **Beban**
- Koef. Gempa (K) = 0.264
- Beban Gempa :
- **Beban Permukaan** = **K** x **Beban**
- = 0.264 x 78.779
- = **20.80 kN/m<sup>2</sup>**
- **Beban Total** = **Q** + **Q<sub>Seismic</sub>**
- **Beban Permukaan** = **Q** + **Q<sub>Seismic</sub>**
- = 78.78 + 20.798
- = **99.58 kN/m<sup>2</sup>**



## PERHITUNGAN DISTRIBUSI BEBAN (GEO5)



### A. Distribusi Beban Permukaan (*Surcharge Load*)

Kedalaman Tunnel <i>Crown</i>	(Z)	=	15.96	mbgl
Beban Permukaan	(q)	=	78.779	kN/m <sup>2</sup>
	(α)	=	126	deg
		=	2.199	rad
	(β)	=	83	deg
		=	1.449	rad

$$\begin{aligned}
 \Delta\sigma_z &= \frac{q}{\pi} (\alpha + \sin \alpha \cos 2\beta) \\
 &= \frac{78.78}{\pi} (2.199 + \sin(2.199) \cos(2 \times 1.449)) \\
 \Delta\sigma_z &= 35.46 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Distribusi Beban Permukaan } (\Delta P_1) &= 35.46 \text{ kN/m}^2 \\
 Q_1 &= \Delta \sigma_z \quad x \quad b \\
 &= 35.46 \quad x \quad 1 \\
 &= \mathbf{35.461 \text{ kN/m}}
 \end{aligned}$$

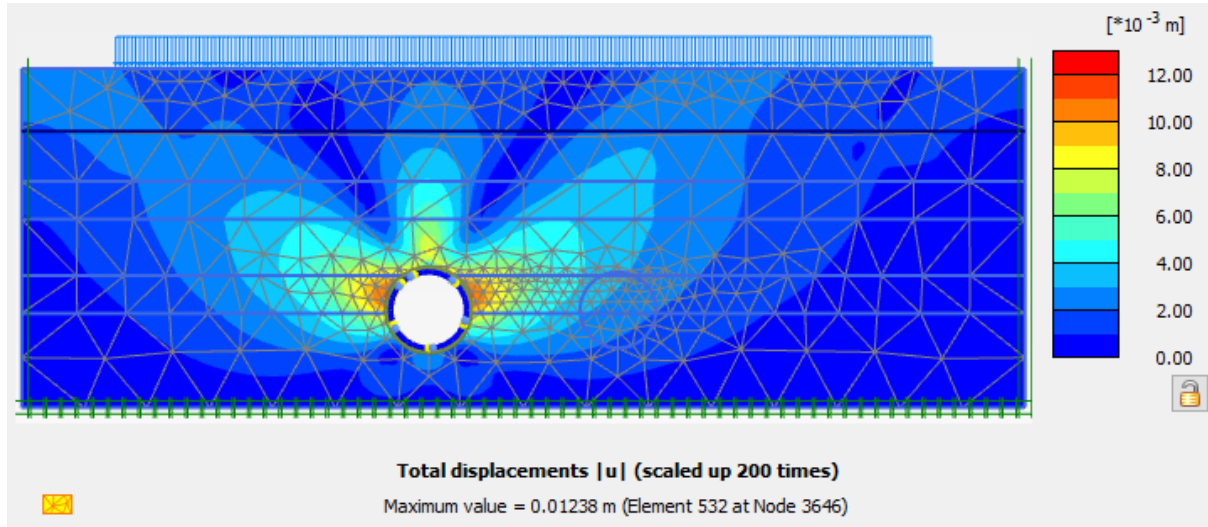
## B. Distribusi Beban Gempa

$$\begin{aligned}
 \text{Kedalaman Tunnel } \textit{Crown} \text{ (Z)} &= 15.96 \text{ mbgl} \\
 \text{Beban Gempa (q)} &= 20.798 \text{ kN/m}^2 \\
 (\alpha) &= 126 \text{ deg} \\
 &= 2.199 \text{ rad} \\
 (\beta) &= 83 \text{ deg} \\
 &= 1.449 \text{ rad}
 \end{aligned}$$

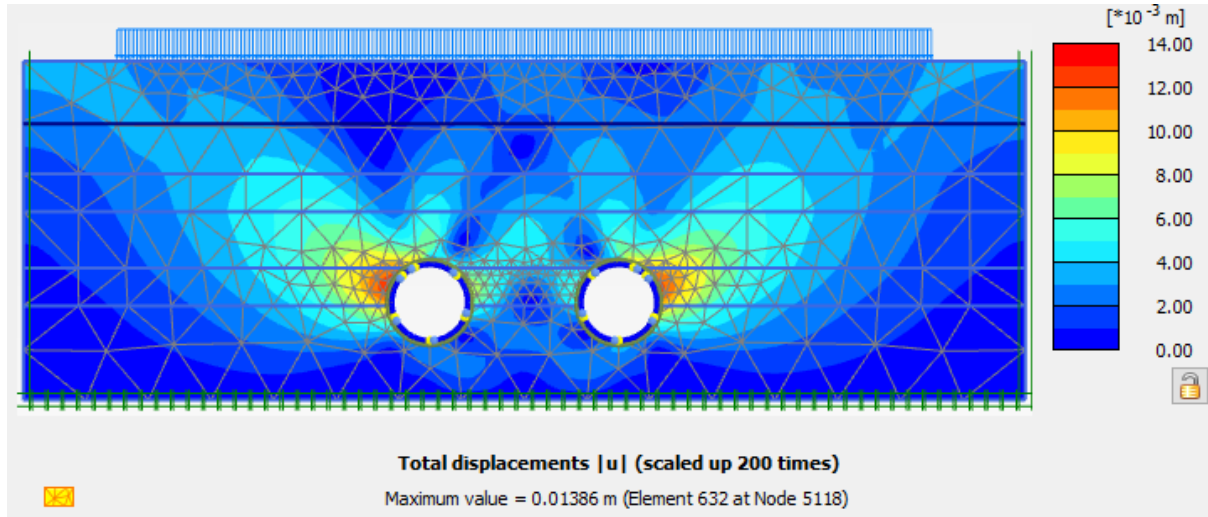
$$\begin{aligned}
 \Delta \sigma_z &= \frac{q}{\pi} (\alpha + \sin \alpha \cos 2 \beta) \\
 &= \frac{20.798}{\pi} (2.199 + \sin(2.199) \cos(2 \times 1.449)) \\
 \Delta \sigma_z &= 9.36 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Distribusi Beban Gempa } (\Delta P_2) &= 9.36 \text{ kN/m}^2 \\
 Q_2 &= \Delta \sigma_z \quad x \quad b \\
 &= 9.36 \quad x \quad 1 \\
 &= \mathbf{9.36 \text{ kN/m}}
 \end{aligned}$$

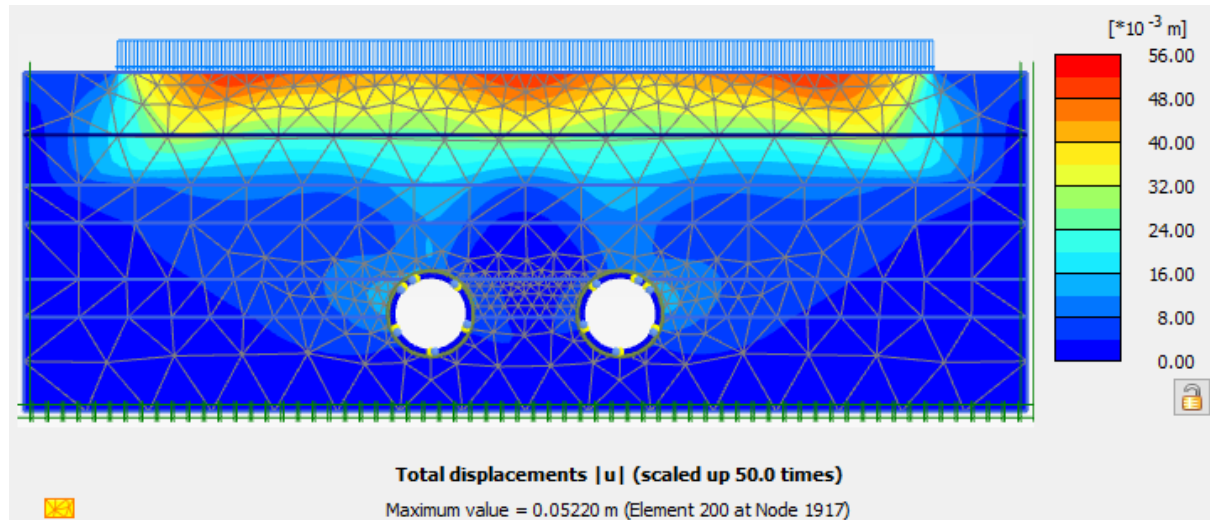
### HASIL PEMODELAN PLAXIS (MAT 5 MBGL)



Final Terowongan *Downtrack* (5 mbgl)

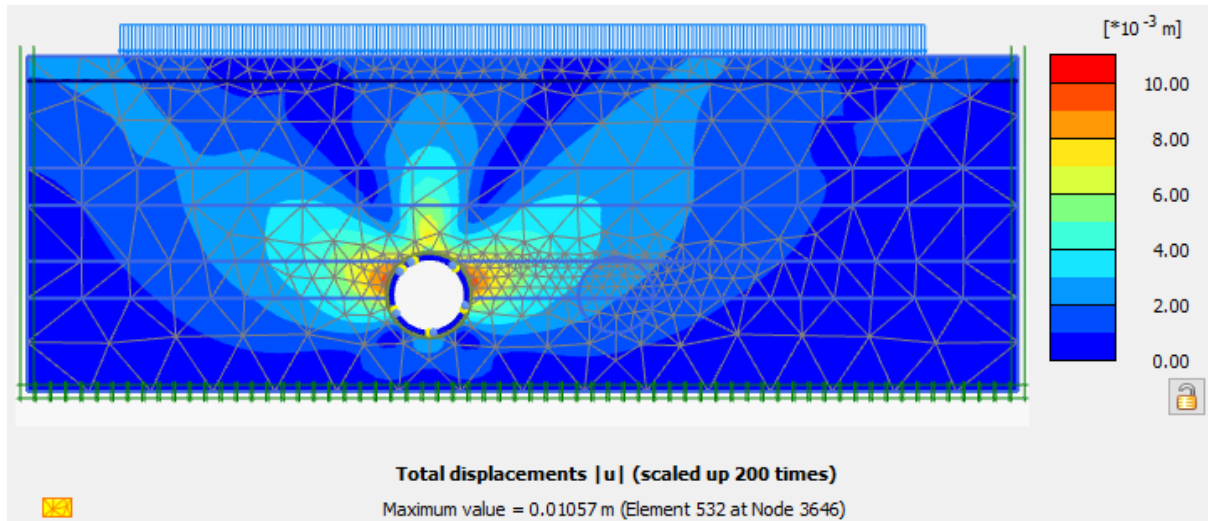


Final Terowongan *Uptrack* (5 mbgl)

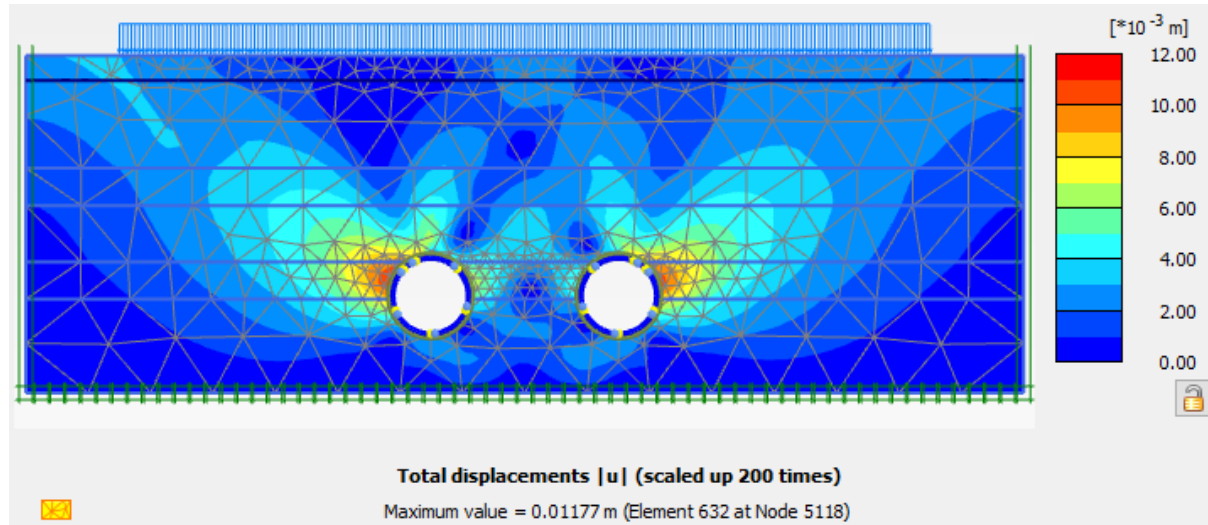


Tahap Gempa (5 mbgl)

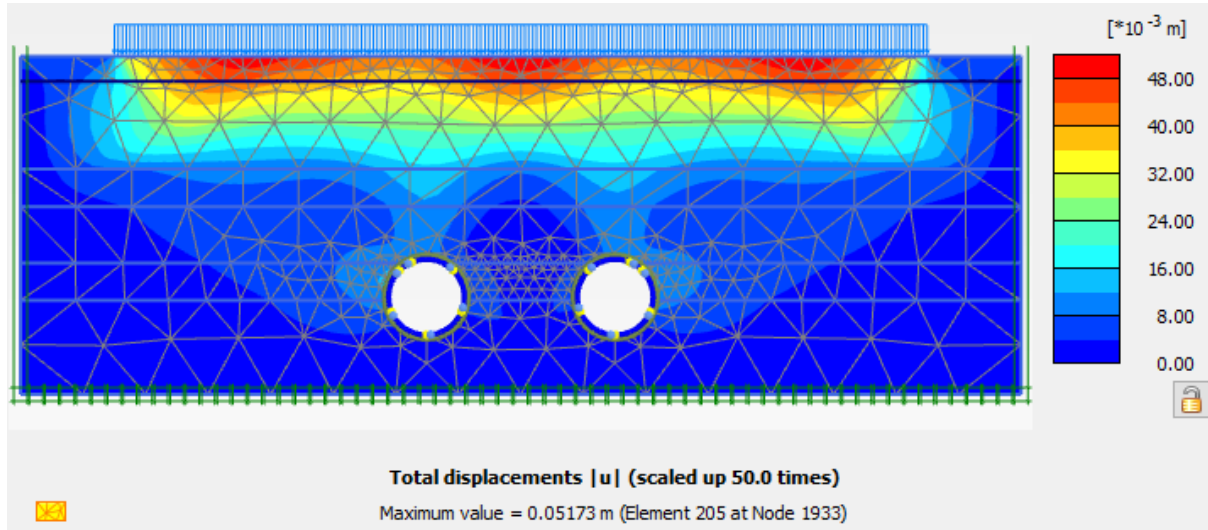
## HASIL PEMODELAN PLAXIS (MAT 2 MBGL)



Final Terowongan *Downtrack* (2 mbgl)



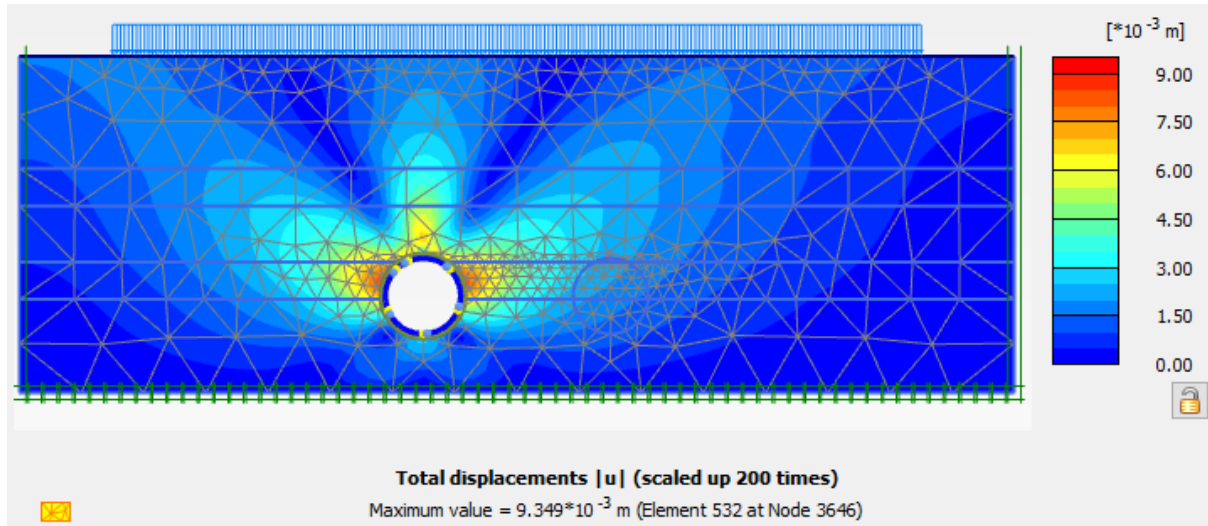
Final Terowongan *Uptrack* (2 mbgl)



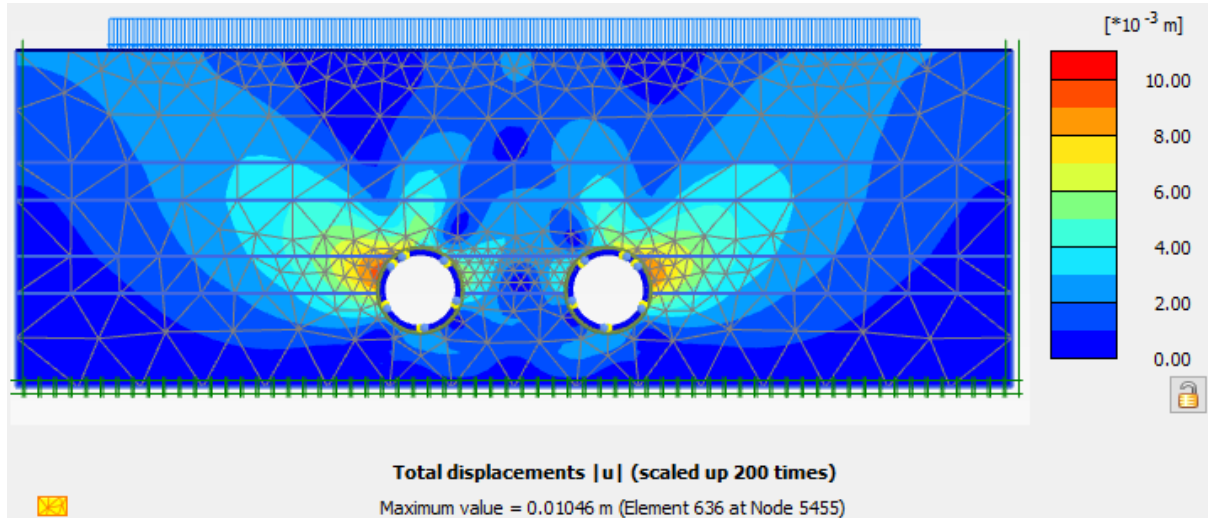
Tahap Gempa (2 mbgl)



### HASIL PEMODELAN PLAXIS (MAT 0 MBGL)



Final Terowongan *Downtrack* (0 mbgl)



Final Terowongan *Uptrack* (0 mbgl)

## HASIL PEMODELAN PLAXIS

### 1. Deformasi Terowongan

<b>MAT 5 mbgl (LWL)</b>				
Tahap	Deformasi Terowongan (mm)			
	<i>Tunnel 1 (Downtrack)</i>		<i>Tunnel 2 (Uptrack)</i>	
	Titik/Lokasi	Deformasi	Titik/Lokasi	Deformasi
Konstruksi <i>Tunnel 1</i> <i>(Downtrack)</i>	<i>Crown</i>	0.381	-	-
	<i>Spring Line 1</i>	9.296		
	<i>Invert</i>	2.549		
	<i>Spring Line 2</i>	9.177		
<b>Maks</b>	<b>Segmen 2</b>	12.876		
Konstruksi <i>Tunnel 2</i> <i>(Uptrack)</i>	<i>Crown</i>	3.298	<i>Crown</i>	3.442
	<i>Spring Line 1</i>	6.254	<i>Spring Line 1</i>	10.141
	<i>Invert</i>	2.921	<i>Invert</i>	3.248
	<i>Spring Line 2</i>	10.513	<i>Spring Line 2</i>	4.766
<b>Maks</b>	<b>Segmen 5</b>	14.770	<b>Segmen 5</b>	13.863
Gempa	<i>Crown</i>	4.224	<i>Crown</i>	11.577
	<i>Spring Line 1</i>	7.510	<i>Spring Line 1</i>	15.704
	<i>Invert</i>	2.431	<i>Invert</i>	2.614
	<i>Spring Line 2</i>	12.453	<i>Spring Line 2</i>	8.137
<b>Maks</b>	<b>Segmen 1</b>	16.660	<b>Segmen 1</b>	15.756
<b>Deformasi Terbesar</b>		<b>16.660</b>		<b>15.756</b>

<b>MAT 2 mbgl (HWL)</b>				
Tahap	Deformasi Terowongan (mm)			
	<i>Tunnel 1 (Downtrack)</i>		<i>Tunnel 2 (Uptrack)</i>	
	Titik/Lokasi	Deformasi	Titik/Lokasi	Deformasi
Konstruksi <i>Tunnel 1</i> <i>(Downtrack)</i>	<i>Crown</i>	0.654	-	-
	<i>Spring Line 1</i>	7.779		
	<i>Invert</i>	2.667		
	<i>Spring Line 2</i>	7.718		
<b>Maks</b>	<b>Segmen 2</b>	11.144		
Konstruksi <i>Tunnel 2</i> <i>(Uptrack)</i>	<i>Crown</i>	2.619	<i>Crown</i>	2.995
	<i>Spring Line 1</i>	5.276	<i>Spring Line 1</i>	8.476
	<i>Invert</i>	2.891	<i>Invert</i>	3.189
	<i>Spring Line 2</i>	8.807	<i>Spring Line 2</i>	4.055
<b>Maks</b>	<b>Segmen 5</b>	12.732	<b>Segmen 5</b>	11.929
Gempa	<i>Crown</i>	4.313	<i>Crown</i>	5.681
	<i>Spring Line 1</i>	6.687	<i>Spring Line 1</i>	10.494
	<i>Invert</i>	2.308	<i>Invert</i>	2.499
	<i>Spring Line 2</i>	10.837	<i>Spring Line 2</i>	5.883
<b>Maks</b>	<b>Segmen 1</b>	14.718	<b>Segmen 1</b>	13.922
<b>Deformasi Terbesar</b>		<b>14.718</b>		<b>13.922</b>

MAT 0 mbgl (FWL)				
Tahap	Deformasi Terowongan (mm)			
	Tunnel 1 (Downtrack)		Tunnel 2 (Uptrack)	
	Titik/Lokasi	Deformasi	Titik/Lokasi	Deformasi
Konstruksi Tunnel 1 (Downtrack)	<i>Crown</i>	1.030	-	-
	<i>Spring Line 1</i>	6.759		
	<i>Invert</i>	2.740		
	<i>Spring Line 2</i>	6.740		
<b>Maks</b>	<b>Segmen 5</b>	10.027		
Konstruksi Tunnel 2 (Uptrack)	<i>Crown</i>	2.195	<i>Crown</i>	2.834
	<i>Spring Line 1</i>	4.610	<i>Spring Line 1</i>	7.367
	<i>Invert</i>	2.891	<i>Invert</i>	3.158
	<i>Spring Line 2</i>	7.672	<i>Spring Line 2</i>	3.591
<b>Maks</b>	<b>Segmen 5</b>	<b>11.392</b>	<b>Segmen 5</b>	<b>10.693</b>
<b>Deformasi Terbesar</b>		<b>11.392</b>		<b>10.693</b>

## 2. Gaya-gaya Dalam (Non-Seismik dan Seismik)

Gaya Aksial MAT 5 mbgl (Non-Seismik)				
Tahap	Gaya Aksial (kN/m)			
	Titik	Tunnel 1	Titik	Tunnel 2
Tunnel 1	<i>Crown</i>	-1051.734	-	-
	<i>Spring Line 1</i>	-1063.990		
	<i>Invert</i>	-1061.951		
	<i>Spring Line 2</i>	-1064.062		
<b>Maks</b>	<b>Segmen 5</b>	<b>-1064.548</b>		
Tunnel 2	<i>Crown</i>	-1063.125	<i>Crown</i>	-1051.755
	<i>Spring Line 1</i>	-1066.090	<i>Spring Line 1</i>	-1064.065
	<i>Invert</i>	-1076.875	<i>Invert</i>	-1061.856
	<i>Spring Line 2</i>	-1066.622	<i>Spring Line 2</i>	-1063.974
<b>Maks</b>	<b>Segmen 3</b>	<b>-1082.222</b>	<b>Segmen 5</b>	<b>-1064.547</b>
<b>Gaya Aksial Terbesar</b>		<b>-1082.222</b>		<b>-1064.547</b>
		<b>1082.222</b>		<b>1064.547</b>

Gaya Geser MAT 5 mbgl (Non-Seismik)				
Tahap	Gaya Geser (kN/m)			
	Titik	Tunnel 1	Titik	Tunnel 2
Tunnel 1	<i>Crown</i>	-1.025	-	-
	<i>Spring Line 1</i>	-1.378		
	<i>Invert</i>	0.197		
	<i>Spring Line 2</i>	1.170		
<b>Maks</b>	<b>Segmen 2</b>	<b>2.535</b>		
Tunnel 2	<i>Crown</i>	2.676	<i>Crown</i>	1.038
	<i>Spring Line 1</i>	4.326	<i>Spring Line 1</i>	-1.176
	<i>Invert</i>	-5.129	<i>Invert</i>	-0.210
	<i>Spring Line 2</i>	0.124	<i>Spring Line 2</i>	1.369
<b>Maks</b>	<b>Segmen 3</b>	<b>9.191</b>	<b>Segmen 2</b>	<b>-2.531</b>
<b>Gaya Geser Terbesar</b>		<b>9.191</b>		<b>-2.531</b>
		<b>9.191</b>		<b>2.531</b>

Gaya Aksial MAT 2 mbgl (Non-Seismik)				
Tahap	Gaya Aksial (kN/m)			
	Titik	Tunnel 1	Titik	Tunnel 2
Tunnel 1	<i>Crown</i>	-1051.769	-	-
	<i>Spring Line 1</i>	-1064.010		
	<i>Invert</i>	-1061.957		
	<i>Spring Line 2</i>	-1064.072		
<b>Maks</b>	<b>Segmen 5</b>	<b>-1064.557</b>		
Tunnel 2	<i>Crown</i>	-1064.796	<i>Crown</i>	-1051.825
	<i>Spring Line 1</i>	-1066.248	<i>Spring Line 1</i>	-1064.090
	<i>Invert</i>	-1079.211	<i>Invert</i>	-1061.863
	<i>Spring Line 2</i>	-1066.839	<i>Spring Line 2</i>	-1063.984
<b>Maks</b>	<b>Segmen 3</b>	<b>-1085.040</b>	<b>Segmen 5</b>	<b>-1064.557</b>
<b>Gaya Aksial Terbesar</b>		<b>-1085.040</b>		<b>-1064.557</b>
		<b>1085.040</b>		<b>1064.557</b>

Gaya Geser MAT 2 mbgl (Non-Seismik)				
Tahap	Gaya Geser (kN/m)			
	Titik	Tunnel 1	Titik	Tunnel 2
Tunnel 1	<i>Crown</i>	-1.042	-	-
	<i>Spring Line 1</i>	-1.380		
	<i>Invert</i>	0.198		
	<i>Spring Line 2</i>	1.169		
<b>Maks</b>	<b>Segmen 2</b>	<b>2.536</b>		
Tunnel 2	<i>Crown</i>	2.090	<i>Crown</i>	1.031
	<i>Spring Line 1</i>	3.516	<i>Spring Line 1</i>	-1.175
	<i>Invert</i>	-4.193	<i>Invert</i>	-0.210
	<i>Spring Line 2</i>	0.334	<i>Spring Line 2</i>	1.369
<b>Maks</b>	<b>Segmen 3</b>	<b>7.644</b>	<b>Segmen 2</b>	<b>-2.530</b>
<b>Gaya Geser Terbesar</b>		<b>7.644</b>		<b>-2.530</b>
		<b>7.644</b>		<b>2.530</b>

Gaya Aksial MAT 0 mbgl (Non-Seismik)				
Tahap	Gaya Aksial (kN/m)			
	Titik	Tunnel 1	Titik	Tunnel 2
Tunnel 1	<i>Crown</i>	-1051.756	-	-
	<i>Spring Line 1</i>	-1063.999		
	<i>Invert</i>	-1061.955		
	<i>Spring Line 2</i>	-1064.074		
<b>Maks</b>	<b>Segmen 5</b>	<b>-1064.560</b>		
Tunnel 2	<i>Crown</i>	-1067.419	<i>Crown</i>	-1051.755
	<i>Spring Line 1</i>	-1066.544	<i>Spring Line 1</i>	-1064.065
	<i>Invert</i>	-1082.887	<i>Invert</i>	-1061.856
	<i>Spring Line 2</i>	-1067.243	<i>Spring Line 2</i>	-1063.974
<b>Maks</b>	<b>Segmen 3</b>	<b>-1089.480</b>	<b>Segmen 5</b>	<b>-1064.570</b>
<b>Gaya Aksial Terbesar</b>		<b>-1089.480</b>		<b>-1064.570</b>
		<b>1089.480</b>		<b>1064.570</b>

Gaya Geser MAT 0 mbgl (Non-Seismik)				
Tahap	Gaya Geser (kN/m)			
	Titik	Tunnel 1	Titik	Tunnel 2
Tunnel 1	<i>Crown</i>	-1.029	-	-
	<i>Spring Line 1</i>	-1.373		
	<i>Invert</i>	0.197		
	<i>Spring Line 2</i>	1.168		
<b>Maks</b>	<b>Segmen 2</b>	<b>2.525</b>		
Tunnel 2	<i>Crown</i>	1.726	<i>Crown</i>	1.029
	<i>Spring Line 1</i>	3.011	<i>Spring Line 1</i>	-1.175
	<i>Invert</i>	-3.587	<i>Invert</i>	-0.210
	<i>Spring Line 2</i>	0.462	<i>Spring Line 2</i>	1.369
<b>Maks</b>	<b>Segmen 3</b>	<b>6.689</b>	<b>Segmen 2</b>	<b>-2.528</b>
<b>Gaya Geser Terbesar</b>		<b>6.689</b>		<b>-2.528</b>
		<b>6.689</b>		<b>2.528</b>

Gaya Aksial MAT 5 mbgl (Seismik)				
Tahap	Gaya Aksial (kN/m)			
	Titik	<i>Tunnel 1</i>	Titik	<i>Tunnel 2</i>
<i>Gempa</i>	<i>Crown</i>	-1116.193	<i>Crown</i>	-1098.781
	<i>Spring Line 1</i>	-1137.960	<i>Spring Line 1</i>	-1135.884
	<i>Invert</i>	-1130.301	<i>Invert</i>	-1108.878
	<i>Spring Line 2</i>	-1139.033	<i>Spring Line 2</i>	-1135.596
<b>Maks</b>	<b>Segmen 3</b>	<b>-1141.949</b>	<b>Segmen 5</b>	<b>-1135.652</b>
<b>Gaya Aksial Terbesar</b>		<b>-1141.949</b>		<b>-1135.884</b>
		<b>1141.949</b>		<b>1135.884</b>

Gaya Geser MAT 5 mbgl (Seismik)				
Tahap	Gaya Geser (kN/m)			
	Titik	<i>Tunnel 1</i>	Titik	<i>Tunnel 2</i>
<i>Gempa</i>	<i>Crown</i>	-1.486	<i>Crown</i>	5.438
	<i>Spring Line 1</i>	-1.014	<i>Spring Line 1</i>	-6.444
	<i>Invert</i>	-6.468	<i>Invert</i>	2.387
	<i>Spring Line 2</i>	5.270	<i>Spring Line 2</i>	6.934
<b>Maks</b>	<b>Segmen 5-K</b>	<b>-7.876</b>	<b>Segmen 2</b>	<b>-11.240</b>
<b>Gaya Geser Terbesar</b>		<b>-7.876</b>		<b>-11.240</b>
		<b>7.876</b>		<b>11.240</b>

Gaya Aksial MAT 2 mbgl (Seismik)				
Tahap	Gaya Aksial (kN/m)			
	Titik	<i>Tunnel 1</i>	Titik	<i>Tunnel 2</i>
<i>Gempa</i>	<i>Crown</i>	-1113.237	<i>Crown</i>	-1098.540
	<i>Spring Line 1</i>	-1137.267	<i>Spring Line 1</i>	-1135.644
	<i>Invert</i>	-1126.291	<i>Invert</i>	-1108.547
	<i>Spring Line 2</i>	-1138.379	<i>Spring Line 2</i>	-1135.155
<b>Maks</b>	<b>Segmen 3</b>	<b>-1145.875</b>	<b>Segmen 5</b>	<b>-1135.895</b>
<b>Gaya Aksial Terbesar</b>		<b>-1145.875</b>		<b>-1135.895</b>
		<b>1145.875</b>		<b>1135.895</b>

Gaya Geser MAT 2 mbgl (Seismik)				
Tahap	Gaya Geser (kN/m)			
	Titik	<i>Tunnel 1</i>	Titik	<i>Tunnel 2</i>
<i>Gempa</i>	<i>Crown</i>	-2.046	<i>Crown</i>	5.387
	<i>Spring Line 1</i>	-1.801	<i>Spring Line 1</i>	-6.441
	<i>Invert</i>	-5.846	<i>Invert</i>	2.411
	<i>Spring Line 2</i>	5.486	<i>Spring Line 2</i>	6.895
<b>Maks</b>	<b>Segmen 5</b>	<b>-7.388</b>	<b>Segmen 2</b>	<b>-11.164</b>
<b>Gaya Geser Terbesar</b>		<b>-7.388</b>		<b>-11.164</b>
		<b>7.388</b>		<b>11.164</b>

Tahap	Titik	MAT 5 mbgl	MAT 2 mbgl	MAT 0 mbgl
		Momen Lentur	Momen Lentur	Momen Lentur
		kNm/m	kNm/m	kNm/m
		<i>Tunnel 1</i>	<i>Tunnel 1</i>	<i>Tunnel 1</i>
Penggalian <i>Tunnel 1</i> ( <i>Downtrack</i> )	Segmen 1	2.072	2.078	2.079
	Join 1	0.000	0.000	0.000
	Segmen 2	<b>-2.888</b>	<b>-2.887</b>	<b>-2.878</b>
	Join 2	0.000	0.000	0.000
	Segmen 3	0.450	0.451	0.449
	Join 3	0.000	0.000	0.000
	Segmen 4	0.418	0.418	0.417
	Join 4	0.000	0.000	0.000
	Segmen 5	-2.537	-2.535	-2.534
	Join 5	0.000	0.000	0.000
	Segmen K	-0.257	-0.261	-0.263
	Join 6	0.000	0.000	0.000
<b>Maks</b>		<b>-2.888</b>	<b>-2.887</b>	<b>-2.878</b>

Tahap	Titik	MAT 5 mbgl		MAT 2 mbgl		MAT 0 mbgl		Tahap	Titik	MAT 5 mbgl		MAT 2 mbgl	
		Momen Lentur		Momen Lentur		Momen Lentur				Momen Lentur		Momen Lentur	
		kNm/m		kNm/m		kNm/m				kNm/m		kNm/m	
		<i>Tunnel 1</i>	<i>Tunnel 2</i>	<i>Tunnel 1</i>	<i>Tunnel 2</i>	<i>Tunnel 1</i>	<i>Tunnel 2</i>			<i>Tunnel 1</i>	<i>Tunnel 2</i>	<i>Tunnel 1</i>	<i>Tunnel 2</i>
Penggalian <i>Tunnel 2</i> ( <i>Uptrack</i> )	Segmen 1	-4.769	2.080	-3.677	2.096	-2.991	2.089	Gempa	Segmen 1	3.601	10.020	4.544	9.902
	Join 1	0	0	0	0	0	0		Join 1	0	0	0	0
	Segmen 2	9.271	<b>-2.898</b>	7.350	<b>-2.897</b>	6.124	<b>-2.896</b>		Segmen 2	0.711	<b>-12.938</b>	-2.267	<b>-12.872</b>
	Join 2	0	0	0	0	0	0		Join 2	0	0	0	0
	Segmen 3	<b>-9.526</b>	0.464	<b>-7.906</b>	0.465	<b>-6.862</b>	0.464		Segmen 3	-7.045	3.245	-5.434	3.223
	Join 3	0	0	0	0	0	0		Join 3	0	0	0	0
	Segmen 4	2.105	0.425	1.889	0.425	1.751	0.424		Segmen 4	6.931	5.282	6.751	5.314
	Join 4	0	0	0	0	0	0		Join 4	0	0	0	0
	Segmen 5	0.818	-2.544	0.321	-2.540	-0.483	-2.541		Segmen 5	<b>-9.659</b>	-12.466	<b>-9.021</b>	-12.486
	Join 5	0	0	0	0	0	0		Join 5	0	0	0	0
	Segmen K	0.348	-0.264	0.243	-0.275	0.175	-0.268		Segmen K	0.494	-0.395	0.451	-0.421
	Join 6	0	0	0	0	0	0		Join 6	0	0	0	0
<b>Maks</b>		<b>-9.526</b>	<b>-2.898</b>	<b>-7.906</b>	<b>-2.897</b>	<b>-6.862</b>	<b>-2.896</b>	<b>Maks</b>		<b>-9.659</b>	<b>-12.938</b>	<b>-9.021</b>	<b>-12.872</b>

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Ahmad Ilmiawan Putra. Lahir di Gresik pada tanggal 02 Juni 1998. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Roudhotul Athfal Sambogunung, MI YKUI Sambogunung, Dukun Gresik, SMPN 1 Lamongan, MAN Lamongan. Setelah lulus dari SMA pada tahun 2016, penulis mengikuti seleksi ujian masuk Diploma 4 ITS Surabaya dan diterima di jurusan Teknik Infrastruktur Sipil pada tahun 2016, terdaftar dengan NRP 10111610013056. Penulis pernah aktif dalam beberapa kegiatan seminar yang diselenggarakan oleh kampus ITS. Penulis juga pernah mengikut pelatihan-pelatihan yang diselenggarakan oleh pihak kampus maupun instansi luar. Penulis juga pernah aktif dalam berbagai kepanitiaan dan juga kegiatan yang ada selama menjadi mahasiswa. Berikut penulis sertakan email: [putraaip02@gmail.com](mailto:putraaip02@gmail.com).