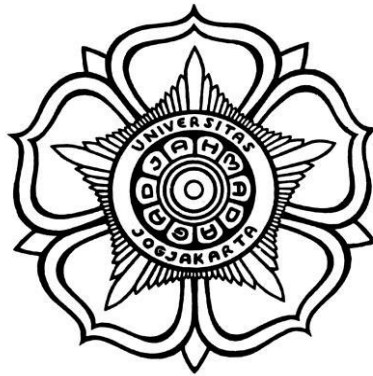


TUGAS AKHIR

**STUDI PERILAKU TEROWONGAN BOR DI BAWAH FONDASI TIANG-
RAKIT MENGGUNAKAN PLAXIS 8.6**

Diajukan untuk memenuhi sebagai persyaratan mencapai derajat Sarjana S1 pada
Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik,
Universitas Gadjah Mada



Disusun oleh:

ALFREDO JOSEPH YULIANTO

12/333757/TK/40099

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL DAN LINGKUNGAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS GADJAH MADA

YOGYAKARTA

2016

TUGAS AKHIR
**STUDI PERILAKU TEROWONGAN BOR DI BAWAH FONDASI TIANG-
RAKIT MENGGUNAKAN PLAXIS 8.6**

Dipersiapkan dan disusun oleh:

ALFREDO JOSEPH YULIANTO
12/333757/TK/40099


Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
Pada tanggal 8 Desember 2016

Susunan Dewan Penguji
Dosen Pembimbing


Prof. Dr. Ir. Hary Christady Hardivatmo M. Eng., DEA
NIP. 195510181986121001

Dosen Penguji I

Dosen Penguji II



Dr. Ir. Ahmad Rifa'i, M.T.
NIP. 196907121995121001


Prof. Ir. Survo Hapsoro Tri Utomo, Ph.D.
NIP. 195609011985031003

Tugas Akhir ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
Untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
Tanggal 06-01-17

Mengetahui

Ketua Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan FT UGM


Prof. Ir. Joko Suiono, M.Eng., Ph.D.
NIP. 196111261989021001

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa belum pernah ada Tugas akhir dengan judul sama dan dalam Tugas Akhir ini tidak terdapat suatu karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini, disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, Oktober 2016

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Alfredo Joseph Yulianto', with a long horizontal stroke extending to the right.

Alfredo Joseph Yulianto

PERSEMBAHAN

Kupersembahkan tugas akhir ini kepada :

Mami, Papi dan adikku Nia yang tercinta

Saudara-saudari di kelas A dan Sipil UGM 2012

Dewan Pengurus dan Pengurus Harian Kamadhis UGM 2013 dan 2014

Saudara-saudari, senior dan junior di Kamadhis UGM

Kawan-kawan seperjuangan magang di SOWJ-JV

Keluarga NTT-08 dan warga desa Golo Sepang, Manggarai Barat, NTT

Para karyawan, engineer, dan manpower dari PT.SOWJ-JV

Serta untuk Tanah Air Indonesia yang kubanggakan...

KATA PENGANTAR

Puji syukur dipanjatkan kepada kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena rahmat kuasa-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini tepat pada waktunya. Laporan tugas akhir ini disusun guna memenuhi salah satu syarat akademik dalam mencapai derajat Sarjana Teknik pada Program Sarjana Reguler Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada.

Tugas akhir ini diberi judul Studi Perilaku Terowongan Bor di bawah Fondasi Tiang-Rakit menggunakan PLAXIS 8.6. Tujuan dari tugas akhir ini adalah mempelajari perilaku teknis dari terowongan bor akibat adanya kondisi yang bervariasi pada situasi lapangan. Perilaku teknis tersebut dapat diinterpretasikan melalui perbandingan deformasi dan gaya-gaya dalam yang bekerja pada terowongan.

Penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penulisan laporan ini. Penulis telah menerima bantuan, petunjuk, bimbingan, dan saran dari berbagai pihak. Ucapan tersebut penulis tujuhan kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Hary Christady Hardiyatmo, M.Eng., DEA. selaku dosen pembimbing tugas akhir.
2. Dr. Ir. Ahmad Rifa'i, MT. selaku dosen penguji I.
3. Prof. Ir. Suryo Hapsoro Tri Utomo, Ph.D. selaku dosen penguji II.
4. Prof. Ir. Joko Sujono, M. Eng., Ph.D., selaku Ketua Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
5. Dr. Ir. Rachmad Jayadi, M. Eng., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
6. Orang tua dan adik yang telah memberikan dukungan kepada penulis.

7. Pihak-pihak yang telah banyak membantu dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari laporan ini masih belum sempurna. Akhir kata, penulis berharap agar laporan ini bermanfaat bagi rekan-rekan mahasiswa pada umumnya dan penulis pada khususnya.

Yogyakarta, Oktober 2016

Penulis

INTISARI

Pembangunan terowongan bawah tanah di daerah urban masih merupakan isu yang tidak biasa di Indonesia. Kebutuhan akan pemahaman ilmiah terhadap mekanika formasi terowongan dan pengaruhnya terhadap kondisi tanah dan struktur di sekitarnya juga semakin meningkat. Pemahaman ini mengarah kepada pencegahan kegagalan dalam terowongan, optimasi aspek-aspek geoteknik, ekonomi, maupun lingkungan.

Dalam analisis perilaku terowongan bor ini dilakukan pemodelan dan analisis struktur dengan bantuan *software* PLAXIS 8.6, serta analisis stabilitas dengan metode Davis et al. (1980). Dalam pembuatan model ditambahkan antarmuka struktur berupa fondasi tiang-rakit dengan variasi geometri dan kondisi untuk memberikan pendekatan yang lebih akurat.

Hasil analisis dengan PLAXIS 8.6 menunjukkan deformasi terbesar dan momen lentur terbesar dihasilkan pada kasus penggalian terowongan secara bertahap dengan panjang fondasi tiang mencapai 30 m. Instabilitas dari terowongan juga terjadi pada kasus terowongan dengan panjang fondasi tiang mencapai 30 m. Dari hasil analisis juga menunjukkan adanya pengaruh air tanah, geometri struktur fondasi, dan pemodelan kekakuan terowongan terhadap deformasi dan gaya dalam yang dihasilkan oleh terowongan bor. Dari seluruh hasil yang didapatkan, disimpulkan bahwa semakin dekat terowongan bor dibangun terhadap struktur eksisting, semakin besar dampak yang dihasilkan terhadap struktur eksisting maupun terowongan tersebut.

Kata kunci : Terowongan bor, deformasi, gaya dalam, stabilitas

ABSTRACT

Construction of bored tunnel in the urban area is still uncommon in Indonesia. Needs of scientific comprehension about tunnel mechanics and the influence of soil condition around the nearby structures is also rising. This comprehension leads to tunnel's failure mitigation, optimization of geotechnical aspects, economics, and even environment.

This bored tunnel behaviour study, use help from software PLAXIS 8.6 to create the models and perform the structural analysis, and tunnel stability analysis use analytic solution from Davis et al. In creation of model, an interface of raft-pile foundation added with variety of geometry and condition to present more accurate approach.

The results of PLAXIS 8.6 shows the largest deformation and bending moment produced by the case of gradual excavation with the length of pile foundation is 30 m. Instability of tunnel also happen in case of length of pile foundation is 30 m. From analysis also show that seepage, pile-raft geometry, and model of tunnel stiffness give influence to deformation and body forces produced by bored tunnel. From summary of every analysis result, it can be concluded, closer the bored tunnel excavation to the existing structure, will produce more significant impact to the existing structure and also to tunnel itself.

Keyword : Bored tunnel, deformation, body forces, stability

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN.....	iii
PERSEMBAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR	v
INTISARI.....	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR NOTASI.....	xviii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Keaslian Penelitian	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Definisi Terowongan.....	5
2.2 Klasifikasi Terowongan	5
2.2.1 Berdasarkan material penyusunnya.....	5
2.2.2 Berdasarkan fungsinya	7
2.3 <i>Tunnel Boring Machine (TBM)</i>	8
2.3.1 <i>Slurry Shield Boring Machine</i>	9
2.3.2 <i>EPB Shield Boring Machine</i>	10

2.4	<i>Lining</i> Terowongan	11
2.5	Fondasi tiang-rakit.....	12
2.6	Penelitian Sejenis	14
BAB 3	LANDASAN TEORI.....	16
3.1	Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb.....	16
3.2	Metode Elemen Hingga.....	17
3.3	Persamaan Konstitutif	18
3.3.1	Material Elastik Linear.....	18
3.3.2	<i>Plane Strain</i>	20
3.3.3	<i>Plane Stress</i>	20
3.3.4	<i>Axially Symetric Solids (Axisymmetric)</i>	21
3.4	PLAXIS 8.6	21
3.4.1	Model Geometri	22
3.4.2	Beban dan kondisi batas.....	23
3.4.3	Karakteristik Material	23
3.4.4	Penyusunan Jaring Elemen	24
3.4.5	Kondisi Awal	24
3.4.6	Prosedur K_0	25
3.4.7	Perhitungan dan Hasil Keluaran.....	25
3.5	Model Material	26
3.5.1	Model Mohr-Coulomb	26
3.5.2	Parameter Dasar Model Mohr-Coulomb.....	26
3.6	Perilaku Teknis dari Terowongan Bor	30
3.6.1	Distribusi Tegangan di sekitar Terowongan	30
3.6.2	Momen Inersia Efektif <i>Lining</i>	31

3.6.3	Pengaruh Muka Air Tanah.....	32
3.6.4	Stabilitas Terowongan.....	32
3.6.5	Penurunan maksimum pada rakit.....	34
BAB 4	METODE PENELITIAN	35
4.1	Prosedur Penelitian.....	35
4.2	Data Penelitian	36
4.2.1	Data interpretasi geoteknik	36
4.2.2	Data Properti <i>Lining</i>	43
4.2.3	Data properti fondasi.....	44
4.3	Prosedur Analisis Data	45
4.4	Pembahasan	53
BAB 5	HASIL DAN PEMBAHASAN	54
5.1	Basis Pemodelan.....	54
5.2	Geometri Model	55
5.3	Pembahasan Hasil Analisis	55
5.3.1	Perbedaan Pemodelan Kekakuan Terowongan.....	55
5.3.2	Pengaruh Perbedaan Metode Konstruksi Terowongan.....	61
5.3.3	Pengaruh Geometri Struktur Fondasi dengan Gaya-gaya dalam Terowongan.....	69
5.3.4	Pengaruh Air Tanah terhadap perilaku Terowongan.....	70
5.3.5	Stabilitas Terowongan.....	72
5.3.6	Penurunan fondasi tiang-rakit akibat penggalian terowongan.....	75
BAB 6	PENUTUP	79
6.1	Kesimpulan.....	79
6.2	Saran.....	80

DAFTAR PUSTAKA	81
LAMPIRAN.....	83

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Penurunan maksimum yang diijinkan oleh Skempton dan MacDonald (1965).....	34
Tabel 4.1 Rangkaian Pengujian <i>soil properties</i>	37
Tabel 4.2 Efisiensi jenis alat pemukul	40
Tabel 4.3 Efisiensi untuk koreksi diameter lubang bor.....	40
Tabel 4.4 Efisiensi untuk koreksi tabung sampel.....	40
Tabel 4.5 Efisiensi untuk koreksi panjang batang	40
Tabel 4.6 Nilai perkiraan modulus elastisitas untuk berbagai jenis tanah	41
Tabel 4.7 Detail parameter tanah dalam pemodelan PLAXIS 8.6.....	42
Tabel 4.8 Karakteristik <i>lining</i> terowongan.....	43
Tabel 4.9 Input fondasi rakit dalam PLAXIS 8.6	47
Tabel 4.10 Input tiang dalam PLAXIS 8.6	47
Tabel 4.11 Input berat tiang dalam PLAXIS 8.6	48
Tabel 4.12 Input antarmuka tiang	48
Tabel 4.13 Posisi diskontinuitas antar segmen terowongan	50
Tabel 4.14 Input parameter <i>lining</i> terowongan	51
Tabel 5.1 Koordinat alinemen terowongan.....	55
Tabel 5.2 Perbandingan deformasi terowongan monolit dengan <i>precast</i>	56
Tabel 5.3 Perbandingan momen lentur terowongan monolit dan <i>precast</i>	58
Tabel 5.4 Perbandingan momen lentur maksimum <i>Downtrack</i> setelah penggalian	62
Tabel 5.5 Perbandingan diameter <i>downtrack</i> setelah penggalian	62
Tabel 5.6 Perbandingan deformasi diameter <i>downtrack</i> akibat perbedaan metode konstruksi.....	63
Tabel 5.7 Perbandingan momen lentur <i>uptrack</i> setelah penggalian	66
Tabel 5.8 Perbandingan deformasi <i>Uptrack</i> setelah penggalian.....	67
Tabel 5.9 Perbandingan persentase deformasi <i>Uptrack</i> setelah penggalian	67
Tabel 5.10 Perbandingan gaya-gaya dalam terowongan terhadap geometri struktur fondasi.....	69
Tabel 5.11 Perbandingan deformasi diameter terowongan.....	71

Tabel 5.12 Perbandingan persentase deformasi diameter terowongan	71
Tabel 5.13 Perbandingan gaya-gaya dalam terowongan.....	71
Tabel 5.14 Perbandingan nilai stabilitas terowongan	73
Tabel 5.15 Penurunan maksimum fondasi tiang-rakit	75
Tabel 5.16 Penurunan diferensial maksimum fondasi tiang-rakit	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Terowongan bor MRT Jakarta	2
Gambar 2.1 Terowongan <i>cut and cover</i>	6
Gambar 2.2 Terowongan batuan	6
Gambar 2.3 Terowongan tanah lunak	7
Gambar 2.4 <i>Tunnel boring machine</i>	8
Gambar 2.5 Skema operasional TBM	9
Gambar 2.6 <i>Slurry shield machine</i>	10
Gambar 2.7 <i>EPB shield machine</i>	11
Gambar 2.8 <i>Lining</i> Terowongan	12
Gambar 2.9 Ilustrasi penurunan yang terjadi pada fondasi tiang-rakit	13
Gambar 2.10 Interaksi fondasi tiang-rakit dengan tanah	14
Gambar 2.11 Perbandingan momen lentur terowongan konstruksi bertahap	15
Gambar 3.1 Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb	17
Gambar 3.2 Pendekatan sifat material dengan <i>Axially Symetric Solids</i>	21
Gambar 3.3 Regangan bidang dan axi-Simetri	22
Gambar 3.4 Lembar tab parameter material	23
Gambar 3.5 Jaring elemen	24
Gambar 3.6 Nilai Ko	25
Gambar 3.7 Lembar tab perhitungan	26
Gambar 3.8 Lembar tab parameter untuk model Mohr-Coulomb	27
Gambar 3.9 E_0 dan E_{50} untuk hasil uji Triaksial terdrainase standar	28
Gambar 3.10 Sudut gesek tanah	29
Gambar 3.11 Distribusi tegangan dan pola deformasi <i>flexible lining</i> dan <i>rigid lining</i>	31
Gambar 3.12 Pendekatan stabilitas terowongan Broms dan Bennemark (1967)..	33
Gambar 3.13 Pendekatan stabilitas terowongan Davis et al. (1980).....	34
Gambar 4.1 Bagan alir penelitian.....	36
Gambar 4.2 Nilai N-SPT pada lapisan tanah penelitian	37
Gambar 4.3 Jenis lapisan tanah pada setiap kedalaman <i>borelog</i>	38
Gambar 4.4 Segmen <i>lining</i> pra-cetak	43

Gambar 4.5 Konfigurasi pemasangan segmen.....	44
Gambar 4.6 Pemodelan rakit sebagai pelat	46
Gambar 4.7 Pemodelan tiang sebagai pelat	47
Gambar 4.8 Perancang terowongan	49
Gambar 4.9 Model terowongan yang digunakan dalam penelitian.....	50
Gambar 4.10 Penyusunan jaring elemen hingga.....	52
Gambar 4.11 Lembar tab parameter perhitungan	53
Gambar 5.1 Contoh model terowongan yang digunakan.....	54
Gambar 5.2 Pola deformasi <i>Downtrack</i> (monolit).....	56
Gambar 5.3 Pola deformasi <i>Downtrack</i> (<i>precast</i>)	57
Gambar 5.4 Pola deformasi <i>Uptrack</i> (monolit)	57
Gambar 5.5 Pola deformasi <i>Uptrack</i> (<i>precast</i>)	58
Gambar 5.6 BMD <i>Downtrack</i> (monolit).....	59
Gambar 5.7 BMD <i>Downtrack</i> (<i>precast</i>)	59
Gambar 5.8 BMD <i>Uptrack</i> (monolit)	60
Gambar 5.9 BMD <i>Uptrack</i> (<i>precast</i>)	60
Gambar 5.10 Perbandingan momen lentur <i>downtrack</i> setelah penggalian	62
Gambar 5.11 Perbandingan persentase deformasi <i>Downtrack</i> setelah penggalian.....	63
Gambar 5.12 Pola deformasi <i>Downtrack</i> setelah penggalian bersamaan	64
Gambar 5.13 Pola deformasi <i>Downtrack</i> setelah penggalian <i>Downtrack</i>	64
Gambar 5.14 Pola deformasi <i>Downtrack</i> setelah penggalian <i>Uptrack</i>	65
Gambar 5.15 Perbandingan momen lentur <i>uptrack</i> setelah penggalian.....	66
Gambar 5.16 Perbandingan persentase deformasi <i>Uptrack</i> setelah penggalian ...	67
Gambar 5.17 Pola deformasi <i>Uptrack</i> akibat penggalian bersamaan	68
Gambar 5.18 Pola deformasi <i>Uptrack</i> akibat penggalian bertahap.....	68
Gambar 5.19 Perbandingan gaya-gaya dalam terowongan terhadap geometri struktur fondasi	70
Gambar 5.20 Perbandingan nilai stabilitas terowongan.....	74
Gambar 5.21 Penurunan fondasi tiang-rakit dengan panjang tiang 20 m.....	76
Gambar 5.22 Penurunan fondasi tiang-rakit dengan panjang tiang 22,5 m.....	76
Gambar 5.23 Penurunan fondasi tiang-rakit dengan panjang tiang 25 m.....	77

Gambar 5.24 Penurunan fondasi tiang-rakit dengan panjang tiang 27,5 m.....	77
Gambar 5.25 Penurunan fondasi tiang-rakit dengan panjang tiang 30 m.....	78

DAFTAR NOTASI

Notasi	Arti	Dimensi
E	Modulus Young	$ML^{-1}T^{-2}$
τ	Kuat geser tanah	$ML^{-1}T^{-2}$
c	Kohesi tanah	$ML^{-1}T^{-2}$
φ	Sudut gesek tanah	-
ψ	Sudut dilatasi	-
σ	Tegangan normal pada bidang runtuh	$ML^{-1}T^{-2}$
$[K]$	Matriks kekakuan global	MT^{-2}
$[D]$	Matriks perpindahan global	L
$[R]$	Matriks gaya global	MLT^{-2}
ε	Regangan normal	-
γ	Regangan geser	-
ν	<i>Poisson's Ratio</i>	-
G	Modulus Geser	$ML^{-1}T^{-2}$
K_0	Koefisien tekanan tanah lateral kondisi <i>at rest</i>	-
σ_v	Tegangan vertikal pada kedalaman tertentu	$ML^{-1}T^{-2}$
σ_h	Tegangan horizontal pada kedalaman tertentu	$ML^{-1}T^{-2}$
E_0	Modulus Young pada daerah kemiringan awal	$ML^{-1}T^{-2}$
E_{50}	Modulus sekan pada 50% kekuatan regangan	$ML^{-1}T^{-2}$
E_{ur}	Modulus pengurangan beban	$ML^{-1}T^{-2}$
I_e	Momen inersia efektif	$ML^{-1}T^{-4}$
I_j	Momen inersia pada <i>lining joint</i>	$ML^{-1}T^{-4}$
I_s	Momen inersia awal	$ML^{-1}T^{-4}$
n	Jumlah segmen (diluar segmen <i>key</i>)	-
γ_{unsat}	Berat jenis tanah kering	$ML^{-2}T^{-2}$
γ_{sat}	Berat jenis tanah tersaturasi	$ML^{-2}T^{-2}$

γ_w	Berat jenis air	$ML^{-2}T^{-2}$
γ'	Berat jenis tanah terendam air	$ML^{-2}T^{-2}$
N	Angka stabilitas <i>tunnel face</i>	-
q_s	Beban permukaan	$ML^{-1}T^{-2}$
C	Kedalaman <i>crown</i> terowongan	L
R	Jari-jari terowongan	L
σ_T	Tegangan yang membebani terowongan	$ML^{-1}T^{-2}$
c_u	Kuat geser tanah kondisi <i>undrained</i>	$ML^{-1}T^{-2}$
s	<i>Support pressure</i>	$ML^{-1}T^{-2}$
N_{60}	Nilai N-SPT terkoreksi pada tingkat rasio energi 60%	-
μ_H	Efisiensi alat pemukul	-
μ_B	Koreksi diameter lubang bor	-
μ_S	Koreksi tabung sampel	-
μ_R	Koreksi panjang batang	-
f_c'	Kuat tekan beton	$ML^{-1}T^{-2}$
A	Luas penampang	L^2
h	Tebal elemen pelat dalam PLAXIS	L
w_{tiang}	Berat tiang fondasi per satuan lebar	$ML^{-1}T^{-2}$
γ_{beton}	Berat jenis beton	$ML^{-2}T^{-2}$
γ_{tanah}	Berat jenis tanah	$ML^{-2}T^{-2}$
L	Panjang tiang	L
R_{inter}	Friksi antara elemen pelat dengan tanah	-
θ	Sudut acuan yang diamati	-
D	Diameter terowongan	L
M	Momen lentur yang terjadi pada terowongan	MLT^{-2}
M_{max}	Momen lentur maksimum	MLT^{-2}
N	Gaya aksial yang terjadi pada terowongan	MT^{-2}

N_{max}	Gaya aksial maksimum	MT^{-2}
VTD	<i>Vertical tunnel diameter</i>	-
HTD	<i>Horizontal tunnel diameter</i>	-
$VTDD$	<i>Vertical tunnel diameter deformation</i>	-
$HTDD$	<i>Horizontal tunnel diameter deformation</i>	-
Δs	Tambahan <i>grout pressure</i> yang dibutuhkan	$ML^{-1}T^{-2}$
U_y	Penurunan maksimum pada rakit	L
ΔU_y	Penurunan diferensial maksimum pada rakit	L

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Terowongan pada tanah lunak merupakan salah satu disiplin ilmu teknik sipil yang mencakup dimensi keseluruhan dari terowongan dengan kebutuhan terhadap sistem penyangga yang pada umumnya dibangun di bawah kota dengan kondisi struktur bangunan yang sensitif terhadap bahaya penurunan.

Terowongan pada tanah lunak pertama di Indonesia dibangun di kota Jakarta untuk memfasilitasi sarana transportasi MRT (*Mass Rapid Transit*) Jakarta. Perkembangan pembangunan yang berkelanjutan pada wilayah kota Jakarta menyebabkan berkurangnya lahan yang dapat digunakan dalam pembangunan infrastruktur lainnya. Keadaan ini menyebabkan pembangunan stasiun kereta dan jalur rel kereta listrik MRT mengambil jalan tengah dengan menggali terowongan bor menembus perut ibukota Jakarta.

Pembangunan terowongan bawah tanah di daerah urban masih merupakan isu yang tidak biasa di Indonesia. Kebutuhan akan pemahaman ilmiah terhadap mekanika formasi terowongan dan pengaruhnya terhadap kondisi tanah dan struktur di sekitarnya juga semakin meningkat. Pemahaman ini mengarah kepada pencegahan kegagalan dalam terowongan, optimasi aspek-aspek geoteknik, ekonomi, maupun lingkungan, serta pemahaman terhadap proses yang terjadi pada tanah sebagai akibat dari penggalian terowongan.



Gambar 1.1 Terowongan bor MRT Jakarta

1.2 Rumusan Masalah

Seiring dengan perkembangan pembangunan terowongan di wilayah urban yang padat dengan bangunan tinggi, ada peluang di mana terowongan harus dibangun di bawah struktur fondasi eksisting terkait faktor tata guna lahan, ekonomi, lingkungan, dan berbagai faktor lainnya. Hal ini menyebabkan beberapa permasalahan yang timbul antara lain:

1. Bagaimana pengaruh suatu struktur bangunan eksisting mempengaruhi perilaku terowongan bor tersebut?
2. Apa saja faktor-faktor yang mempengaruhi perilaku terowongan bor tersebut?
3. Bagaimana stabilitas dari terowongan akibat adanya struktur bangunan eksisting tersebut?
4. Apakah penggalian terowongan menimbulkan dampak yang signifikan terhadap struktur bangunan eksisting?

1.3 Tujuan Penelitian

Secara umum penelitian ini akan mempelajari perilaku teknis dari terowongan bor pada tanah lunak yang akan dibangun di bawah gedung bertingkat menggunakan program PLAXIS 8.6. Perilaku teknis yang dimaksud berupa pola deformasi dan gaya-gaya dalam dari terowongan. Adapun maksud dan tujuan dilakukannya penelitian ini secara rinci adalah :

1. Untuk mengetahui pengaruh pemodelan kekakuan terowongan yang sesuai dengan perilaku terowongan yang sesungguhnya,
2. untuk mengetahui pengaruh geometri struktur fondasi bangunan terhadap gaya-gaya dalam dan deformasi terowongan,
3. untuk mengevaluasi pengaruh perbedaan metode penggalian terowongan terhadap gaya-gaya dalam dan deformasi terowongan,
4. untuk mengevaluasi pengaruh air tanah terhadap gaya-gaya dalam dan deformasi terowongan,
5. untuk mengevaluasi stabilitas terowongan di bawah struktur fondasi tersebut, dan,
6. untuk memprediksi penurunan yang terjadi pada struktur rakit akibat perbedaan metode penggalian terowongan.

1.4 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan pembahasan dari penelitian ini, maka dibuat beberapa batasan masalah yang akan diselidiki lebih lanjut dalam penelitian ini. Adapun pembahasan pada analisis ini dibatasi pada beberapa dasar penelitian dan asumsi, yaitu:

1. Profil geologis yang digunakan merupakan salah satu profil lapisan tanah pada sebuah proyek konstruksi terowongan bor MRT Jakarta CP 104, yang berlokasi pada Jl. Jend. Sudirman, Jakarta Selatan.
2. Kondisi pembebanan gedung yang digunakan disederhanakan dengan beban statis merata minimum berdasarkan peraturan BS 8002 : 1994.

3. Beban dinamik berupa beban gempa dan beban lalu lintas tidak diperhitungkan dalam analisis.
4. Penelitian tidak akan mencakup desain struktural (perhitungan tulangan) yang dibutuhkan untuk evaluasi desain.
5. Analisis disederhanakan dengan asumsi semua model perilaku tanah menggunakan model Mohr-Coulomb.
6. Analisis disederhanakan dengan analisis regangan bidang (*plane strain*).
7. Kontraksi terowongan diabaikan dalam pelaksanaan analisis.
8. Struktur antarmuka berupa fondasi tiang-rakit dilibatkan dalam analisis untuk memperoleh hasil yang lebih sesuai dengan kondisi sesungguhnya
9. Terowongan yang ditinjau merupakan terowongan kembar pada desain 104-1
10. Data geoteknik diperoleh dari *Geotechnical Interpretative Report* milik pihak SOWJ-JV
11. Data dimensi terowongan menggunakan milik pihak SOWJ-JV

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan dasar untuk perancangan struktur terowongan bor di bawah struktur bangunan eksisting di masa yang akan datang, memberikan gambaran mengenai dampak struktur bangunan eksisting terhadap stabilitas terowongan, serta memberikan informasi mengenai metode konstruksi yang efisien dalam melaksanakan konstruksi terowongan bor.

1.6 Keaslian Penelitian

Setelah ditelusuri baik di perpustakaan dan *data base* Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan UGM maupun universitas lainnya, ditemukan beberapa penelitian yang membahas mengenai analisis stabilitas terowongan dan pengaruh pembangunan terowongan bor terhadap lingkungan. Pada penelitian kali ini difokuskan pada pengaruh struktur bangunan eksisting terhadap kestabilan dan perilaku teknis dari terowongan bor. Belum ditemukan tugas akhir dan penelitian yang serupa, sehingga tugas akhir ini dapat dikatakan asli.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi Terowongan

Terowongan adalah struktur bawah tanah yang panjangnya berbanding jauh dengan lebar penampang galiannya dan memiliki gradien memanjang. Terowongan umumnya tertutup di seluruh sisi kecuali di kedua ujungnya yang terbuka pada lingkungan luar. Terowongan merupakan salah satu rekayasa infrastruktur yang memanfaatkan ruang pada bawah tanah untuk keperluan transportasi, keairan, penyimpanan, energi, pertahanan, dan aktivitas lainnya, dalam menghadapi masalah keterbatasan ruang dan lahan.

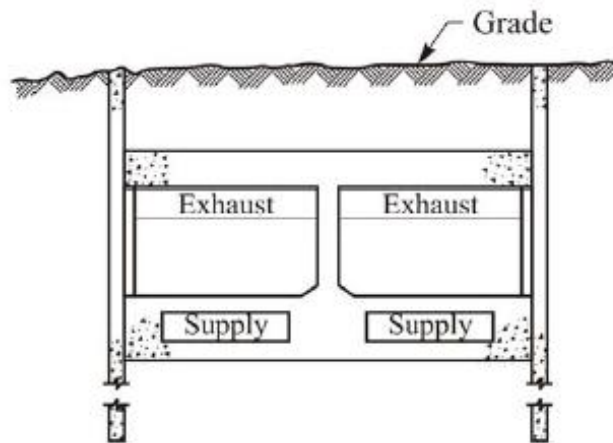
2.2 Klasifikasi Terowongan

2.2.1 Berdasarkan material penyusunnya

Rahardjo (2004) menjelaskan terdapat tiga jenis terowongan yang dibedakan berdasarkan material yang digunakan dalam konstruksi terowongan.

1. Terowongan Gali-Tutup (*Cut and Cover*)

Terowongan ini dibangun dengan cara menggali satu parit besar, membangun struktur terowongan di dalam parit galian, dan ditimbun kembali dengan material timbunan saat pemasangan struktur telah selesai. Untuk material penyusun terowongan ini, digunakan beton pra-cetak yang disebut *box culvert*. Metode ini hanya dapat digunakan apabila terowongan dibangun pada kedalaman tanah yang dangkal dan penggalian dari permukaan tanah memungkinkan.



Gambar 2.1 Terowongan *cut and cover*

2. Terowongan Batuan (*Rock Tunnels*)

Konstruksi terowongan batuan dikerjakan pada batuan masif dengan metode pengeboran atau peledakan. Konstruksi terowongan batuan umumnya lebih mudah dikerjakan dibandingkan dengan terowongan tanah lunak karena batuan memiliki kekakuan dan kestabilan yang lebih tinggi, sehingga perkuatan yang dibutuhkan lebih sederhana.



Gambar 2.2 Terowongan batuan

3. Terowongan Tanah Lunak (*Soft Ground Tunnels*)

Terowongan ini melalui lapisan tanah lunak seperti lempung, pasir, atau batuan lunak. Jenis material ini cenderung mengalami keruntuhan saat

proses penggalian berlangsung, sehingga dibutuhkan suatu dinding atau atap yang kuat sebagai pelindung bersamaan dengan proses penggalian. Umumnya digunakan *shield* (pelindung) untuk melindungi galian tersebut agar tidak runtuh. Teknik yang umum digunakan pada saat ini adalah *shield tunneling*, yang menggunakan *Tunnel Boring Machine (TBM)*.



Gambar 2.3 Terowongan tanah lunak

2.2.2 Berdasarkan fungsinya

Szechy (1967) mengklasifikasikan terowongan berdasarkan fungsinya menjadi tiga klasifikasi utama, yaitu:

1. Terowongan Lalu Lintas

Terowongan lalu lintas meliputi terowongan kereta api, terowongan jalan raya, terowongan pejalan kaki, terowongan bawah laut, dan terowongan kereta api bawah tanah.

2. Terowongan angkutan

Terowongan angkutan meliputi terowongan pembangkit listrik, terowongan penyedia air, terowongan *intake*, terowongan drainase, dan terowongan industri.

3. Terowongan tambang

Terowongan tambang meliputi terowongan utama dan akses, terowongan eksplorasi, terowongan eksploitasi, terowongan pelayanan rute, dan terowongan darurat.

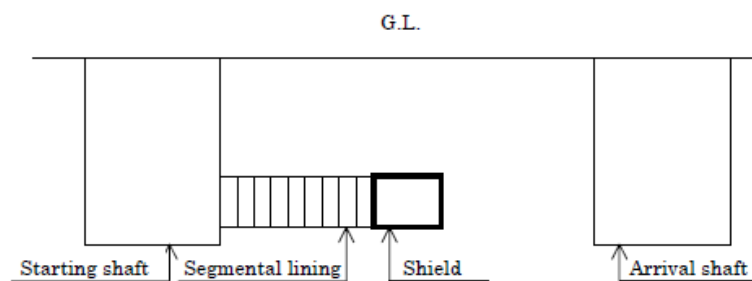
2.3 *Tunnel Boring Machine (TBM)*

Di masa lampau, penggalian terowongan pada tanah lunak (*soft ground tunneling*) tidak dapat dilaksanakan hingga ditemukannya metode *Shield Tunneling*. Ditemukan oleh Sr. Marc Brunnel pada tahun 1818. *Tunnel Boring Machine* atau disebut juga dengan *Shield Machine* merupakan alat utama yang diperlukan dalam pekerjaan penggalian terowongan bor. Proses penggalian dibagi menjadi beberapa tahapan pekerjaan, yaitu penggalian, pemasangan *lining*, pembuangan lumpur galian, dan pergerakan *TBM*. Metode ini didefinisikan sebagai metode untuk membangun terowongan dengan penggalian dan pemasangan struktur dinding terowongan (*lining*) dilaksanakan di dalam suatu sisi pelindung (*shield*) yang berfungsi untuk mencegah runtuhnya tanah di sekitar terowongan.



Gambar 2.4 *Tunnel boring machine*

Sebelum memulai penggalian, diperlukan sebuah bukaan vertikal dari permukaan tanah untuk menempatkan *TBM* yang disebut sebagai *shaft*. Pada umumnya *TBM* akan bergerak dari *shaft* keberangkatan dan tiba di *shaft* tujuan. *TBM* bergerak menggunakan rangkaian pompa hidraulik (*shield jack*) yang mendorong seluruh bagian mesin menembus lapisan tanah yang akan digali. Saat *TBM* bergerak, mata bor *TBM* akan berotasi dengan kecepatan tertentu, dan *shield jack* akan mendorong penampang *lining* ke arah berlawanan untuk menimbulkan resultan yang berfungsi sebagai gaya dorong untuk *TBM* (*thrust force*). Cara kerja dari *TBM* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



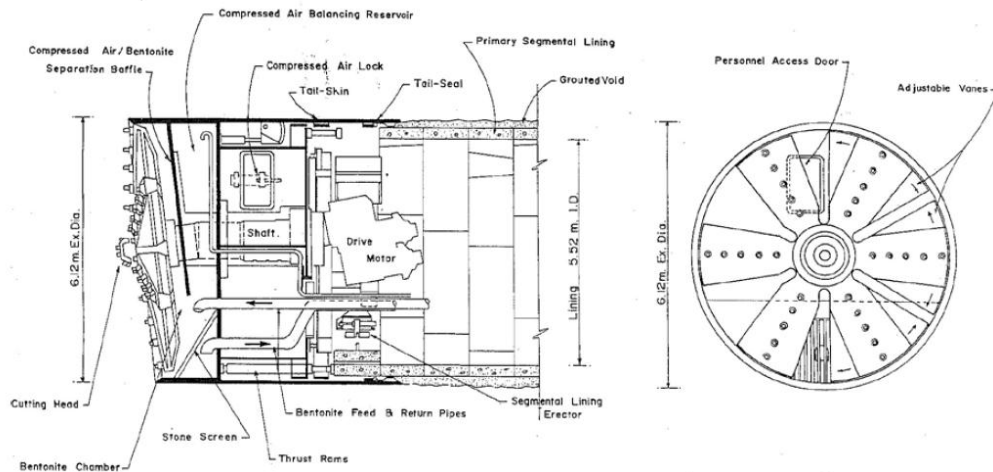
Gambar 2.5 Skema operasional TBM

Dengan ditemukannya berbagai kasus dimana penggalian menghadapi kondisi geologis yang tidak lazim, *TBM* mengalami perkembangan teknologi hingga seperti sekarang. Berbagai variasi *TBM* telah diciptakan untuk dapat menyediakan solusi untuk penggalian terowongan pada kondisi tanah yang sulit dan butuh penanganan khusus.

2.3.1 Slurry Shield Boring Machine

Mesin bor jenis *slurry shield* ini menggunakan campuran bentonit dan air (*slurry*) yang bertekanan untuk menyeimbangkan tekanan tanah dan air tanah pada muka galian. Mesin ini menyalurkan tekanan secara hidraulik melalui lumpur kental yang terbentuk dari hasil galian yang terperangkap dalam *cutter face* dan bercampur dengan bentonit dan air. 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-

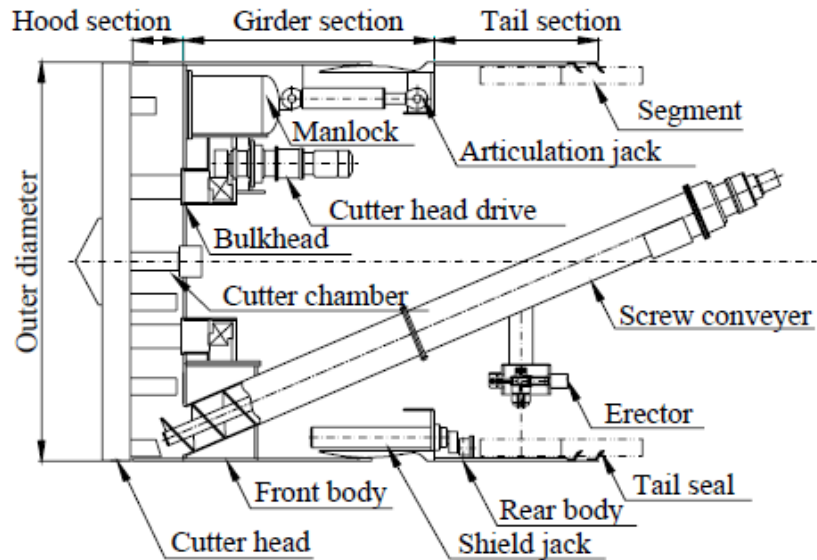
hati. Kekurangan dari metode ini adalah, perlunya instalasi pemisahan yang harus dibangun dan dioperasikan di permukaan untuk memisahkan *slurry* dari lumpur hasil galian.



Gambar 2.6 *Slurry shield machine*

2.3.2 EPB Shield Boring Machine

Prinsip kerja dari *Earth Pressure Balance* (EPB) adalah dengan menyeimbangkan antara tekanan tanah (*earth pressure*) dan air tanah pada muka 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*. Mesin EPB dapat digunakan untuk menggali tanah lanau lunak dan lempung lunak, namun mesin ini tidak dapat menggali tanah dengan viskositas rendah. Untuk menyesuaikan kondisi tersebut sehingga penggalian dapat dilaksanakan. Mesin EPB harus dilengkapi dengan sistem injeksi cairan untuk merubah hasil galian menjadi lumpur yang plastis dapat mengalir. Sistem ini menginjeksikan campuran air, bentonit, dan *foam* ke dalam *cutter chamber*. Hasil galian dan cairan injeksi bercampur secara mekanis menjadi lumpur di dalam *cutter chamber* dengan menggunakan *cutter face* yang berotasi.



Gambar 2.7 EPB shield machine

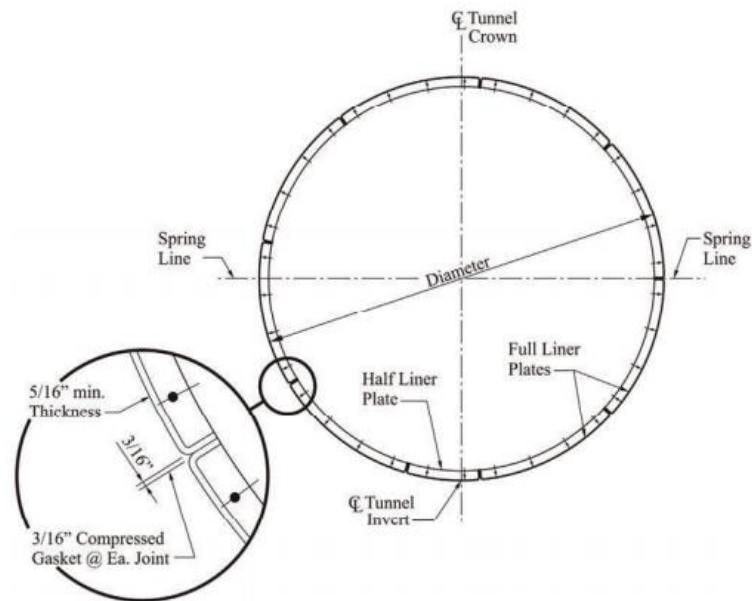
2.4 Lining Terowongan

Menurut Kolymbas (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.

Dalam pemasangannya, *lining* dipisah menjadi beberapa bagian beton pra-cetak yang disebut segmen, untuk memudahkan transportasinya. Segmen dipasang satu per satu menggunakan *bolt* pada *radial joint* dan *circumferential joint*. Pada umumnya *lining* pada terowongan memiliki tiga titik acuan.

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

Penampang *lining* terowongan dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 *Lining* Terowongan

2.5 Fondasi tiang-rakit

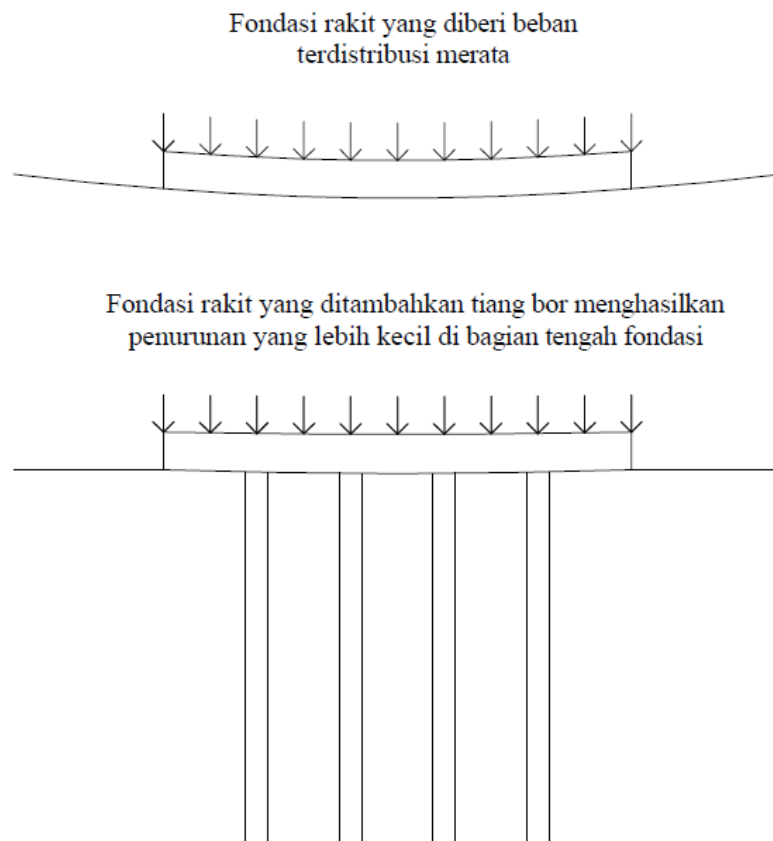
Menurut Suryolelono (2004) fondasi adalah struktur yang terletak di bawah muka tanah (tidak dapat dinyatakan secara visual) yang berfungsi sebagai perantara untuk meneruskan beban struktur yang berada di atas muka tanah dan gaya-gaya lain yang bekerja, menuju tanah pendukung bangunan tersebut. Fondasi tiang rakit merupakan sebuah bentuk pengembangan desain dari fondasi rakit. Ilustrasi perbedaan dari fondasi rakit dengan fondasi tiang-rakit dapat dilihat pada Gambar 2.9. Fondasi rakit sendiri pada umumnya dijadikan alternatif pada beberapa kasus seperti :

1. Pergerakan dan distribusi beban (vertikal, horizontal, *uplift*) antara satu bagian tanah dengan bagian tanah lainnya sangat berbeda sehingga sangat mungkin terjadi penurunan yang tidak seragam pada keseluruhan area. Dalam hal ini, kontinuitas struktur dan kuat lentur dari fondasi rakit dapat meminimalisir penurunan tidak seragam yang terjadi.
2. Bagian dasar struktur (*basement*) terendam di bawah muka air tanah sehingga dibutuhkan sebuah penghalang yang bersifat kedap air. Fondasi

rakit merupakan sebuah struktur yang bersifat monolit, sehingga air akan sulit merembes ke dalam struktur. Berat sendiri fondasi rakit juga dapat menahan gaya *uplift* akibat gaya hidrostatis dari air tanah.

Menurut Poulos (2000) kondisi tanah yang sesuai dengan penggunaan fondasi tiang-rakit adalah sebagai berikut:

1. Lapisan tanah yang terdiri dari lempung keras/kaku
2. Lapisan tanah yang terdiri dari pasir padat
3. Tanah berlapis di mana di bawah tanah pendukung fondasi tiang tidak ada lapisan tanah lunak.

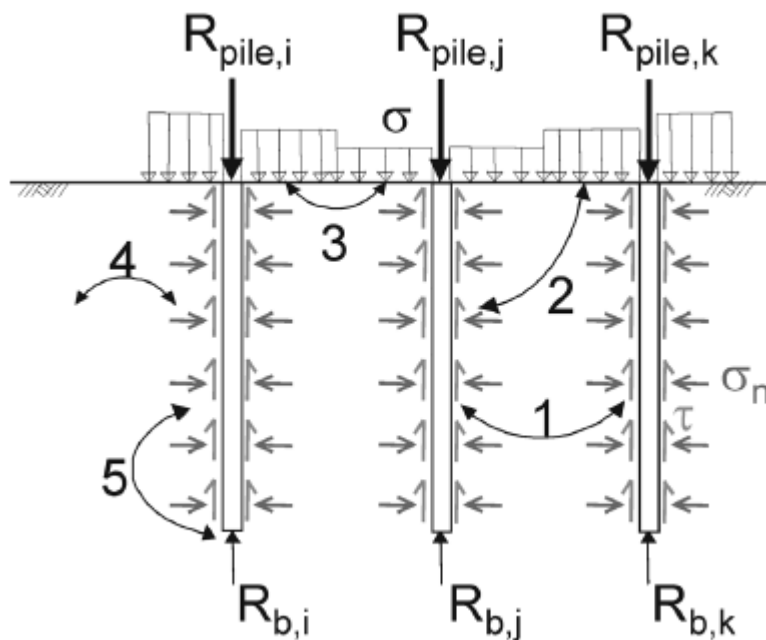


Gambar 2.9 Ilustrasi penurunan yang terjadi pada fondasi tiang-rakit

Fondasi rakit mendistribusikan beban total dari struktur ($Stot$) sebagai tegangan kontak, yang direpresentasikan oleh R_{rakit} . Pada fondasi tiang-rakit, terdapat sejumlah tiang yang menerima distribusi beban tersebut melalui jumlah tahanan

tiang yang berada di dalam lapisan tanah. Tahanan total dari fondasi tiang-rakit dapat digambarkan secara matematis dalam persamaan (2.1). Gambar 2.10 menunjukkan interaksi antara tiang dengan tiang (1), interaksi tiang dengan rakit (2), interaksi rakit dengan rakit (3), interaksi tiang dengan tanah (4), dan interaksi dasar tiang dengan sisi tiang (5).

$$R_{tot} = R_{rakit} + \sum_{i=1}^n R_{tiang,i} \geq S_{tot} \quad (2.1)$$

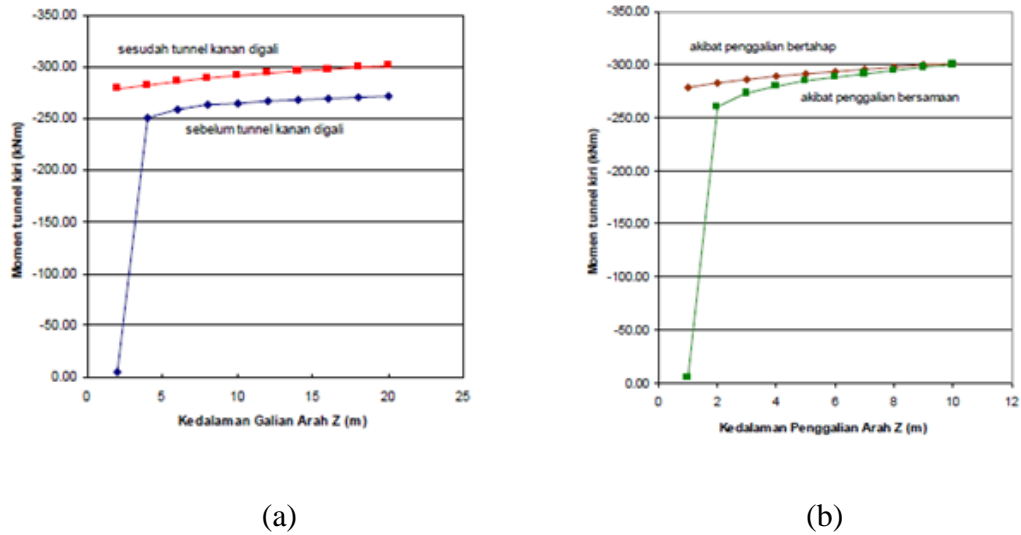


Gambar 2.10 Interaksi fondasi tiang-rakit dengan tanah

2.6 Penelitian Sejenis

Kriswanto dan Ardiyansyah (2008) melakukan studi yang membandingkan perbedaan tahapan penggalian terowongan. Perbandingan dilakukan dengan melakukan analisis konstruksi bertahap pada terowongan kembar dengan menggunakan program PLAXIS 3D. Analisis pertama dengan melakukan penggalian pada salah satu terowongan dan diikuti dengan penggalian terowongan berikutnya. Analisis kedua dengan melakukan penggalian dua terowongan bersamaan. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa terdapat perbedaan

nilai *bending moment* pada *lining* terowongan akibat perbedaan tahapan penggalian terowongan.



Gambar 2.11 Perbandingan momen lentur terowongan konstruksi bertahap

Momen pada terowongan kiri akibat pada saat pembangunan terowongan kanan ditunjukkan oleh garis biru pada Gambar 2.11.a, dan momen pada terowongan kiri pada saat pembangunan terowongan kanan (dilakukan setelah terowongan kanan selesai digali) ditunjukkan oleh garis merah pada Gambar 2.11.a. Besar momen untuk konstruksi yang dilakukan secara bertahap ditunjukkan oleh garis coklat pada Gambar 2.11.b, sedangkan besar momen untuk konstruksi secara bersamaan ditunjukkan oleh garis hijau pada Gambar 2.11.b.

BAB 3

LANDASAN TEORI

3.1 Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb

Mohr (1910) mencetuskan sebuah teori yang menyatakan bahwa kondisi keruntuhan suatu bahan terjadi oleh akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser. Hubungan fungsi antara tegangan normal dan tegangan geser pada bidang runtuhnya dinyatakan oleh persamaan (3.1).

$$\tau = f(\sigma) \tag{3.1}$$

dengan,

τ = tegangan geser pada saat terjadinya keruntuhan atau kegagalan (*failure*)

σ = tegangan normal pada saat terjadinya keruntuhan atau kegagalan (*failure*)

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 $f(\sigma)$ pada Persamaan (3.2).

$$\tau = c + \sigma(\tan \varphi) \tag{3.2}$$

dengan,

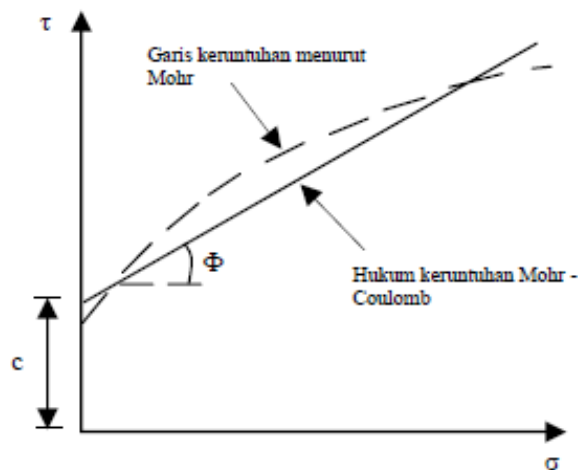
τ = kuat geser tanah (kN/m²)

c = kohesi tanah (kN/m²)

φ = sudut gesek tanah (°)

σ = tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m²)

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 linear nyata menggambarkan garis keruntuhan Mohr-Coulomb yang merupakan bentuk pendekatan dari garis keruntuhan Mohr.



Gambar 3.1 Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb

3.2 Metode Elemen Hingga

Dalam melakukan analisis struktur terowongan, terdapat berbagai metode yang dapat digunakan, untuk memperhitungkan distribusi tegangan tanah, dan deformasi tanah akibat penggalian terowongan.

Salah satu metode yang cukup lazim digunakan adalah metode elemen hingga. Apabila terdapat suatu sistem yang dikenai gaya luar, maka gaya luar tersebut akan diserap oleh sistem tersebut dan akan menimbulkan gaya dalam dan perpindahan. Untuk mengetahui besarnya gaya dalam dan perpindahan akibat gaya luar tersebut, diperlukan suatu bentuk persamaan matriks yang ditunjukkan oleh Persamaan (3.3).

$$[K]\{D\} = \{R\} \tag{3.3}$$

dengan,

$[K]$ = matriks kekakuan global

$\{D\}$ = matriks perpindahan global

$\{R\}$ = matriks gaya global

Dalam pembentukan persamaan, terdapat beberapa kondisi yang harus dipenuhi sebagai berikut:

1. Kesetimbangan, yaitu kesetimbangan gaya-gaya yang bekerja pada setiap elemen dan keseluruhan material
2. Kompatibilitas, berkaitan dengan geometri dari material (hubungan perpindahan-regangan)
3. Persamaan konstitutif dari material, mengenai hubungan tegangan-regangan yang merupakan karakteristik dari material

3.3 Persamaan Konstitutif

Persamaan konstitutif tidaklah sama untuk semua material, persamaan tersebut menggambarkan komponen tegangan-regangan di setiap titik pada keseluruhan sistem. Persamaan konstitutif harus didekati oleh fungsi sederhana maupun yang cukup rumit tergantung dari material yang digunakan.

Persamaan konstitutif ditentukan dengan percobaan dan mungkin merupakan suatu fungsi dari besaran fisik yang terukur selain tegangan dan regangan seperti suhu dan waktu, atau parameter internal pada hubungan tegangan-regangan dari suatu material, diantaranya adalah sejarah tegangan-regangan, atau sejarah kejadian mekanis yang terjadi mengenai material tersebut.

3.3.1 Material Elastik Linear

Hubungan tegangan-regangan dalam suatu material yang linear dikenal dengan hukum Hooke. Menurut Hooke, satuan perpanjangan elemen dalam batas proporsionalnya diberikan oleh Persamaan (3.4).

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} \quad (3.4)$$

Dengan,

E = modulus elastisitas material.

Perpanjangan elemen dalam arah sumbu x diikuti dengan komponen melintang

$$\varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E_x} \quad (3.5)$$

Dengan, ν adalah *Poisson's ratio*.

Untuk bahan yang isotropik (modulus elastisitas bahan dalam segala arah sama besar), diperoleh persamaan regangan normal seperti pada persamaan (3.6), hingga persamaan (3.8).

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (3.8)$$

Untuk kondisi regangan geser akibat tegangan geser ditunjukkan pada persamaan (3.9), hingga persamaan (3.12).

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (3.9)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad (3.10)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad (3.11)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.12)$$

Sehingga persamaan matriks $\varepsilon = C\sigma$ diatas menjadi seperti pada persamaan (3.13)

$$C = \frac{1}{E} = \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1 + \nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1 + \nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1 + \nu) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Dengan meng-invers persamaan (3.13) akan diperoleh persamaan (3.15).

$$\sigma = K\varepsilon \quad (3.14)$$

$$K = C^{-1} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.3.2 Plane Strain

Pada umumnya, analisis struktur geoteknik seperti terowongan, galian dan sebagainya, dilakukan dengan menyederhanakan struktur tersebut. Analisis tersebut dilakukan dengan menggunakan suatu penampang seragam dan menganalisisnya secara dua dimensi (2D). Regangan tegak lurus penampang diasumsikan nol. Kondisi ini dinamakan *plane strain* dan secara matematis dapat dituliskan dengan $\varepsilon_z = \gamma_{yz} = \gamma_{xy} = 0$. Hubungan tegangan-regangan $\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\}$ untuk kondisi *plane strain* dan isotropik disederhanakan pada persamaan (3.16).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.16)$$

σ_z diperoleh dari persamaan (3.17).

$$\varepsilon_z = 0 = \frac{\sigma_z + \nu\sigma_y + \nu\sigma_x}{E} \quad (3.17)$$

3.3.3 Plane Stress

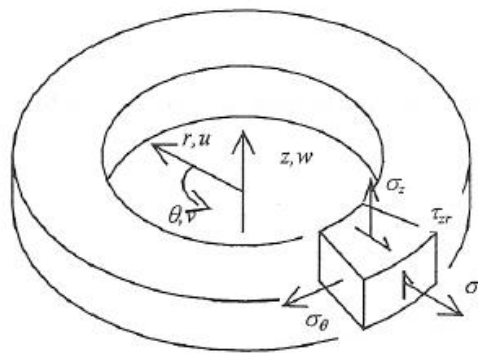
Kondisi *plane stress* merupakan kondisi dimana tegangan pada salah satu sumbu bernilai nol, misalnya sumbu z. Secara matematis dituliskan $\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{xy} = 0$. Kondisi ini umum terjadi pada suatu pelat atau cangkang yang tipis.

Hubungan tegangan-regangan $\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\}$ untuk kondisi *plane stress* dan isotropik disederhanakan pada Persamaan (3.18).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.18)$$

3.3.4 Axially Symmetric Solids (Axisymmetric)

Kondisi *axisymmetric* didapatkan dengan rotasi bidang dua dimensi pada salah satu sumbu. Koordinat yang digunakan adalah r , Φ , dan z . Kondisi ini umum terjadi pada uji triaksial atau pada struktur berbentuk silinder.



Gambar 3.2 Pendekatan sifat material dengan *Axially Symmetric Solids*

Hubungan tegangan-regangan $\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\}$ untuk kondisi *axisymmetric* dan isotropik ditunjukkan pada persamaan (3.19).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.19)$$

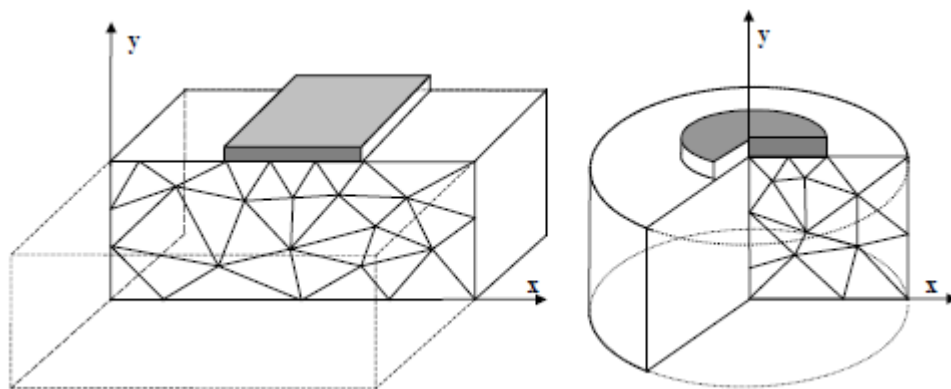
3.4 PLAXIS 8.6

PLAXIS 8.6 adalah program komputer berdasarkan metode elemen hingga dua-dimensi yang digunakan secara khusus untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas berbagai aplikasi dalam bidang 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. Dibawah ini akan diberikan penjelasan singkat mengenai karakteristik program PLAXIS 8.6 secara umum.

3.4.1 Model Geometri

Pembuatan sebuah model elemen hingga dimulai dengan pembuatan geometri dari model, yang merupakan representasi dari masalah yang ingin dianalisis. Sebuah model geometri terdiri dari titik-titik, garis-garis, dan klaster-klaster. Titik dan garis dimasukkan oleh pengguna, sedangkan klaster dibentuk oleh program. Selain komponen-komponen dasar tersebut, obyek-obyek struktural atau kondisi khusus dapat diterapkan pada model geometri untuk memodelkan dinding terowongan, dinding, pelat, interaksi tanah-struktur dan pembebanan. Dalam PLAXIS 8.6 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 3.3 Regangan bidang dan axi-Simetri

3.4.2 Beban dan kondisi batas

Sebelum model dianalisis, nilai beban harus dimasukkan terlebih dahulu, dan kondisi batas juga harus diterapkan ke dalam model material. Berbagai macam kondisi batas antara lain, jenis perletakan (rol, sendi, jepit, maupun tidak terkekang), perpindahan tertentu, jepit rotasi, dan sebagainya.

3.4.3 Karakteristik Material

Sifat-sifat material dan parameter dari model untuk klaster tanah dimasukkan dalam kumpulan data material. Sifat-sifat material dari elemen antar muka akan selalu berhubungan dengan sifat-sifat tanah dan dimasukkan dalam kumpulan data yang sama dengan sifat-sifat tanah. Sebuah kumpulan data untuk tanah dan antarmuka secara umum menggambarkan suatu lapisan tanah tertentu dan dapat diterapkan pada klaster-klaster yang berkaitan dalam model geometri.

The image shows a software dialog box titled "Mohr-Coulomb - Pelajaran1 - Pasir". It has three tabs: "Umum", "Parameter", and "Antarmuka". The "Umum" tab is selected. The dialog is divided into several sections:

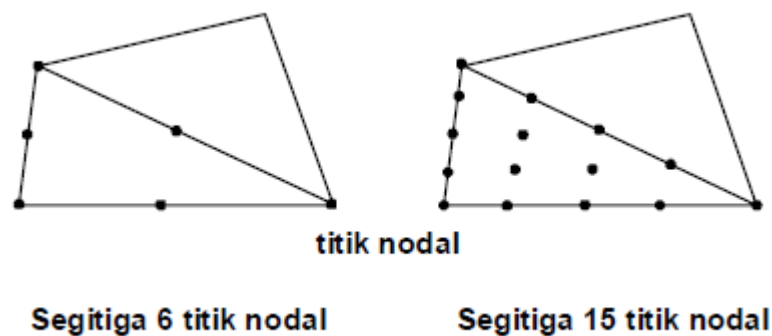
- Kumpulan material:** Includes a text field for "Identifikasi" (Pelajaran1 - Pasir), a dropdown for "Model material" (Mohr-Coulomb), and a dropdown for "Jenis material" (Terdranase).
- Sifat umum:** Includes two numerical input fields: γ_{unsat} (17.000 kN/m³) and γ_{sat} (20.000 kN/m³).
- Permeabilitas:** Includes two numerical input fields: k_x (1.000 m/hari) and k_y (1.000 m/hari). A "Tingkat lanjut..." button is located below these fields.
- Komentar:** A large empty text area for notes.

At the bottom of the dialog, there are three buttons: "Berikutnya", "OK", and "Batal".

Gambar 3.4 Lembar tab parameter material

3.4.4 Penyusunan Jaring Elemen

Setelah model geometri didefinisikan secara lengkap dan sifat material telah diaplikasikan ke seluruh klaster 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. 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 3.5 Jaring elemen

3.4.5 Kondisi Awal

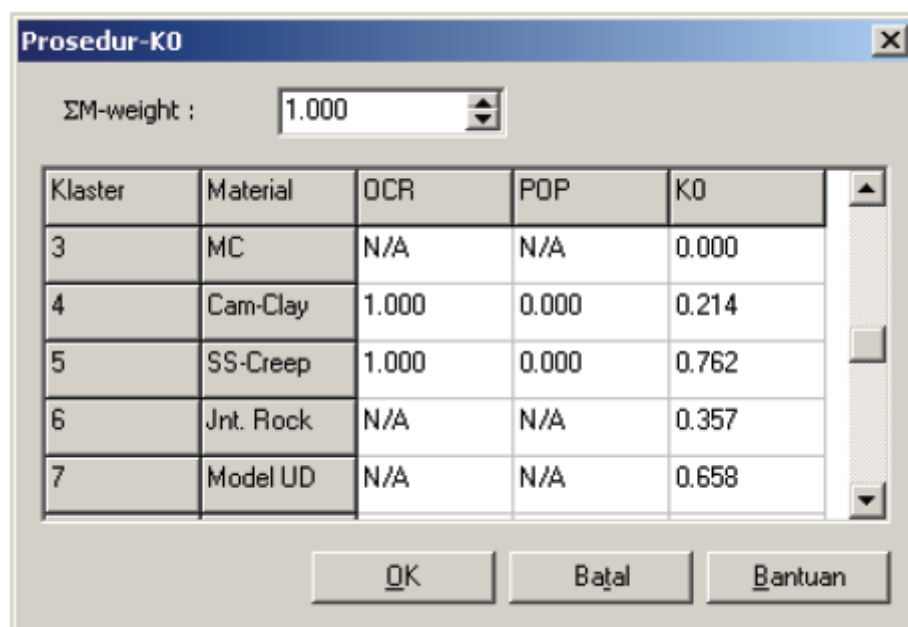
Setelah model geometri terbentuk dan jaring elemen hingga telah selesai disusun, maka kondisi tegangan awal dan konfigurasi awal harus ditentukan terlebih dahulu. Hal ini dapat dilakukan dalam modus penentuan kondisi awal dari masukan program. Kondisi awal terdiri dari dua buah modus, yaitu, sebuah modus untuk menghitung tekanan air (modus tekanan air) dan sebuah modus untuk spesifikasi dari konfigurasi geometri awal serta perhitungan tegangan efektif awal di lapangan (modus konfigurasi geometri).

3.4.6 Prosedur K₀

Tegangan awal dalam massa tanah dipengaruhi oleh berat material dan sejarah pembentukannya. Kondisi tegangan ini umumnya dinyatakan oleh tegangan vertikal efektif awal (σ_{v0}). Tegangan horizontal efektif awal (σ_{h0}) dihubungkan dengan tegangan vertikal efektif awal oleh K₀ pada persamaan (3.20).

$$\sigma_{h0} = K_0 \sigma_{v0} \quad (3.20)$$

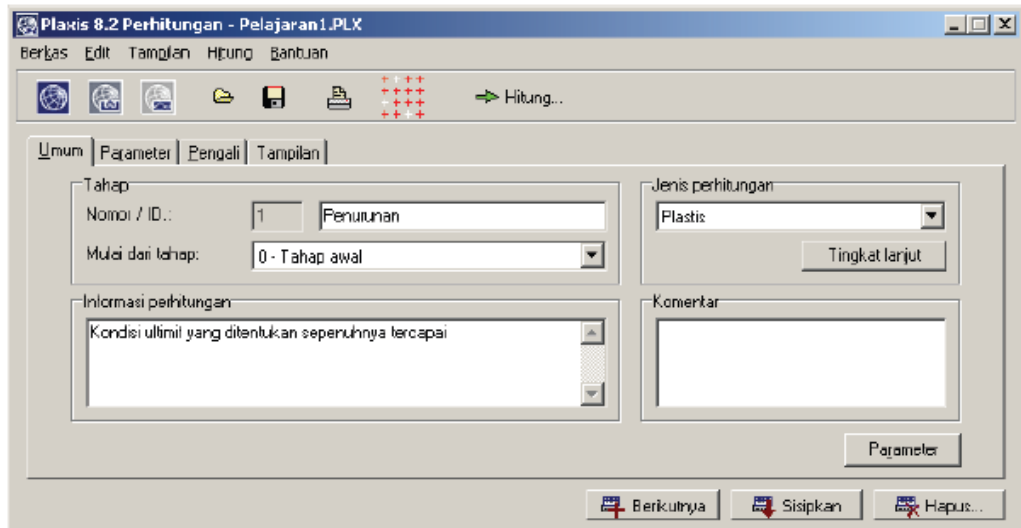
Tegangan awal dalam PLAXIS 8.6 dapat dibentuk dengan memasukkan nilai K₀ atau dengan menggunakan beban gravitasi.



Gambar 3.6 Nilai K₀

3.4.7 Perhitungan dan Hasil Keluaran

Setelah penyusunan model elemen hingga selesai dibuat, perhitungan elemen hingga yang sesungguhnya dapat dilakukan. Karena itu perlu untuk mendefinisikan jenis perhitungan yang akan dilakukan, dan jenis pembebanan atau tahapan konstruksi mana saja yang akan diaktifkan dalam perhitungan. Setelah perhitungan selesai, program akan menampilkan hasil perhitungan berupa tegangan, deformasi, gaya-gaya dalam, dan lainnya.



Gambar 3.7 Lembar tab perhitungan

3.5 Model Material

Model material merupakan suatu persamaan matematis yang menyatakan hubungan antara tegangan dan regangan dari suatu material. PLAXIS 8.6 menyediakan berbagai model konstitutif untuk memodelkan perilaku dari tanah ataupun material lainnya, namun dalam tugas akhir ini hanya model Mohr-Coulomb yang digunakan. Berikut penjelasan mengenai model Mohr-Coulomb yang tersedia pada PLAXIS 8.6.

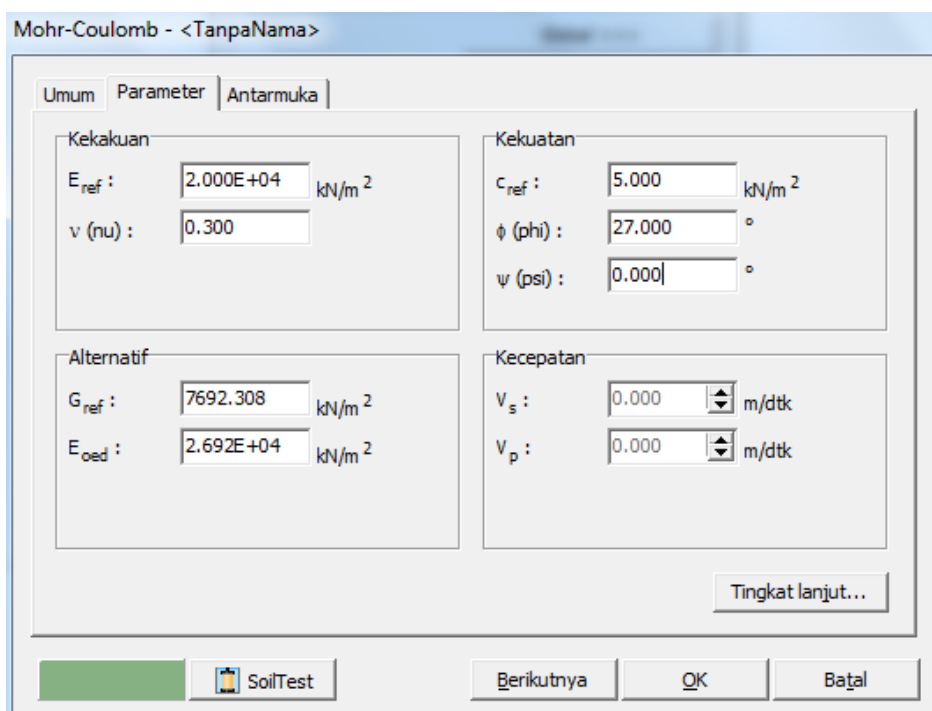
3.5.1 Model Mohr-Coulomb

Model Mohr-Coulomb adalah model elastis-plastis yang terdiri dari lima buah parameter, yaitu E dan ν untuk memodelkan kekakuan tanah, ϕ dan c untuk memodelkan daya dukung tanah, dan ψ sebagai sudut dilatansi. Model ini sangat umum digunakan untuk pendekatan awal terhadap perilaku tanah.

3.5.2 Parameter Dasar Model Mohr-Coulomb

Model Mohr-Coulomb membutuhkan total lima buah parameter, yang umum digunakan oleh para praktisi geoteknik dan dapat diperoleh dari uji-uji yang umum dilaksanakan di laboratorium. Parameter-parameter tersebut bersama dimensi dasarnya adalah sebagai berikut :

E_{ref}	:	Modulus Young	(kN/m ²)
ν	:	Angka Poisson's	(-)
φ	:	Sudut Geser	(°)
c_{ref}	:	Kohesi	(kN/m ²)
ψ	:	Sudut Dilatasi	(°)

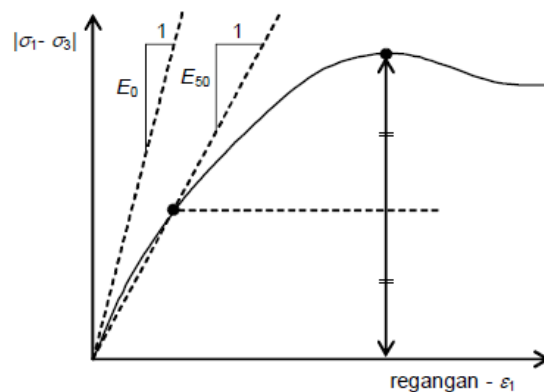


Gambar 3.8 Lembar tab parameter untuk model Mohr-Coulomb

1. Modulus Young (E)

PLAXIS menggunakan modulus Young sebagai modulus kekakuan dasar dalam model elastis dan model Mohr-Coulomb, tetapi beberapa modulus alternatif juga ditampilkan. Nilai dari parameter kekakuan yang digunakan dalam suatu perhitungan memerlukan perhatian khusus karena pada umumnya material tanah menunjukkan perilaku yang non-linear dari awal pembebanan. 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} .



Gambar 3.9 E_0 dan E_{50} untuk hasil uji Triaksial terdrainase standar

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.

2. Angka Poisson (ν)

Uji triaksial terdrainase dapat menghasilkan perubahan volume yang signifikan pada awal pemberian beban aksial, yang menghasilkan konsekuensi berupa angka Poisson awal (ν_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

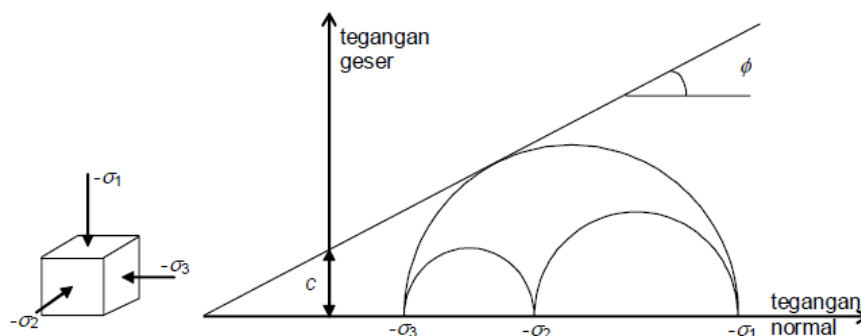
menghasilkan nilai K_0 yang realistis. Hubungan K_0 dan angka Poisson ditunjukkan pada persamaan (3.21).

$$v = \frac{K_0}{(1 + K_0)} \quad (3.21)$$

Dalam banyak kasus akan diperoleh nilai v yang berkisar antara 0.3 dan 0.4. Umumnya nilai tersebut tidak hanya digunakan pada kompresi satu dimensi, tetapi juga dapat digunakan untuk kondisi pembebanan lainnya. Namun untuk kasus pengurangan beban, lebih umum digunakan nilai 0.15 dan 0.25.

3. Sudut gesek tanah (ϕ)

Nilai sudut gesek tanah, ϕ , dimasukkan dalam dimensi derajat. Sudut gesek tanah adalah parameter yang menentukan kuat geser dari tanah. Sudut gesek 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 gesek tanah yang tinggi sebaiknya dihindari saat melakukan perhitungan awal untuk suatu proyek tertentu. Waktu komputasi cenderung menjadi semakin panjang untuk penggunaan sudut gesek tanah yang lebih besar dari 35 derajat.



Gambar 3.10 Sudut gesek tanah

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 yang belum berpengalaman disarankan untuk memasukkan nilai yang kecil untuk kohesi ($c > 0.2 \text{ kN/m}^2$).

5. Sudut Dilatasi (ψ)

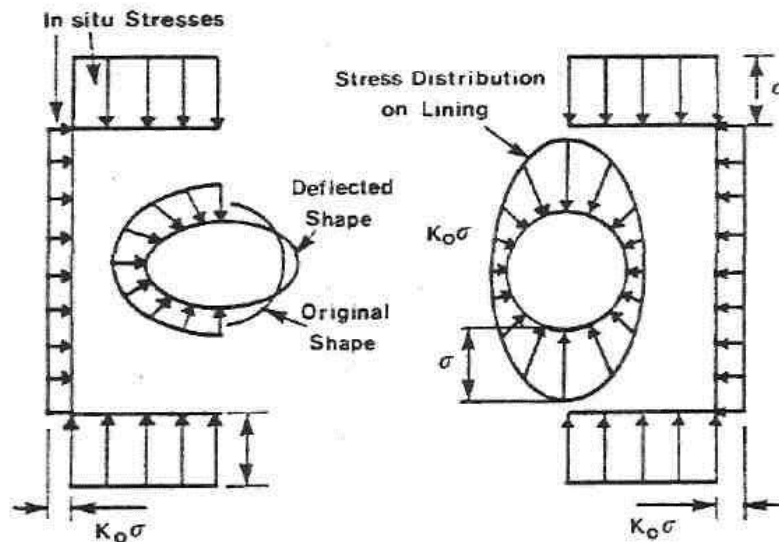
Sudut dilatasi, ψ , dinyatakan dalam derajat. Selain tanah lempung yang terkonsolidasi sangat berlebih, tanah lempung cenderung tidak menunjukkan dilatasi sama sekali ($\psi = 0$). Dilatasi dari tanah pasir bergantung pada kepadatan serta sudut gesernya. Untuk pasir kwarsa besarnya dilatasi kurang lebih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

3.6 Perilaku Teknis dari Terowongan Bor

3.6.1 Distribusi Tegangan di sekitar Terowongan

Perilaku *lining* dari terowongan dapat diibaratkan seperti balon udara yang diberi beban dengan nilai tertentu, dimana akibat pembebanan tersebut 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*.



Gambar 3.11 Distribusi tegangan dan pola deformasi *flexible lining* dan *rigid lining*

3.6.2 Momen Inersia Efektif *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 (3.22)

$$I_e = I_j + I_s \left(\frac{4}{n} \right)^2 \quad (3.22)$$

Dengan,

I_e = momen inersia efektif (kN/m⁴)

I_j = momen inersia pada *lining joint* (kN/m⁴) (diasumsikan nol)

I_s = momen inersia awal (kN/m⁴)

n = jumlah segmen (diluar segmen *key*)

3.6.3 Pengaruh Muka Air Tanah

Air tanah memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap beban yang diterima oleh terowongan. Hal ini disebabkan air tidak mengalami reduksi tegangan seperti halnya tegangan *overburden*, namun adanya air tanah dapat mengurangi tegangan efektif akibat gaya apung. Persamaan (3.23) dan (3.24) menunjukkan nilai tegangan vertikal dan lateral pada titik tertentu akibat pengaruh air tanah, sedangkan persamaan (3.25) dan (3.26) menunjukkan nilai tegangan vertikal dan lateral pada titik tertentu tanpa pengaruh air tanah.

$$\sigma_v = (\gamma_{tanah} - \gamma_{air})h + \gamma_{air}(h) \quad (3.23)$$

$$\sigma_h = K_0(\gamma_{tanah} - \gamma_{air}) + \gamma_{air}(h) \quad (3.24)$$

$$\sigma_v = \gamma_{tanah}(h) \quad (3.25)$$

$$\sigma_h = K_0(\gamma_{tanah}) \times h \quad (3.26)$$

$$K_0 \leq 1$$

3.6.4 Stabilitas Terowongan

1. Broms dan Bennemark (1967)

Salah satu faktor yang penting untuk dipertimbangkan dalam penggalian terowongan adalah mempertahankan stabilitas lapisan tanah pada muka *shield machine* agar tidak runtuh. Memastikan stabilitas tersebut sangat berkaitan dengan keamanan pekerjaan penggalian terowongan. Broms dan Bennemark memberikan solusi persamaan untuk menentukan angka stabilitas *tunnel face* saat penggalian dilaksanakan pada persamaan (3.27).

$$N = \frac{(q_s + (C + R)\gamma - \sigma_T)}{C_u} \quad (3.27)$$

Dengan,

q_s = beban permukaan tanah (kN/m²)

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

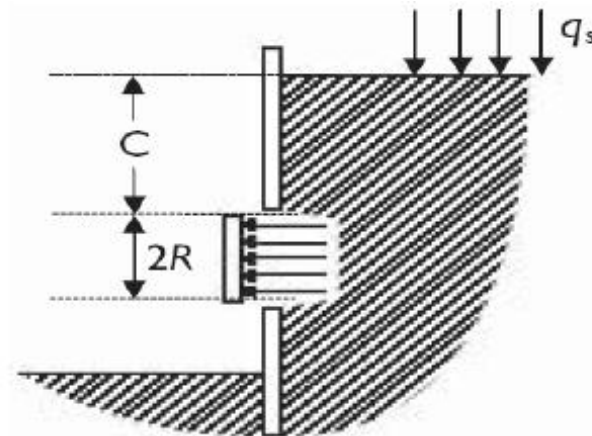
R = jari-jari terowongan (m)

γ = berat jenis tanah total (kN/m^3)

σ_T = *face pressure* (kN/m^2), dan

c_u = kuat geser tanah dalam kondisi *undrained* (kN/m^2).

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



Gambar 3.12 Pendekatan stabilitas terowongan Broms dan Bennemark (1967)

2. Davis et. al (1980)

Persamaan Broms dan Bennemark digunakan pada kasus terowongan dengan bukaan vertikal tanpa adanya *support pressure* untuk meningkatkan stabilitas *tunnel face*. Davis et. al. mengembangkan persamaan Broms dan Bennemark pada persamaan (3.28) mengenai stabilitas *tunnel face* dengan memperhitungkan adanya *support* pada jarak P antara *face* dengan lokasi dimana *support pressure* diaplikasikan.

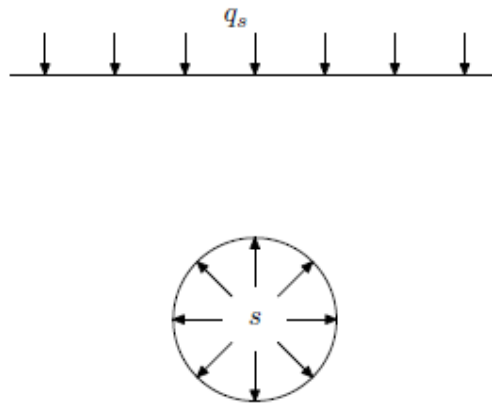
$$N = \frac{(q_s - s + (C + R)\gamma - \sigma_T)}{c_u} \quad (3.28)$$

dengan,

$s = \text{support pressure (kN/m}^2\text{)}$

Davis et. Al juga memberikan nilai N dengan menggunakan pendekatan radial (*spherical*) terhadap pola tegangan pada *tunnel face* pada persamaan (3.29).

$$N = 4 \ln \left(\frac{C}{R} + 1 \right) \quad (3.29)$$



Gambar 3.13 Pendekatan stabilitas terowongan Davis et al. (1980)

3.6.5 Penurunan maksimum pada rakit

Skempton dan MacDonald (1956) menyarankan batas penurunan maksimum serta batas beda penurunan maksimum pada struktur fondasi bangunan.

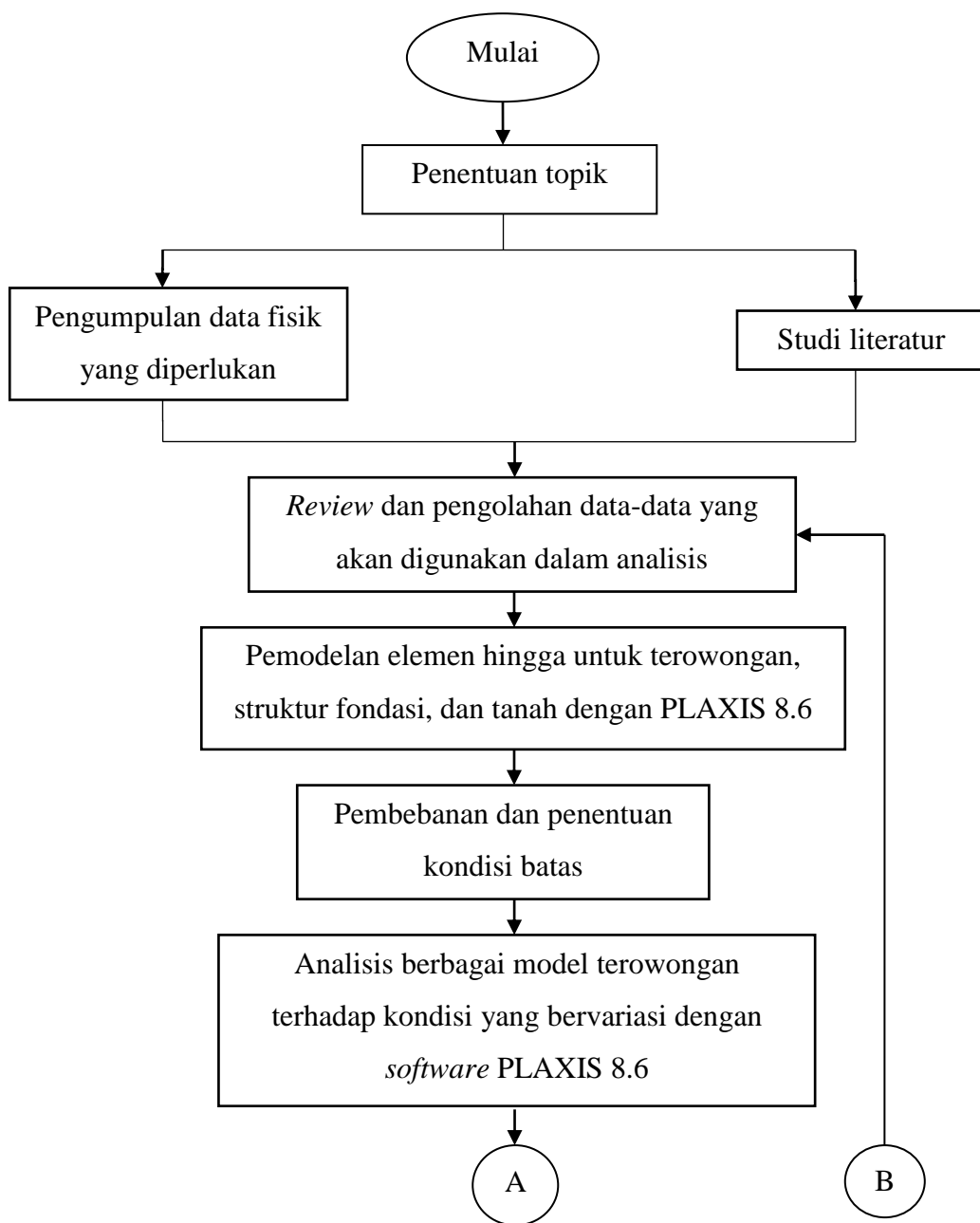
Tabel 3.1 Penurunan maksimum yang diijinkan oleh Skempton dan MacDonald (1965)

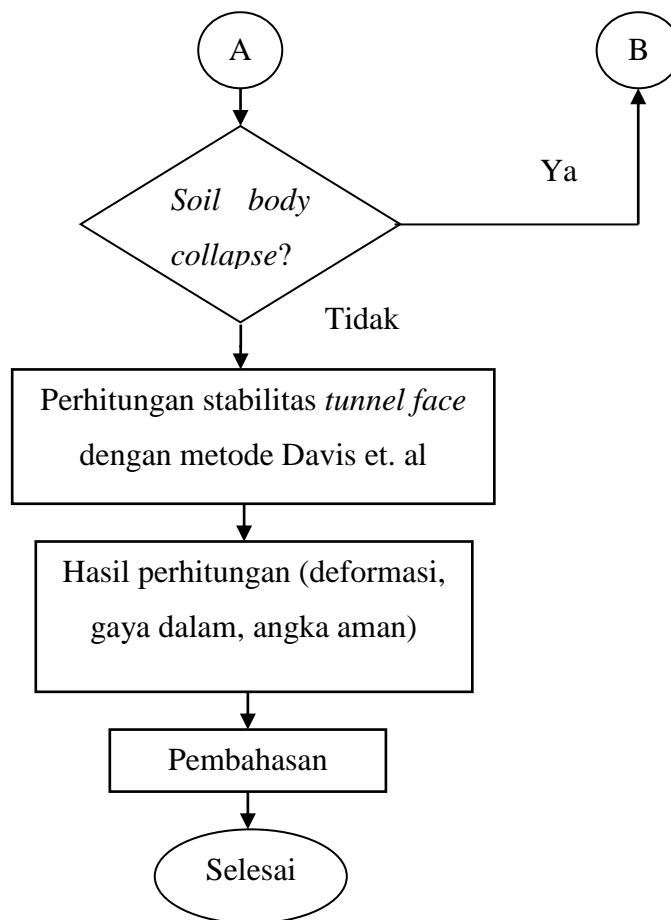
<i>Maximum Settlement, S_T Max</i>	
<i>In Sand</i>	32 mm
<i>In Clay</i>	45 mm
<i>Maximum Differential Settlement, ΔS_T Max</i>	
<i>Isolated Foundation in Clay</i>	51 mm
<i>Isolated Foundation in Sand</i>	76 mm
<i>Raft in Clay</i>	51-76 mm
<i>Raft in Sand</i>	76-127 mm

BAB 4 METODE PENELITIAN

4.1 Prosedur Penelitian

Dalam analisis perilaku terowongan bor MRT Jakarta ini dilakukan pemodelan dan analisis struktur dengan bantuan *software* PLAXIS 8.6. Tahapan dalam analisis tersebut ditampilkan dalam Gambar 4.1





Gambar 4.1 Bagan alir penelitian

4.2 Data Penelitian

Penelitian untuk studi perilaku terowongan bor ini menggunakan data terowongan bor MRT Jakarta yang didapat dari pihak SOWJ-JV (Shimizu-Obayashi-WIKA-Jaya Kosntruksi Joint Venture) melalui program *internship* pada tanggal 18 Januari 2016 hingga 27 Februari 2016.

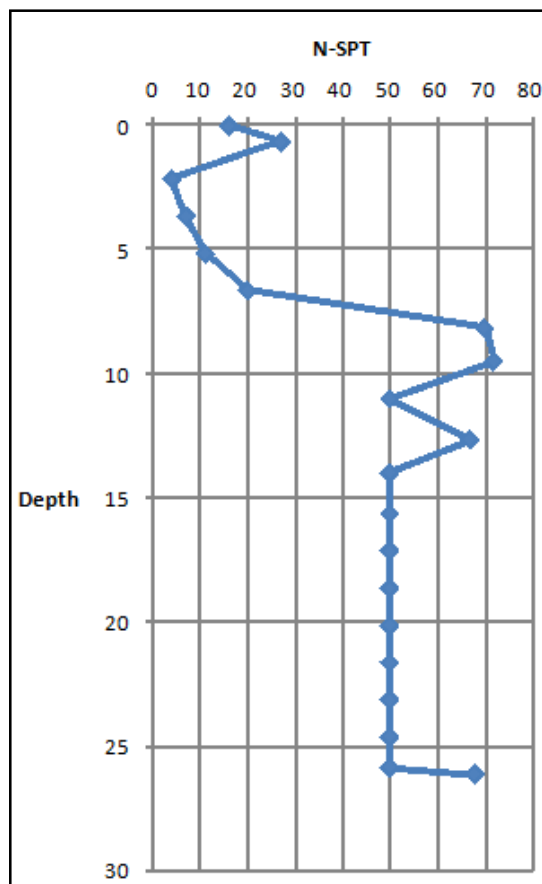
4.2.1 Data interpretasi geoteknik

Data interpretasi geoteknik adalah data yang memuat informasi mengenai *index* dan *engineering properties* dari lapisan tanah di sekitar konstruksi terowongan. Data ini digunakan dalam membuat model elemen hingga dari lapisan tanah pada analisis. Dalam pengumpulan data interpretasi geoteknik tersebut, dilakukan berbagai macam pengujian yang terbagi atas dua garis besar, yaitu pengujian *in-situ*, dan pengujian laboratorium. Rangkaian pengujian yang dilaksanakan ditunjukkan pada Tabel 4.1.

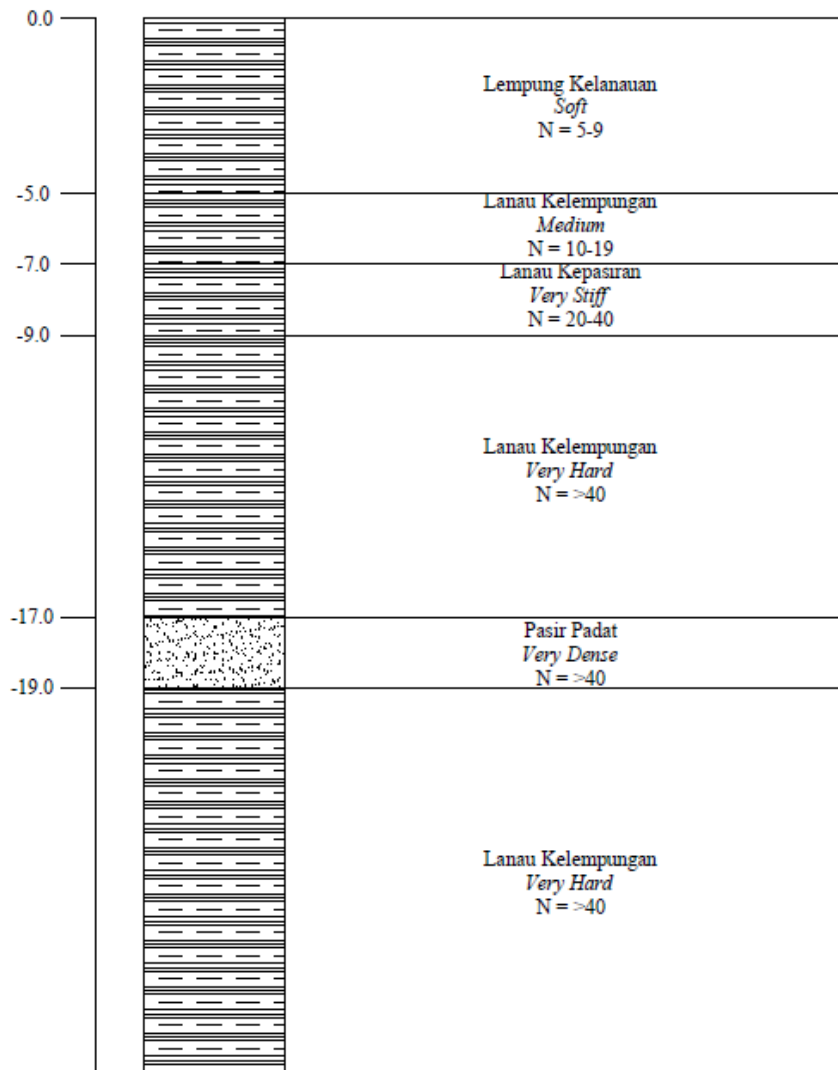
Tabel 4.1 Rangkaian Pengujian *soil properties*

Soil Classification	Soil Strength	Consolidation	Chemical Analysis
<ul style="list-style-type: none"> Moisture Content Bulk and Dry Density Particle Density Particle Size Distribution Atterberg Limits 	<ul style="list-style-type: none"> Unconsolidated Undrained Triaxial Test Unconsolidated Undrained Triaxial with PWP Consolidated Undrained Triaxial Test 	<ul style="list-style-type: none"> Oedometer 	<ul style="list-style-type: none"> pH Value (Soil) Soluble Sulphate Content (SO₃) [Soil] Soluble Chloride Content (Cl-) [Soil] Organic Content (Soil)

Soil Strength	Soil Stiffness	Permeability	Groundwater
Standard Penetration Test	Pressuremeter Test	Falling Head	Water Level Monitoring



Gambar 4.2 Nilai N-SPT pada lapisan tanah penelitian



Gambar 4.3 Jenis lapisan tanah pada setiap kedalaman *borelog*

Gambar 4.2 menunjukkan nilai N-SPT pada setiap kedalaman *borelog* yang digunakan dalam penelitian ini, dimana kondisi pelapisan tanah bervariasi berupa lapisan lanau lempung, hingga lanau pasir padat dengan $N_{SPT} \geq 50$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. Lapisan cukup keras ditemukan pada ketebalan 10 m dari permukaan tanah. Pengeboran dihentikan pada kedalaman 27.25 m dari permukaan, sehingga lapisan tanah di bawah kedalaman tersebut diasumsikan seragam.

1. Korelasi nilai N-SPT dengan Modulus Elastisitas untuk tanah non-kohesif

Beberapa metode empiris untuk menentukan korelasi nilai modulus elastisitas telah ditemukan sejak masa lampau. Kumpulan metode tersebut dirangkum oleh Mitchell dan Gardner (1975). Contoh metode empiris korelasi yang digunakan ditunjukkan oleh persamaan (4.1).

Ferrent (1963)

$$E = 718(1 - \nu^2)N \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (4.1)$$

dengan,

N = nilai N-SPT

2. Korelasi nilai N-SPT dengan Modulus Elastisitas untuk tanah kohesif

Pada tanah kohesif, CIRIA (1995) memberikan metode empiris untuk menentukan nilai E dari nilai N yang ditunjukkan oleh persamaan (4.2).

$$E = (1.0 \sim 1.2) N_{60} \quad (4.2)$$

$$N_{60} = \frac{N \mu_H \mu_B \mu_S \mu_R}{60} \quad (4.3)$$

dengan,

N_{60} = nilai N-SPT terkoreksi pada tingkat rasio energi 60%

μ_H = efisiensi alat pemukul (*hammer efficiency*) (%)

μ_B = koreksi diameter lubang bor

μ_S = koreksi tabung sampel

μ_R = koreksi panjang batang

Pengujian N-SPT dalam proyek MRT Jakarta ini menggunakan *standard sampler* yang diproduksi oleh Jepang, dengan tipe pemukul *donut* (jatuh bebas), diameter 50.8 mm, dan panjang 0.65 m.

Tabel 4.2 Efisiensi jenis alat pemukul

<i>Country</i>	<i>Hammer type</i>	<i>Hammer release</i>	μH (%)
<i>Japan</i>	<i>Donut</i>	<i>Free fall</i>	78
	<i>Donut</i>	<i>Rope and Pulley</i>	67
<i>United States</i>	<i>Safety</i>	<i>Rope and Pulley</i>	60
	<i>Donut</i>	<i>Rope and Pulley</i>	45
<i>Argentina</i>	<i>Donut</i>	<i>Rope and Pulley</i>	45
<i>China</i>	<i>Donut</i>	<i>Free fall</i>	60
	<i>Donut</i>	<i>Rope and Pulley</i>	50

Tabel 4.3 Efisiensi untuk koreksi diameter lubang bor

<i>Diameter (mm)</i>	μB
<i>60-120</i>	1
<i>150</i>	1.05
<i>200</i>	1.15

Tabel 4.4 Efisiensi untuk koreksi tabung sampel

<i>Variable</i>	μS
<i>Standard sampler</i>	1.0
<i>With liner for dense sand and clay</i>	0.8
<i>With liner for loose sand</i>	0.9

Tabel 4.5 Efisiensi untuk koreksi panjang batang

<i>Rod length (m)</i>	μR
<i>>10</i>	1.00
<i>6-10</i>	0.95
<i>4-6</i>	0.85
<i>0-4</i>	0.75

Tabel 4.6 Nilai perkiraan modulus elastisitas untuk berbagai jenis tanah

Type	Strength of soil	Elastic Modulus, E (MPa)	
		Short Term	Long Term
Gravel	Loose	25-50	
	Medium	50-100	
	Dense	100-200	
Medium to coarse sand	Very Loose	<5	
	Loose	3-10	
	Medium Dense	8-30	
	Dense	25-50	
Fine sand	Very Dense	40-100	
	Loose	5-10	
	Medium	10-25	
Silt	Dense	25-50	
	Soft	<10	<8
	Stiff	10-20	8-15
Clay	Hard	>20	>15
	Very Soft	<3	<2
	Soft	2-7	1-5
	Firm	5-12	4-8
	Stiff	10-25	7-20
	Very Stiff	20-50	15-35
	Hard	40-80	30-60

3. Korelasi koefisien tekanan tanah lateral *at-rest* dengan sudut gesek tanah

Nilai koefisien tekanan lateral *at-rest* (K_0) dapat ditentukan dengan fungsi dari sudut gesek tanah (φ) berdasarkan Jaky (1994).

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (4.4)$$

4. Korelasi nilai c_u dengan nilai N-SPT

Terzaghi dan Peck (1967) menemukan korelasi pendekatan yang cukup konsisten untuk menentukan nilai kuat geser kondisi *undrained* pada tanah lempung menggunakan nilai N-SPT.

$$c_u = 6N_{60} \quad (4.5)$$

Tabel 4.7 Detail parameter tanah dalam pemodelan PLAXIS 8.6

Parameter	Satuan	Lapis 1	Lapis 2	Lapis 3	Lapis 4	Lapis 5	Lapis 6
Kedalaman	(m)	0-5	5-7	7-9	9-17	17-19	19-60
Tebal	m	5	2	2	8	2	41
Model	-	MC	MC	MC	MC	MC	MC
Tipe Perilaku Material	-	<i>Drained</i>	<i>Drained</i>	<i>Drained</i>	<i>Drained</i>	<i>Drained</i>	<i>Drained</i>
N-SPT	-	5	15	25	45	50	45
γ_{unsat}	kN/m ³	16	16	18	18	18.5	18
γ_{sat}	kN/m ³	16	16	18	18	21.5	18
Koef. Permeabilitas Horizontal (k_x)	m/hari	0.00864	0.00864	0.00864	0.00864	0.864	0.00864
Koef. Permeabilitas Vertikal (k_y)	m/hari	0.00864	0.00864	0.00864	0.00864	0.864	0.00864
Modulus Young (E_{ref})	kN/m ²	5850	17550	29250	52650	31502	52650
Kuat geser <i>undrained</i> (c_u)	kN/m ²	29.25	87.75	146.25	263.25	0	263.25
Rasio Poisson's (ν)	-	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Kohesi (c_{ref})	kN/m ²	5	10	15	30	0	30
Sudut Gesek Dalam (ϕ)	°	28	28	32	34	37	34
Sudut Dilatasi (ψ)	°	0	0	0	0	0	0
Modulus Geser (G)	kN/m ²	2166.667	6500	10830	19500	12100	19500
Koefisien Tek. Tanah Lateral <i>at rest</i> (K_0)	-	0.531	0.531	0.470	0.441	0.398	0.441

Setelah dilakukan validasi, data-data interpretasi geoteknik tersebut dapat digunakan. Dalam analisis, parameter tanah yang diperlukan adalah berat isi tanah, koefisien permeabilitas, kohesi, sudut geser, sudut dilatasi (jika digunakan), modulus elastisitas tanah, serta angka Poisson.

4.2.2 Data Properti *Lining*

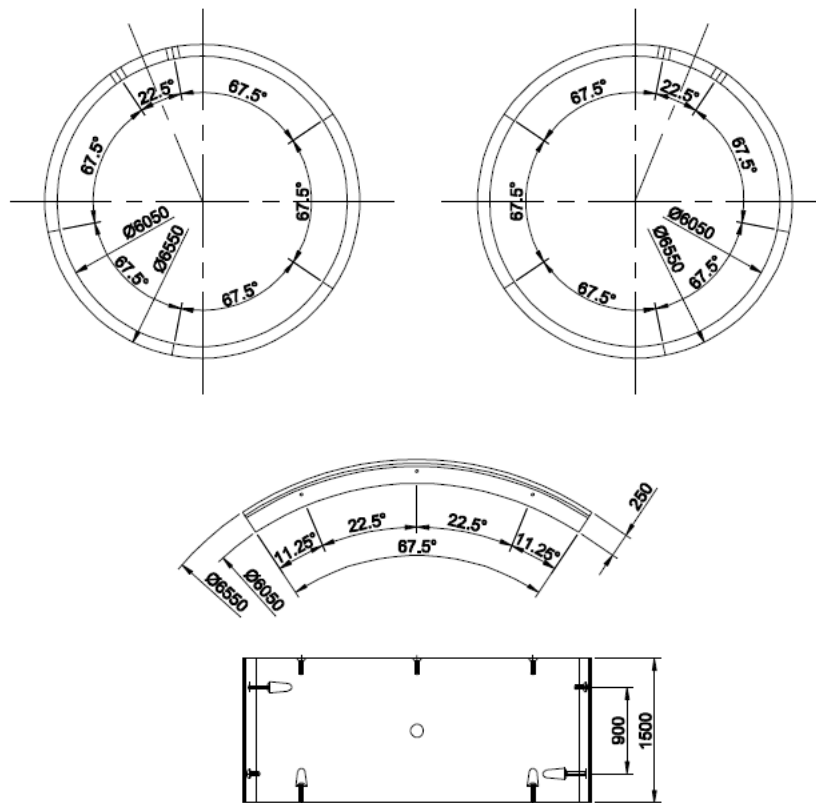
Data properti *lining* adalah data karakteristik dari *lining*, yang merupakan struktur utama dari terowongan pada penelitian ini. Data tersebut mencakup karakteristik fisik maupun geometri dari *lining*, dimana kedua karakteristik tersebut sangat dibutuhkan dalam memodelkan terowongan sehingga dapat diperoleh hasil yang akurat dan relevan. Material yang digunakan dalam konstruksi terowongan bor MRT Jakarta ini merupakan kumpulan segmen beton pra-cetak seperti pada Gambar 4.4 yang dirangkai menjadi *lining* (Gambar 4.5). Beton pra-cetak ini diproduksi oleh PT. WIKA-KOBE yang berdomisili di Karawang, Jawa Barat.

Tabel 4.8 Karakteristik *lining* terowongan

Diameter Dalam	6.05 m
Diameter Luar	6.55 m
Tebal	250 mm
Panjang	1.50 m
Konfigurasi	5 +1 <i>key</i>
Kuat Tekan Beton	$f_{cu} = 60$ MPa
Berat	18.58 ton/ <i>lining</i>
Modulus Young	32000 MPa



Gambar 4.4 Segmen *lining* pra-cetak



Gambar 4.5 Konfigurasi pemasangan segmen

4.2.3 Data properti fondasi

Data properti fondasi meliputi data kekuatan elemen tiang, rakit, dan properti betonnya. Untuk dimensi dan konfigurasi menggunakan asumsi berdasarkan kondisi pada umumnya.

1. Mutu beton komponen rakit $f_c' = 30$ Mpa
2. Mutu beton komponen tiang $f_c' = 30$ Mpa
3. Panjang fondasi rakit 38 m
4. Panjang tiang bervariasi dari 20 hingga 30 m (interval 2,5m)
5. Tebal fondasi rakit 1 m
6. Diameter tiang 120 cm
7. Jarak antar tiang 3 m

4.3 Prosedur Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk memberikan *output* yang dapat memberikan jawaban terhadap tujuan dari penelitian ini. Analisis dilakukan dengan bantuan *software* maupun metode analitis. Berikut ini penjelasan dari prosedur untuk analisis perilaku teknis dari terowongan bor di bawah fondasi tiang.

1. *Review* dan pengolahan data-data yang akan digunakan

Data sekunder yang diberikan oleh pihak SOWJ-JV perlu diselidiki validitasnya, sehingga *output* yang dihasilkan lebih akurat dan dapat diandalkan. Untuk data interpretasi geoteknik, dilakukan studi literatur mengenai korelasi antara data lapangan dengan karakteristik fisik dari material tersebut. Diperlukan juga pengolahan terhadap data-data dasar untuk disesuaikan dengan input ke dalam *software*.

2. Pemodelan lapisan tanah

Semua jenis tanah akan dimodelkan ke dalam model Mohr-Coulomb dan dianalisis dengan perilaku terdrainase. Semua tanah dimodelkan setelah geometri tanah dibuat dengan menggunakan *geometry line* yang membentuk ruang-ruang yang disebut dengan *cluster*. Dalam memodelkan tanah tersebut, diperlukan parameter-parameter, yaitu E , ν , c , dan ϕ .

3. Pemodelan Komponen Rakit dan Tiang

Pada PLAXIS 8.6, komponen rakit dan tiang akan dimodelkan menggunakan pelat (*plate*). Adapun tipe material dari komponen ini adalah elastis. Untuk memodelkan komponen rakit, diperlukan beberapa parameter, yaitu:

- a. Properti kekakuan

Properti kekakuan terkait dengan nilai kekakuan aksial (EA) dan kekakuan fleksural (EI). Pada pemodelan *plain strain*, nilai EA dan EI berkaitan dengan nilai kekakuan per satuan lebar pada arah luar bidang (*out-of-plane*). Oleh karena itu, kekakuan aksial (EA) diberikan dalam gaya per satuan lebar dan kekakuan fleksural (EI) diberikan dalam gaya dikali panjang kuadrat per satuan lebar. Nilai tebal ekuivalen pelat akan dihitung

secara otomatis. Dalam pemodelan *plane-strain*, nilai b diperhitungkan sebagai 1 meter.

$$EI = E \frac{bh^3}{12} \quad (4.6)$$

$$EA = E \times h \times b \quad (4.7)$$

$$d = h = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}} \quad (4.8)$$

$$E = 4700\sqrt{f'c'} \quad (4.9)$$

dengan,

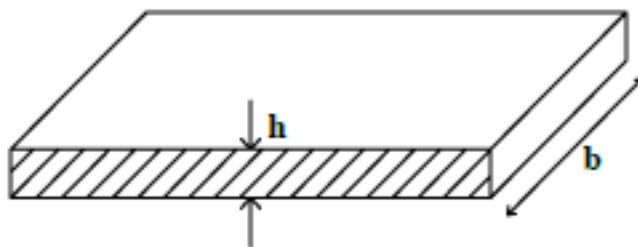
E = modulus elastisitas Young (kN/m²)

A = luas penampang (m²)

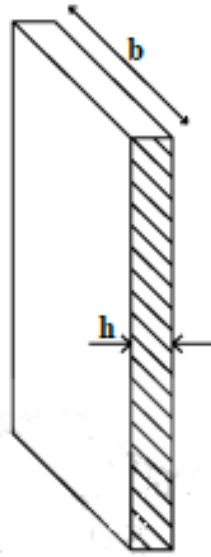
I = momen inersia (kN/m⁴)

h = tebal pelat (m)

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



Gambar 4.6 Pemodelan rakit sebagai pelat



Gambar 4.7 Pemodelan tiang sebagai pelat

Tabel 4.9 Input fondasi rakit dalam PLAXIS 8.6

EA (kN/m ² /m)	25742.96
EI (kNm ² /m)	2145.2467
v	0.2

Tabel 4.10 Input tiang dalam PLAXIS 8.6

EA (kN/m ² /m)	27518.021
EI (kNm ² /m)	2620.3142
v	0.2

b. Berat

Berat fondasi rakit ditiadakan, dengan mengasumsikan sudah termasuk pada beban merata pada permukaan fondasi rakit. Untuk menghitung berat total dari komponen tiang secara akurat, maka berat jenis material pelat yang dimasukkan harus dikurangi dengan berat jenis tanah terlebih dahulu. Hal ini disebabkan pada pemodelan, tebal pelat (h) mendekati nol. Padahal pada kenyataannya tidak demikian, sehingga terjadi *overlap* antara berat tiang dengan tanah di sekitarnya.

$$w_{tiang} = (\gamma_{beton} - \gamma_{tanah}) \times l \quad (4.10)$$

dengan,

w_{tiang} = berat tiang (kN/m/m)

l = panjang tiang (m)

Tabel 4.11 Input berat tiang dalam PLAXIS 8.6

Panjang (m)	Berat (kN/m/m)
20	119
22.5	134
25	149
27.5	164
30	179

c. Antarmuka

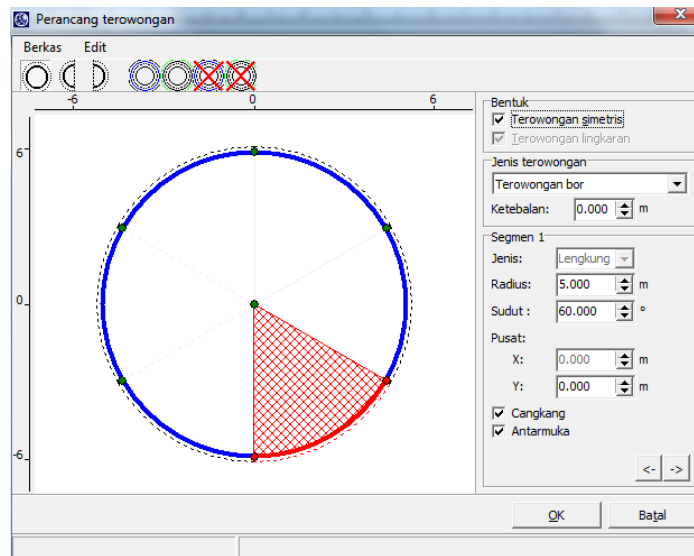
Untuk memodelkan friksi antara tiang bor dengan tanah disekitarnya, digunakan elemen antarmuka positif dan negatif pada ke dua sisi tiang. Nilai R_{inter} yang digunakan mempengaruhi kelekatan tiang dengan tanah di sekitarnya. Karakteristik antarmuka dapat dimasukkan dalam tab parameter tanah dan antarmuka.

Tabel 4.12 Input antarmuka tiang

Model Material	Elastis-Linear
Jenis Material	Non-Porous
Berat Jenis	24 kN/m ³
Modulus Young	25472.96 kN/m ²
Angka Poissons	0.2
R_{inter}	0.67

4. Pemodelan Terowongan

Dalam memodelkan terowongan, PLAXIS 8.6 memiliki sub-menu khusus untuk memodelkan geometri dari terowongan, namun untuk karakteristik fisiknya masih tergolong sebagai pelat (*plate*).

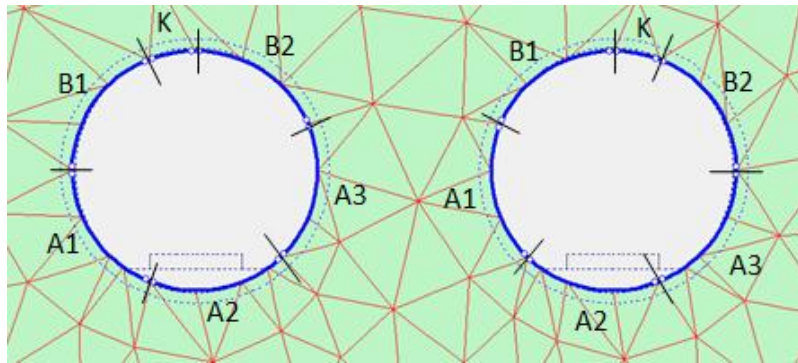


Gambar 4.8 Perancang terowongan

Dinding terowongan (*lining*) dianggap homogen dan kontinu, karena itu pengaktifan atau penonaktifan dari dinding terowongan dalam tahapan konstruksi hanya dapat dilakukan pada keseluruhan. Untuk memodelkan komponen terowongan, diperlukan beberapa parameter, yaitu:

a. Properti kekakuan

Karena karakteristik fisiknya yang tergolong sebagai pelat (*plate*), persamaan (4.6) dan (4.7) tetap dapat digunakan untuk komponen *lining* terowongan. Perlu diperhatikan bahwa nilai momen inersia yang digunakan adalah momen inersia efektif yang dihitung dengan persamaan (3.22). Untuk terowongan bor dengan material segmen *precast*, sendi pada diskontinuitas antar segmen harus dinon-aktifkan, untuk memodelkan perilaku terowongan yang lebih akurat. Posisi diskontinuitas antar segmen yang diaplikasikan dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Model terowongan yang digunakan dalam penelitian

Tabel 4.13 Posisi diskontinuitas antar segmen terowongan

Diskontinuitas	<i>Downtrack</i>	<i>Uptrack</i>
	Θ	Θ
K-B1	337.5	0
B1- A1	270	292.5
A1-A2	202.5	225
A2-A3	135	157.5
A3-B2	67.5	90
B2-K	0	22.5

*putaran searah jarum jam dari *crown*

b. Berat

Untuk menghitung berat total dari *lining* 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.

$$w_{lining} = \frac{W_{total}}{\pi D} \quad (4.11)$$

dengan,

D = diameter terowongan (m)

Tabel 4.14 Input parameter *lining* terowongan

EA (kN/m ² /m)	8000000
I (m ⁴)	0.0013021
I _e (m ⁴)	0.0012149
EI _e (kNm ² /m)	38876.907
v	0.2
w (kN/m/m)	5.899

5. Pemodelan Pembebanan

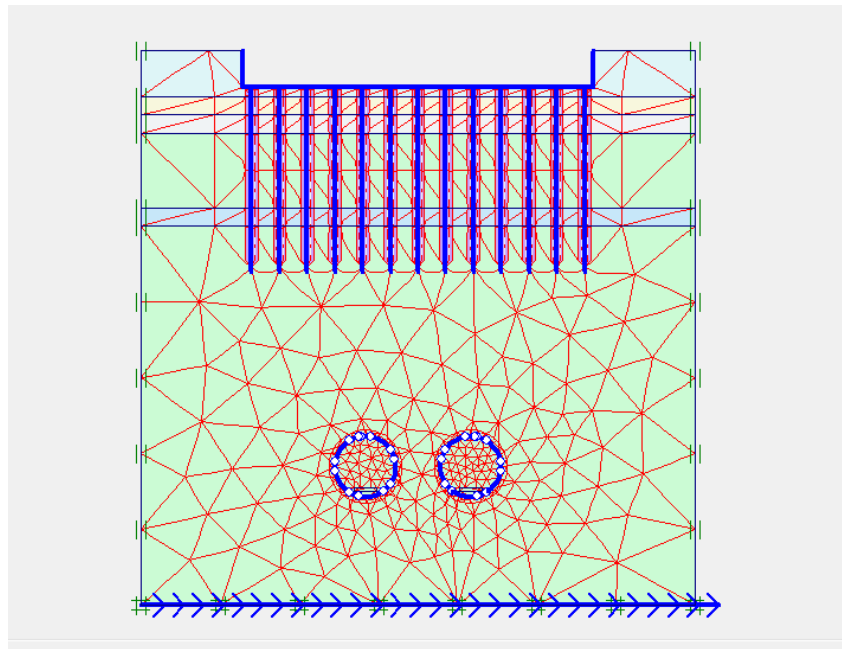
Beban yang digunakan pada penelitian ini merupakan beban statis merata dalam kondisi terdistribusi merata pada permukaan fondasi rakit dengan nilai 100 kN/m². Pertimbangan dalam menggunakan nilai tersebut dengan mengasumsikan gedung 10 lantai, dengan beban per lantainya 10 kN/m². Nilai 10 kN/m² per lantai ini diperoleh dari peraturan BS 8002 (1994).

6. Penetapan Kondisi Batas

Kondisi batas yang digunakan merupakan *Standard Fixities* (Jepit Standar), dimana PLAXIS akan menetapkan kondisi batas agar perilaku pemodelan serealistis mungkin.

7. Penyusunan Jaring Elemen

Jaring elemen dari model menentukan akurasi dari perhitungan yang didapatkan. Semakin halus jaring elemen, hasil perhitungan yang didapatkan lebih teliti, namun waktu penyelesaian analisis akan menjadi lebih panjang. Dalam penelitian ini, digunakan jaring elemen dengan kekasaran yang sedang.



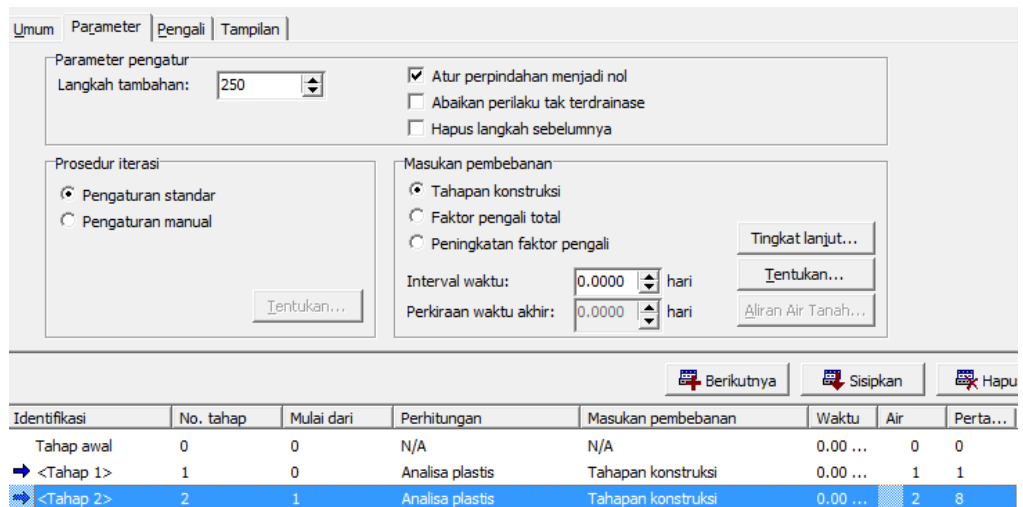
Gambar 4.10 Penyusunan jaring elemen hingga

8. Penetapan Kondisi Awal

Penetapan kondisi awal melibatkan dua analisis, yaitu analisis tekanan air pori dan analisis prosedur K_0 . Untuk menganalisis tekanan air pori, harus ditetapkan terlebih dahulu kedalaman muka air tanah. Pada analisis ini, muka air tanah berada pada kedalaman 6 m dari permukaan tanah eksisting. Sementara itu, analisis prosedur K_0 untuk menganalisis tegangan efektif awal pada model. Analisis tersebut dapat dilakukan secara otomatis oleh PLAXIS menggunakan nilai K_0 yang tersedia.

9. Tahap Perhitungan

Jenis analisis yang digunakan adalah analisis plastis dengan pembebanan bertahap, di mana tahap pertama merupakan kondisi eksisting fondasi tiang-rakit, dan tahap kedua merupakan pengeboran terowongan. Deformasi pada tahap pengeboran terowongan diatur menjadi nol, sehingga deformasi yang diperoleh pada akhir perhitungan merupakan deformasi akibat pengeboran terowongan saja.



Gambar 4.11 Lembar tab parameter perhitungan

Dalam tahap analisis penggalian terowongan, kluster tekanan pori pada terowongan diatur menjadi kluster kering untuk menghilangkan tekanan pori di dalam terowongan.

10. Hasil Analisis

Hasil analisis adalah deformasi dan gaya-gaya dalam yang berkerja pada *lining* terowongan dari masing-masing model sistem fondasi yang dibuat.

11. Analisis Stabilitas Terowongan

Analisis ini dapat dilakukan dengan persamaan (3.28).

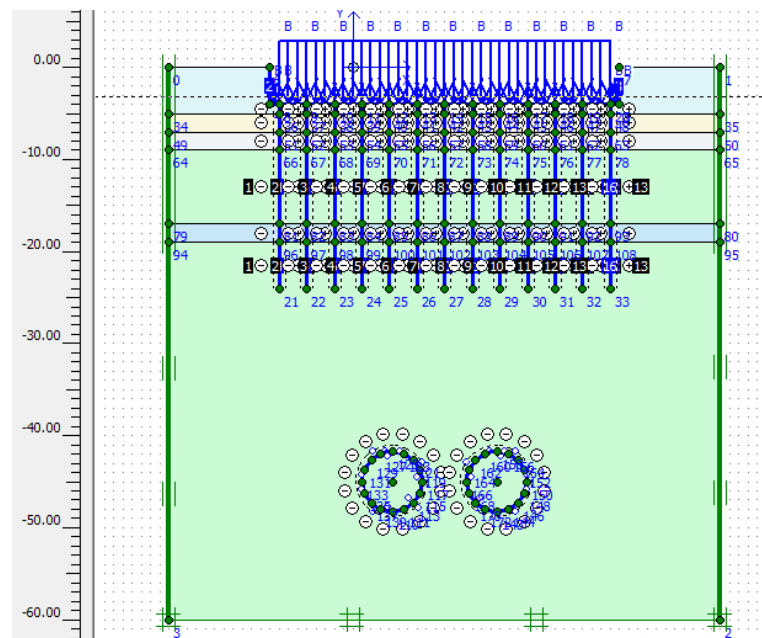
4.4 Pembahasan

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

BAB 5 HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Basis Pemodelan

Setelah parameter tanah diperoleh, dan batasan-batasan desain telah ditetapkan, maka pembuatan model menggunakan PLAXIS 8.6 dapat mulai dilakukan. Dalam penelitian ini, digunakan kasus terowongan kembar yang merepresentasikan kondisi pada terowongan MRT Jakarta. Mesin bor yang digunakan dalam konstruksi terowongan bor tersebut adalah *EPB shield boring machine*. Terowongan sisi kiri dinamakan *downtrack*, sedangkan terowongan sisi kanan dinamakan *uptrack*. Kedalaman dari terowongan dan jarak antar terowongan pada setiap model adalah sama. Variasi model terletak pada panjang tiang bor yang digunakan, perbedaan metode konstruksi, tinggi muka air tanah, dan pengaktifan beban permukaan saja. Beban dari *grout pressure* diabaikan dalam analisis karena bersifat beban sementara.



Gambar 5.1 Contoh model terowongan yang digunakan

5.2 Geometri Model

Domain model menggunakan persamaan konstitutif regangan bidang (*plane strain*). Panjang dari domain model adalah 80 m dengan ketebalan 60 m dengan koordinat (-20,0), (60,0), (60,-60), dan (-20,-60). Kedalaman terowongan pada level *spring line* adalah 45 m, dimana nilai tersebut adalah sama untuk setiap model. Jarak antar terowongan dari aksis ke aksis sebesar 11.347 m mengacu jarak antar terowongan sebenarnya pada terowongan MRT Jakarta. Koordinat dari kedua alinemen terowongan ditunjukkan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Koordinat alinemen terowongan

Koord.	<i>Downtrack</i>	<i>Center Line</i>	<i>Uptrack</i>
x	699347.228	699351.770	699356.313
y	9311341.619	9311335.589	9311329.558

Koordinat yang dimasukkan pada input pemodelan terowongan, untuk *Downtrack* (4.327, -45) dan *Uptrack* (15.674, -45). Panjang fondasi rakit adalah 38 m, dengan barisan 13 tiang bor dengan jarak antar tiang 3 m. Fondasi rakit diletakkan pada 4 m dibawah permukaan tanah asli, dan muka air tanah diletakkan pada kedalaman 6 m untuk setiap model. Beban permukaan 100 kN/m/m diletakkan di atas permukaan fondasi rakit. Jepit standar diaplikasikan pada model untuk memberikan kondisi batas.

5.3 Pembahasan Hasil Analisis

5.3.1 Perbedaan Pemodelan Kekakuan Terowongan

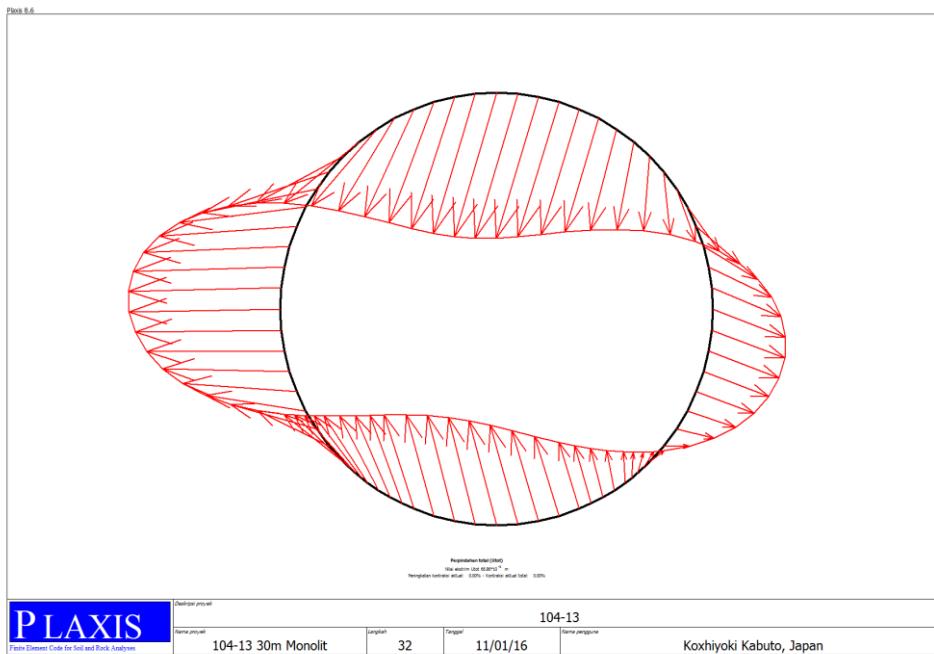
Dalam pemodelan terowongan bor dengan segmen *precast*, terdapat diskontinuitas antar segmen yang merupakan bidang lemah dari terowongan. Diskontinuitas ini menyebabkan terowongan menjadi tidak monolit. Dalam kasus terowongan monolit, tidak terdapat diskontinuitas antar badan terowongan yang menghasilkan nilai kekakuan lentur yang lebih tinggi. Semakin kaku struktur relatif terhadap tanah, semakin besar beban yang tersalurkan pada struktur. Dalam pembahasan ini akan dibahas perbandingan model terowongan monolit dengan model terowongan

precast, parameter yang dibahas mengenai pola deformasi dan momen lentur yang berkerja. Analisis menggunakan salah satu model saja (panjang tiang 30 m), karena pola deformasi dan BMD yang dihasilkan sama untuk setiap model.

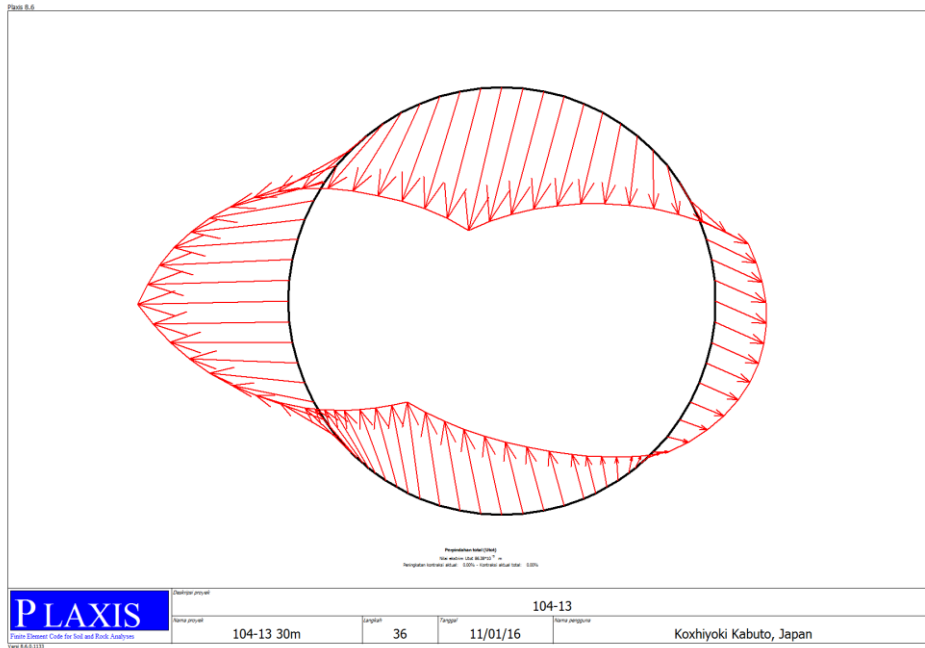
Tabel 5.2 Perbandingan deformasi terowongan monolit dengan *precast*

Titik	Θ	<i>Downtrack</i>		<i>Uptrack</i>	
		Deformasi (mm)			
	°	Monolit	<i>Precast</i>	Monolit	<i>Precast</i>
<i>Crown</i>	0	-65.518	-83.896	-65.509	-84.068
<i>Spring Line 1</i>	90	34.049	31.737	66.093	86.422
<i>Invert</i>	180	47.217	46.115	47.314	46.121
<i>Spring Line 2</i>	270	-66.112	-86.381	-34.211	-31.864

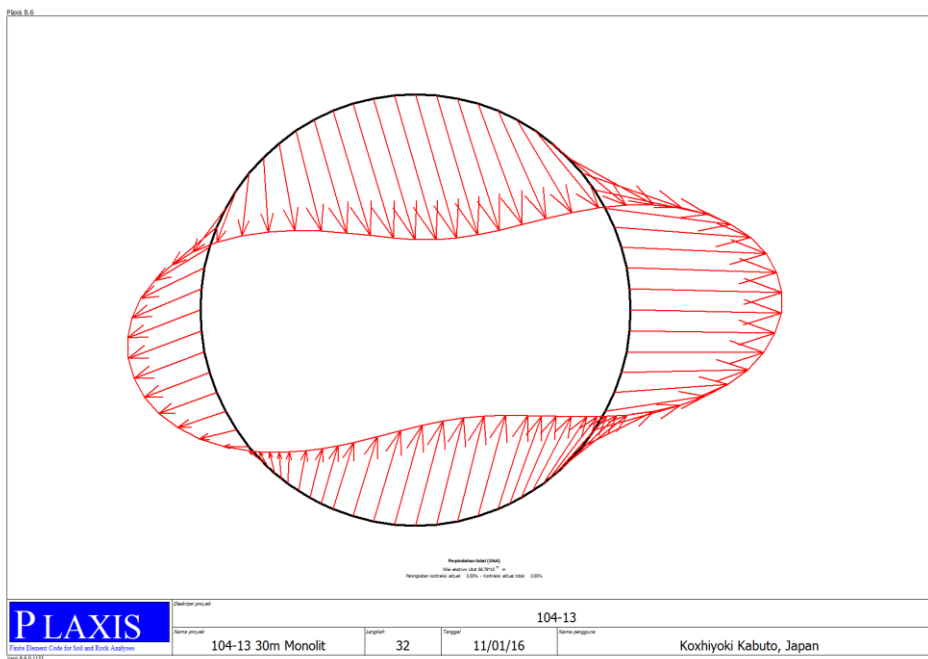
*Putaran searah jarum jam dari *crown*



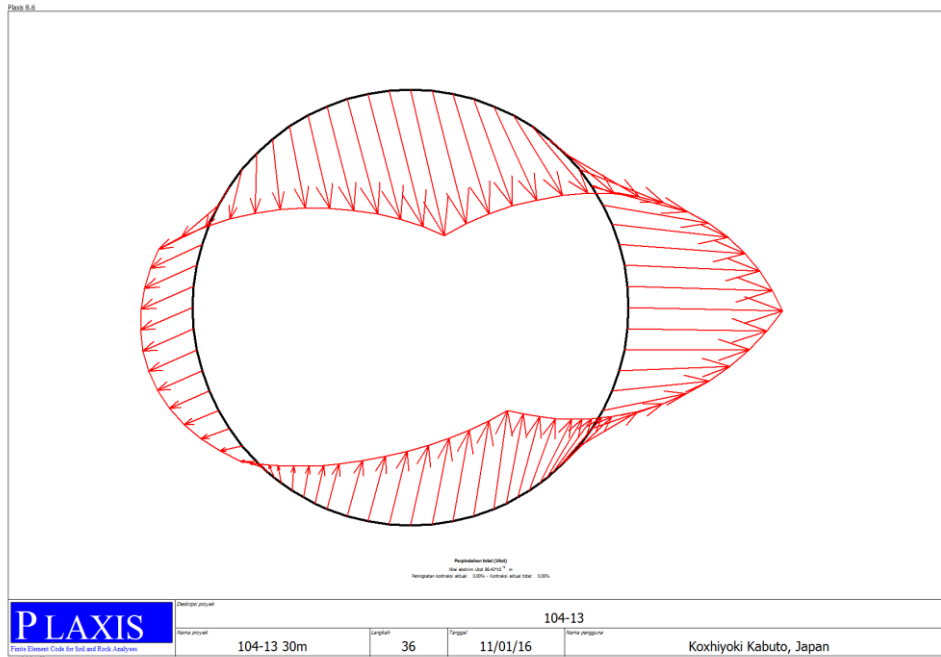
Gambar 5.2 Pola deformasi *Downtrack* (monolit)



Gambar 5.3 Pola deformasi *Downtrack* (precast)



Gambar 5.4 Pola deformasi *Uptrack* (monolit)

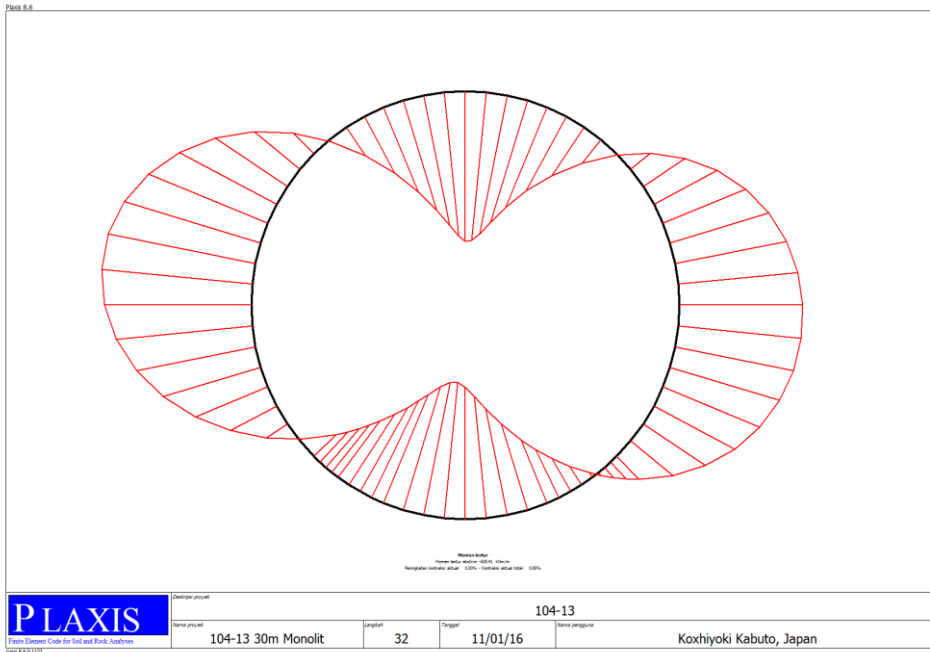


Gambar 5.5 Pola deformasi *Uptrack (precast)*

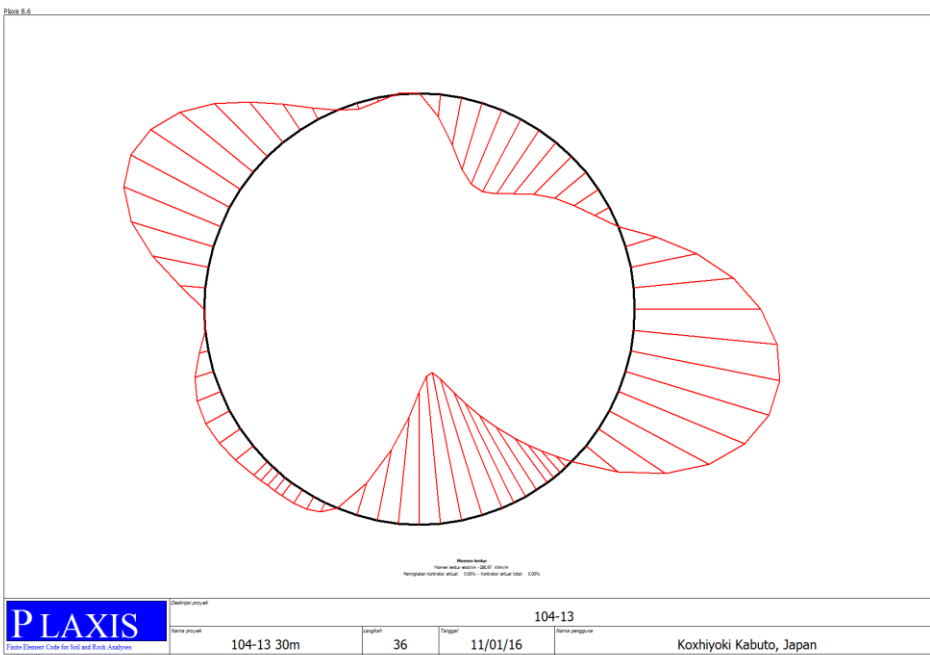
Tabel 5.3 Perbandingan momen lentur terowongan monolit dan *precast*

Θ	Momen Lentur (kNm/m)			
	<i>Downtrack</i>		<i>Uptrack</i>	
$^{\circ}$	Monolit	<i>Precast</i>	Monolit	<i>Precast</i>
0	630.732	0	631.268	0
45	7.777	100.705	-118.245	-140.338
90	-518.161	-237.764	-617.635	0
135	-134.824	0	127.207	-37.934
180	553.832	251.091	554.794	250.941
225	129.519	-36.253	-132.356	0
270	-616.179	0	-518.852	-237.070
315	-121.183	-141.568	5.264	100.297
<i>Mmax</i>	-635.410	-286.970	-636.320	-286.370

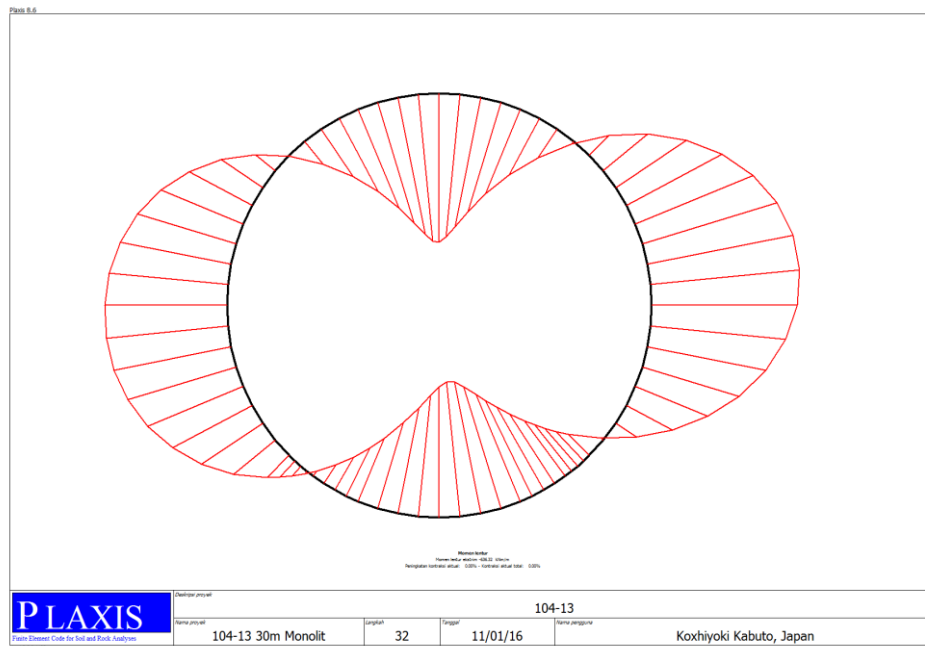
*Putaran searah jarum jam mulai dari *crown*



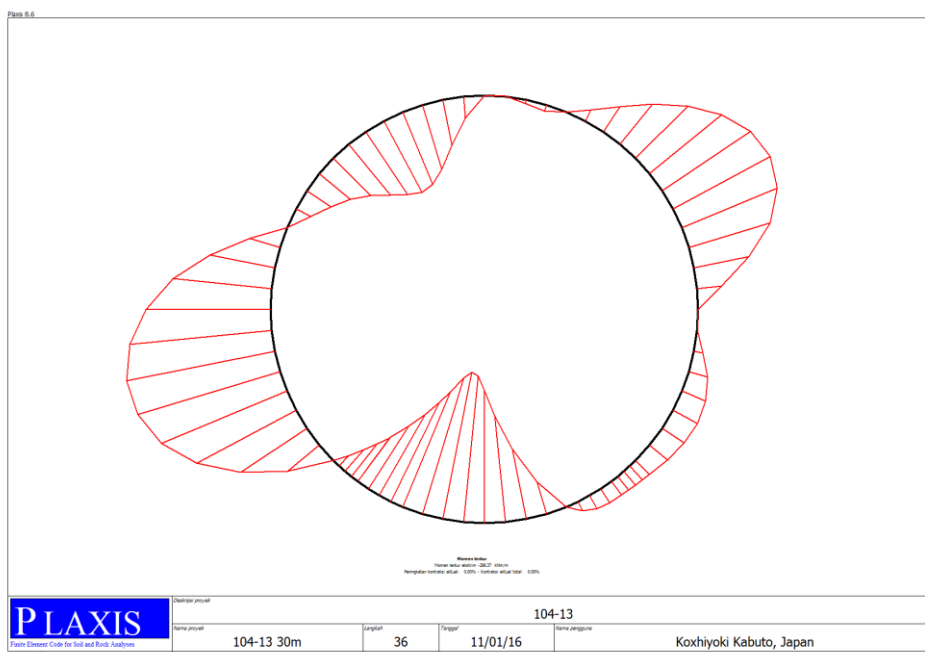
Gambar 5.6 BMD *Downtrack* (monolit)



Gambar 5.7 BMD *Downtrack* (precast)



Gambar 5.8 BMD *Uptrack* (monolit)



Gambar 5.9 BMD *Uptrack* (precast)

Dapat dilihat pada Gambar 5.2 hingga Gambar 5.9, terdapat perbedaan antara deformasi yang dihasilkan oleh terowongan monolit dengan segmen *precast*. Terowongan monolit menghasilkan pola deformasi yang kontinu dibandingkan

dengan terowongan segmen *precast*. Diskontinu antar segmen menyebabkan reduksi nilai kekakuan lentur, sehingga deformasi pada terowongan segmen *precast* lebih besar dari terowongan monolit. Reduksi kekakuan lentur ini juga memberikan dampak pada momen lentur yang terjadi. Nilai momen lentur yang dihasilkan pada terowongan monolit jauh lebih besar dibandingkan dengan terowongan segmen *precast*, karena kekakuan lentur pada terowongan monolit lebih tinggi. Perlu diperhatikan juga, pada terowongan segmen *precast* tidak ada momen lentur pada setiap diskontinuitas antar segmen. Diskontinuitas ini merupakan bidang lemah dalam badan terowongan, sehingga diusahakan tidak ada momen yang bekerja pada titik-titik ini. Karena itu harus diperhatikan kesesuaian desain dan pelaksanaan konstruksi. Konstruksi terowongan *precast* dengan desain yang monolit akan membahayakan stabilitas struktur terowongan.

5.3.2 Pengaruh Perbedaan Metode Konstruksi Terowongan

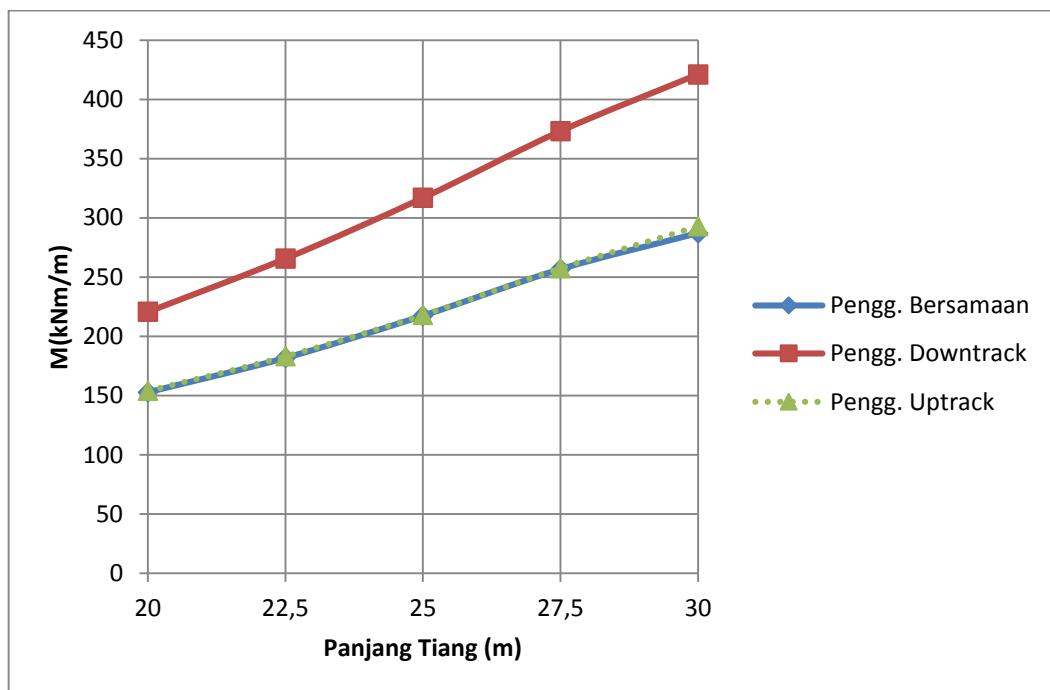
Untuk mengetahui pengaruh perbedaan metode konstruksi terowongan dalam perilaku terowongan, dilakukan perbandingan besar momen maksimum yang terjadi pada titik yang sama dan deformasi terowongan. Perbedaannya adalah dua opsi tahapan penggalian, yaitu penggalian bersamaan (kedua terowongan digali bersamaan) dan penggalian bertahap (penggalian salah satu terowongan, diikuti terowongan selanjutnya). Dalam penggalian bertahap, *downtrack* digali lebih dahulu diikuti penggalian *uptrack*. Besar momen dan deformasi yang dibandingkan divariasikan berdasarkan panjang tiang bor yang berada di atas terowongan bor.

1. *Downtrack*

Berikut adalah hasil analisis deformasi dan momen lentur yang dihasilkan oleh terowongan *downtrack* terhadap kondisi yang diakibatkan berbagai metode konstruksi. Nilai deformasi dan momen lentur dari *downtrack* dibandingkan antara kondisi penggalian kedua terowongan bersamaan, kondisi *downtrack* selama penggalian, dan kondisi akhir *downtrack* setelah kedua terowongan digali.

Tabel 5.4 Perbandingan momen lentur maksimum *Downtrack* setelah penggalian

Panjang Tiang (m)	Penggalian Bersamaan Mmax (kNm/m)	Penggalian Bertahap	
		<i>Downtrack</i> Mmax (kNm/m)	<i>Uptrack</i> Mmax (kNm/m)
20	152.830	220.682	154.040
22.5	181.810	265.620	183.180
25	217.391	316.887	218.081
27.5	256.596	373.130	257.460
30	286.968	421.050	292.804



Gambar 5.10 Perbandingan momen lentur *downtrack* setelah penggalian

Tabel 5.5 Perbandingan diameter *downtrack* setelah penggalian

Panjang Tiang (m)	Diameter Lining (m)	Penggalian Bersamaan		Penggalian Bertahap			
		VTD (m)	HTD (m)	<i>Downtrack</i>		<i>Uptrack</i>	
(m)	(m)	VTD (m)	HTD (m)	VTD (m)	HTD (m)	VTD (m)	HTD (m)
20	6.55	6.484	6.609	6.474	6.619	6.484	6.609
22.5		6.470	6.622	6.458	6.634	6.469	6.622
25		6.454	6.637	6.438	6.652	6.451	6.638
27.5		6.436	6.653	6.417	6.671	6.433	6.654
30		6.423	6.665	6.404	6.685	6.422	6.666

*VTD = Vertical Tunnel Diameter

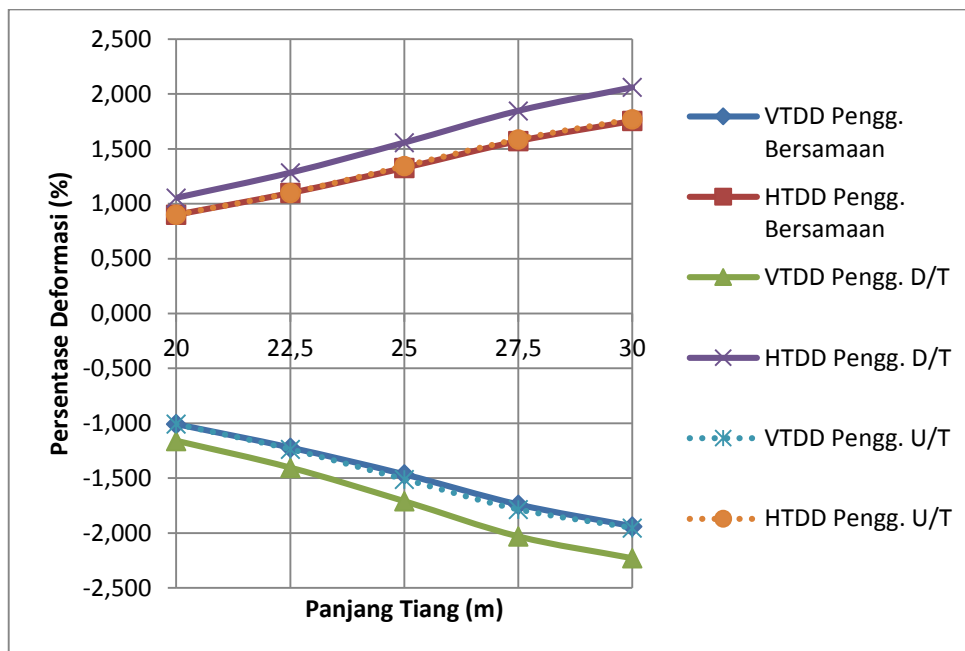
*HTD = Horizontal Tunnel Diameter

Tabel 5.6 Perbandingan deformasi diameter *downtrack* akibat perbedaan metode konstruksi

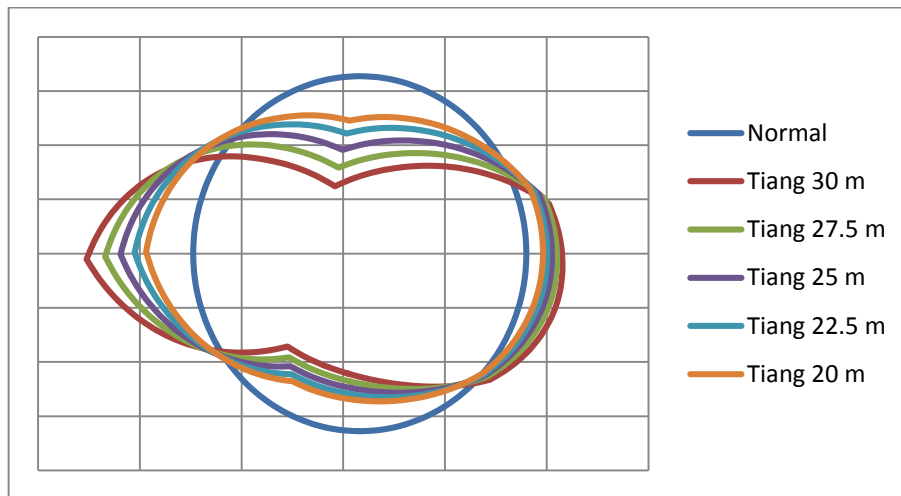
Panjang Tiang (m)	Penggalian Bersamaan		Penggalian Bertahap			
	VTDD (%)	HTDD (%)	<i>Downtrack</i>		<i>Uptrack</i>	
	VTDD (%)	HTDD (%)	VTDD (%)	HTDD (%)	VTDD (%)	HTDD (%)
20	-1.008	0.901	-1.160	1.053	-1.008	0.901
22.5	-1.313	1.191	-1.542	1.389	-1.374	1.206
25	-1.466	1.328	-1.710	1.557	-1.511	1.344
27.5	-1.740	1.573	-2.031	1.847	-1.786	1.588
30	-1.939	1.756	-2.229	2.061	-1.954	1.771

*VTDD = Vertical Tunnel Diameter Deformation

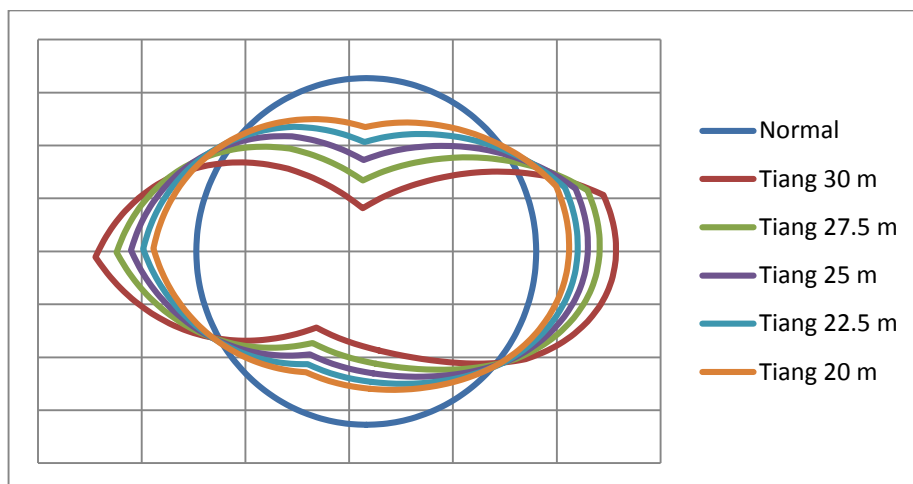
*HTDD = Horizontal Tunnel Diameter Deformation



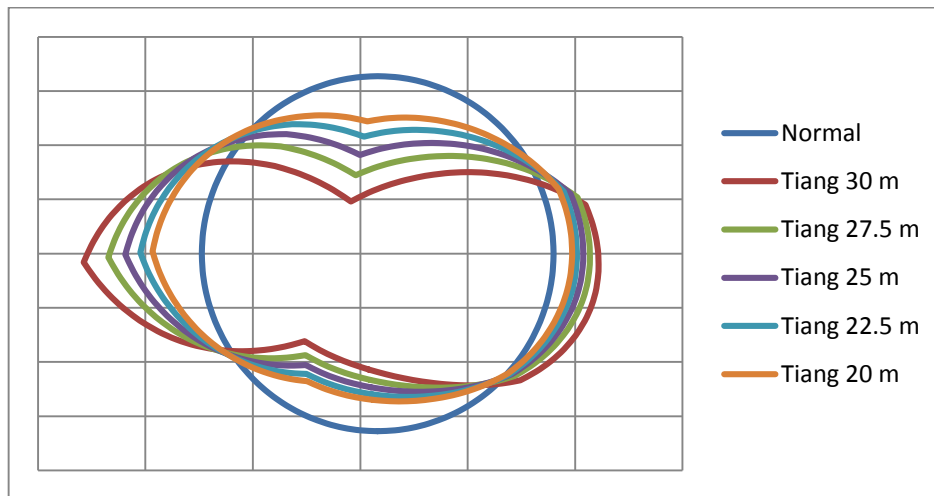
Gambar 5.11 Perbandingan persentase deformasi *Downtrack* setelah penggalian



Gambar 5.12 Pola deformasi *Downtrack* setelah penggalian bersamaan



Gambar 5.13 Pola deformasi *Downtrack* setelah penggalian *Downtrack*



Gambar 5.14 Pola deformasi *Downtrack* setelah penggalian *Uptrack*

Dari Tabel 5.4 dan Gambar 5.10 di atas, terlihat bahwa nilai momen dan deformasi *lining* terbesar terjadi pada kasus penggalian bertahap setelah penggalian *downtrack* dilakukan. Setiap model yang dianalisis berdasarkan variasi panjang tiang menunjukkan konsistensi terhadap hasil yang didapatkan. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi tegangan antarmuka terowongan yang dihasilkan oleh penggalian bersamaan lebih seragam bila dibandingkan dengan distribusi tegangan antarmuka terowongan oleh penggalian bersamaan.

Nilai momen dan deformasi juga meningkat seiring dengan memanjangnya tiang bor ke dalam tanah. Panjang tiang bor menentukan *cover depth* antara terowongan dengan ujung tiang bor. Peningkatan ini terjadi karena adanya peningkatan massa tiang dan distribusi tegangan dari beban permukaan.

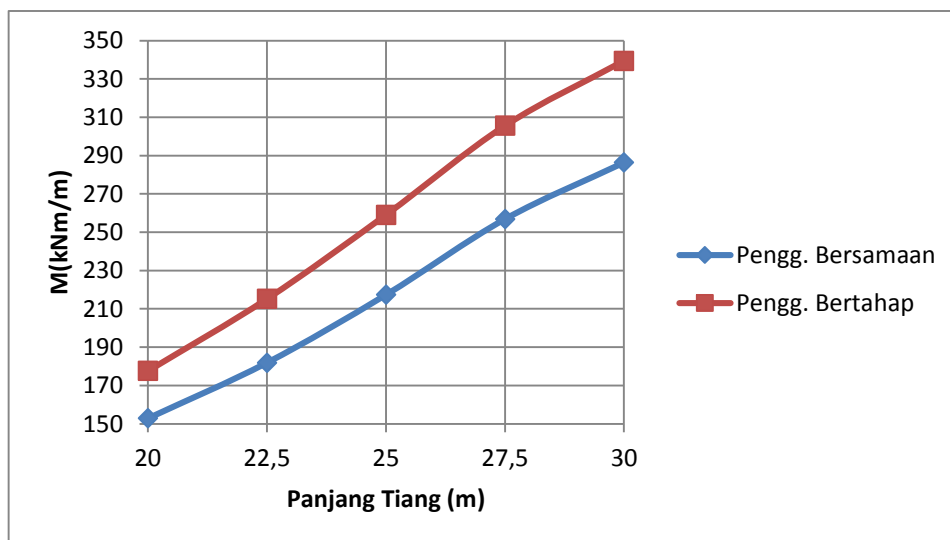
Saat penggalian *uptrack* dilaksanakan, *downtrack* mengalami reduksi deformasi dan momen lentur, mencapai nilai yang hampir menyamai kasus penggalian bersamaan. Ini disebabkan *lining* masih bersifat elastik. Jenis perilaku material *lining* yang digunakan adalah elasto-plastik, namun perilaku plastik tidak tercapai dengan kondisi tersebut.

2. *Uptrack*

Berikut adalah hasil analisis deformasi dan momen lentur yang dihasilkan oleh terowongan *uptrack* terhadap kondisi yang diakibatkan berbagai metode konstruksi. Nilai deformasi dan momen lentur dari *uptrack* dibandingkan antara kondisi penggalian kedua terowongan bersamaan, dan kondisi akhir *uptrack* setelah kedua terowongan digali.

Tabel 5.7 Perbandingan momen lentur *uptrack* setelah penggalian

Panjang Tiang (m)	Penggalian Bersamaan Mmax (kNm/m)	Penggalian Bertahap Mmax (kNm/m)
20	152.873	177.650
22.5	181.910	215.260
25	217.374	259.075
27.5	256.870	305.580
30	286.366	339.444



Gambar 5.15 Perbandingan momen lentur *uptrack* setelah penggalian

Tabel 5.8 Perbandingan deformasi *Uptrack* setelah penggalian

Panjang Tiang (m)	Diameter Lining (m)	Penggalian Bersamaan		Penggalian Bertahap	
		VTD (m)	HTD (m)	VTD (m)	HTD (m)
20	6.55	6.484	6.609	6.483	6.606
22.5		6.470	6.622	6.468	6.618
25		6.454	6.637	6.452	6.632
27.5		6.436	6.653	6.441	6.641
30		6.423	6.665	6.420	6.660

*VTD = Vertical Tunnel Diameter

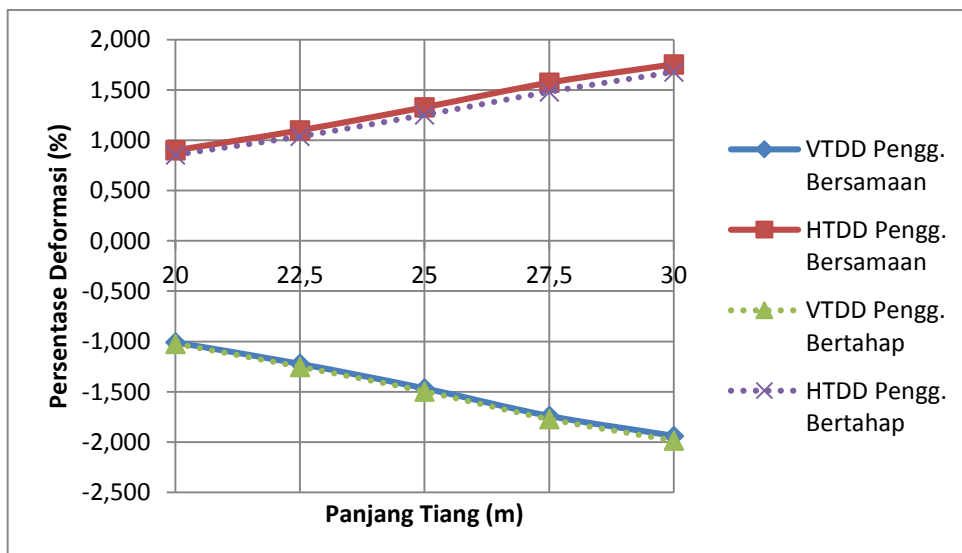
*HTD = Horizontal Tunnel Diameter

Tabel 5.9 Perbandingan persentase deformasi *Uptrack* setelah penggalian

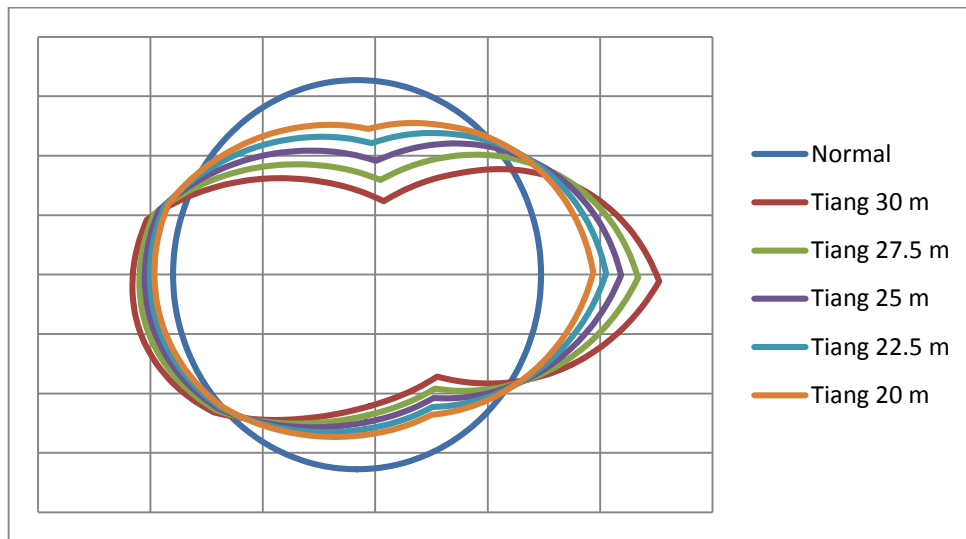
Panjang Tiang (m)	Penggalian Bersamaan		Penggalian Bertahap	
	VTDD (%)	HTDD (%)	VTDD (%)	HTDD (%)
20	-1.008	0.901	-1.023	0.855
22.5	-1.328	1.191	-1.359	1.130
25	-1.466	1.328	-1.496	1.252
27.5	-1.740	1.573	-1.771	1.389
30	-1.939	1.756	-1.985	1.679

*VTDD = Vertical Tunnel Diameter Deformation

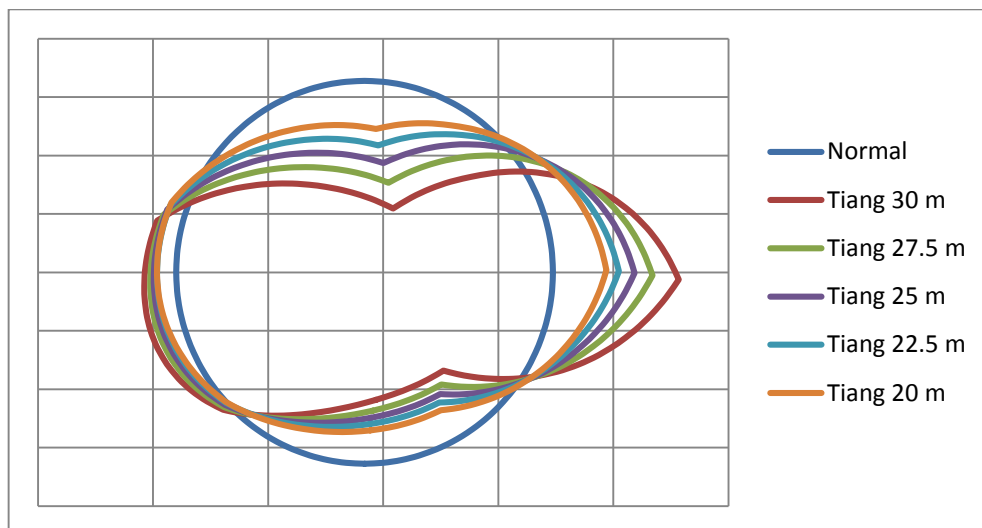
*HTDD = Horizontal Tunnel Diameter Deformation



Gambar 5.16 Perbandingan persentase deformasi *Uptrack* setelah penggalian



Gambar 5.17 Pola deformasi *Uptrack* akibat penggalian bersamaan



Gambar 5.18 Pola deformasi *Uptrack* akibat penggalian bertahap

Dari Tabel 5.7 dan Gambar 5.15 di atas, terlihat bahwa nilai momen pada kasus penggalian bertahap setelah penggalian *uptrack* dilakukan lebih besar dibandingkan dengan momen pada kasus penggalian bersamaan. Deformasi diameter vertikal terbesar terjadi pada kasus penggalian bertahap, namun deformasi diameter horizontal terbesar terjadi pada kasus penggalian bersamaan.

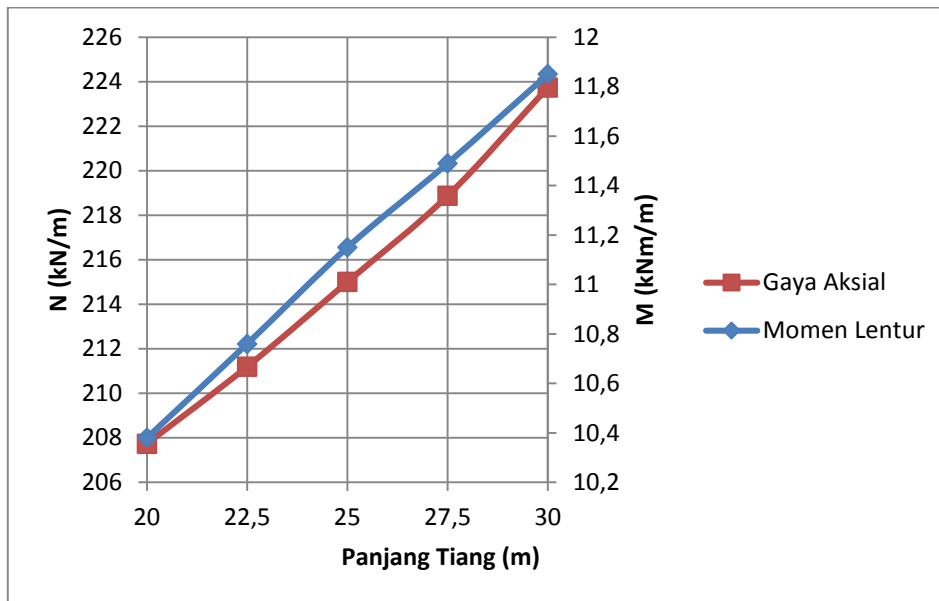
Momen lentur akhir dari *uptrack* lebih tinggi dibandingkan dengan momen lentur dari *downtrack* akibat penggalian bertahap. Hal ini disebabkan terganggunya kestabilan dari lapisan tanah pada *uptrack* selama penggalian berlangsung. Dari hasil-hasil di atas, disarankan penggalian dilakukan secara bersamaan untuk mengurangi nilai momen lentur yang terjadi, sehingga desain *lining* dan perkuatan yang dibutuhkan dapat lebih ekonomis jika dibandingkan dengan penggalian bertahap.

5.3.3 Pengaruh Geometri Struktur Fondasi dengan Gaya-gaya dalam Terowongan

Untuk mengetahui pengaruh geometri struktur fondasi dengan gaya-gaya dalam terowongan, dilakukan perbandingan besar momen dan gaya normal maksimum yang terjadi terowongan terhadap variasi panjang dari tiang bor. Panjang tiang bor menginterpretasikan tebal *cover depth* antara terowongan dengan ujung tiang. Pada analisis ini, semua beban dari tanah dan air di non-aktifkan kecuali beban permukaan. Hal ini dilakukan untuk dapat memberikan gaya-gaya dalam yang murni berasal dari beban permukaan, sehingga dapat diketahui pengaruh panjang tiang dalam menyalurkan beban permukaan pada terowongan.

Tabel 5.10 Perbandingan gaya-gaya dalam terowongan terhadap geometri struktur fondasi

Panjang Tiang	Mmax	Nmax
(m)	(kNm/m)	(kN/m)
20	10.380	207.730
22.5	10.760	211.190
25	11.152	215.000
27.5	11.490	218.870
30	11.850	223.740



Gambar 5.19 Perbandingan gaya-gaya dalam terowongan terhadap geometri struktur fondasi

Dari Tabel 5.10 dan Gambar 5.19 di atas, terlihat bahwa nilai momen dan gaya normal terbesar terjadi pada model dengan panjang tiang terpanjang, yaitu 30 meter. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin jauh tebal *cover depth* antara struktur eksisting dengan terowongan, semakin kecil persentase beban permukaan (*surchage*) yang disalurkan pada terowongan. Namun semakin dalam terowongan, biaya konstruksi menjadi semakin tinggi, terutama dalam pembangunan fasilitas seperti *shaft*, *grouting installation*, dan stasiun bawah tanah.

5.3.4 Pengaruh Air Tanah terhadap perilaku Terowongan

Untuk mengetahui pengaruh air tanah terhadap perilaku terowongan, dilakukan perbandingan terhadap deformasi dan gaya-gaya dalam yang bekerja pada terowongan. Dalam model tanpa muka air tanah, muka air tanah diposisikan pada dasar dari domain, sedangkan pada model yang memperhitungkan pengaruh air tanah, muka air tanah diletakkan pada kedalaman 6 m. Analisis diasumsikan menggunakan metode penggalian terowongan secara bersamaan.

Tabel 5.11 Perbandingan deformasi diameter terowongan

Panjang Tiang (m)	Diameter Lining (m)	Dengan M.A.T		Tanpa M.A.T	
		VTD (m)	HTD (m)	VTD (m)	HTD (m)
20	6.55	6.484	6.609	6.464	6.630
22.5		6.470	6.622	6.451	6.642
25		6.454	6.637	6.436	6.656
27.5		6.436	6.653	6.418	6.672
30		6.423	6.665	6.398	6.692

Tabel 5.12 Perbandingan persentase deformasi diameter terowongan

Panjang Tiang (m)	Dengan M.A.T		Tanpa M.A.T	
	VTD (%)	HTD (%)	VTD (%)	HTD (%)
20	-1.008	0.901	-1.313	1.221
22.5	-1.313	1.191	-1.511	1.405
25	-1.466	1.328	-1.740	1.618
27.5	-1.634	1.466	-2.015	1.863
30	-1.939	1.756	-2.321	2.168

Tabel 5.13 Perbandingan gaya-gaya dalam terowongan

Panjang Tiang (m)	Dengan M.A.T		Tanpa M.A.T	
	Mmax (kNm/m)	Nmax (kN/m)	Mmax (kNm/m)	Nmax (kN/m)
20	152.830	4288.555	215.866	4128.312
22.5	181.810	4835.922	243.063	4654.277
25	217.391	5473.480	275.592	5266.862
27.5	240.710	6185.607	312.670	5961.169
30	286.968	7034.524	359.640	6793.129

Dari Tabel 5.11 hingga Tabel 5.13, dapat dilihat perubahan diameter terbesar terjadi pada kasus tanpa pengaruh muka air tanah, baik secara horizontal maupun vertikal. Untuk gaya-gaya dalam, momen terbesar terjadi pada kasus tidak adanya pengaruh air tanah, namun untuk gaya normal terbesar yang dihasilkan terjadi pada kasus muka air tanah yang dangkal. Setiap model yang dianalisis berdasarkan variasi panjang tiang menunjukkan konsistensi terhadap hasil yang didapatkan.

Persamaan tegangan yang dipengaruhi oleh air tanah dapat dilihat pada persamaan (3.23). Nilai tegangan vertikal dengan dan tanpa pengaruh air tanah adalah sama dilihat pada persamaan (3.25). Lain halnya dengan tegangan lateral, dilihat pada persamaan (3.24) dan (3.26), bahwa tegangan air tidak mengalami reduksi karena tegangan air pada segala arah adalah sama. Hal ini menyebabkan distribusi tegangan antarmuka terowongan yang lebih seragam, sehingga deformasi dan momen yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan terowongan yang tidak dipengaruhi air tanah. Air tanah juga menyebabkan gaya apung pada terowongan, yang berdampak pada pengurangan berat efektif *lining*. Peningkatan gaya berat pada terowongan dapat meningkatkan momen lentur yang terjadi, sehingga pada kasus tidak ada pengaruh air tanah, momen yang terjadi lebih besar, sedangkan gaya aksial yang besar pada terowongan dengan pengaruh air tanah, disebabkan tegangan tanah yang lebih besar dari tegangan tanah pada terowongan tanpa air tanah.

5.3.5 Stabilitas Terowongan

Stabilitas dari terowongan dihitung berdasarkan persamaan Davis et. al. (1980). Pada penggalian menggunakan *earth pressure balance*, tegangan tanah lateral pada *face* akan diseimbangkan dengan gaya dorong dari *thrustjack* dan tekanan hisap dari *screw conveyor* saat memindahkan lumpur galian (*muck*) dari *excavation chamber*. Sehingga pengaruh tegangan lateral dapat diabaikan pada penggalian menggunakan *earth pressure balance*. Untuk tegangan radial, digunakan tegangan antarmuka rata-rata yang membebani permukaan terowongan. Nilai dari *support pressure* menggunakan *grout pressure* dari proses *grouting* untuk mengisi celah antara permukaan *lining* dengan hasil galian. Nilai N yang digunakan sebagai *margin* dari stabilitas terowongan dapat dihitung dengan persamaan (3.29).

$$C = +45 - 3.275 = +41.725\text{m}$$

$$R = 3.275 \text{ m}$$

$$N = 4 \ln \left(\frac{41.725}{3.275} + 1 \right) = 7.990$$

Nilai N yang sebagai angka stabilitas terowongan dapat dihitung dengan persamaan (3.28). Contoh hitungan menggunakan data pada model dengan panjang tiang 20 m. *Grout pressure* menggunakan nilai 450 kN/m² pada setiap perhitungan.

$$N = \frac{(qs - s + (C + R)\gamma - \sigma_T)}{C_u}$$

$$qs = 100 \text{ kN/m}^2$$

$$C = +41.725 \text{ m}$$

$$R = 3.275 \text{ m}$$

$$\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$$

$$c_u = 270 \text{ kN/m}^2$$

$$s = 450 \text{ kN/m}^2$$

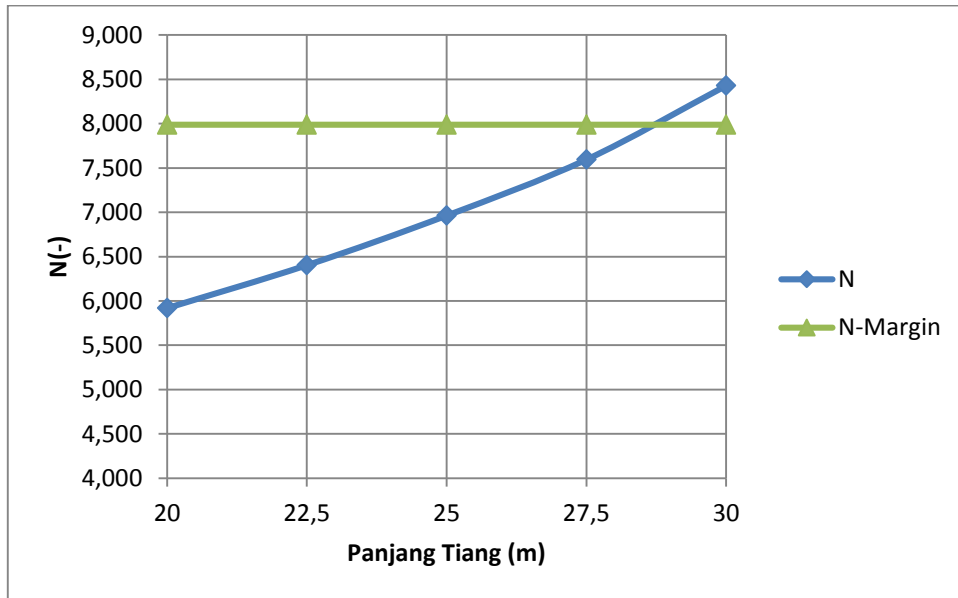
$$\sigma_t = -1138.464 \text{ kN/m}^2$$

$$N = \frac{(100 - 450 + (41.725 + 3.275)18 + 1138.464)}{270}$$

$$N = 5.920 \text{ (Stabil)}$$

Tabel 5.14 Perbandingan nilai stabilitas terowongan

Panjang Tiang	Tegangan Radial	N	N _{margin}	Kondisi
(m)	(kN/m ²)	(-)	(-)	(-)
20	-1138.464	5.920	7.990	Stabil
22.5	-1269.121	6.404	7.990	Stabil
25	-1420.122	6.963	7.990	Stabil
27.5	-1590.702	7.595	7.990	Stabil
30	-1815.826	8.429	7.990	Tidak Stabil



Gambar 5.20 Perbandingan nilai stabilitas terowongan

Dapat dilihat rangkuman hasil perhitungan angka stabilitas (N) dari terowongan dengan variasi panjang tiang pada Tabel 5.14 dan Gambar 5.20. Hasil menunjukkan ketidakstabilan terjadi pada model dengan panjang tiang mencapai 30 m, yaitu tebal *cover depth* paling kecil. Angka stabilitas *margin* terlampaui sebesar 0.259. Untuk mengatasi hal ini bisa dilakukan dengan meningkatkan nilai *grout pressure*, sehingga dapat mengimbangi tegangan radial yang terjadi pada terowongan.

$$s = qs + (C + R)\gamma - \sigma_T - Nc_u$$

$$s = -100 + (41.725 + 3.275)18 + 1815.826 - 7.990(270)$$

$$s = 568.581 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta s = 118.581 \text{ kN/m}^2$$

Dapat dilihat pada perhitungan di atas, *grout pressure* minimum yang dibutuhkan sebesar 568.581 kN/m², sehingga dibutuhkan tambahan *grout pressure* sebesar 118.581 kN/m² untuk memenuhi kondisi stabil.

Untuk meningkatkan stabilitas terowongan juga dapat dilakukan dengan meningkatkan nilai N_{margin} , yaitu dengan menyesuaikan parameter C/R . Dapat disimpulkan semakin dalam kedalaman penggalian terowongan, dan semakin kecil diameter terowongan akan meningkatkan stabilitas dari terowongan.

5.3.6 Penurunan fondasi tiang-rakit akibat penggalian terowongan

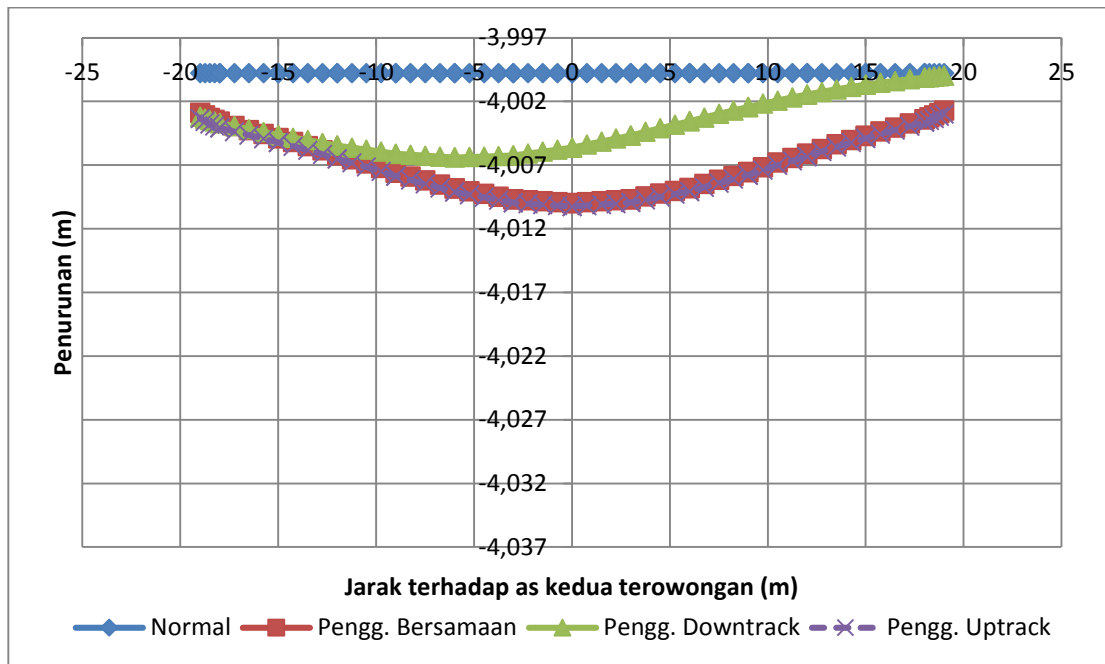
Deformasi yang terjadi pada fondasi tiang-rakit akibat penggalian terowongan harus memenuhi batas maksimum penurunan yang diijinkan. Penggalian terowongan secara bertahap menyebabkan penurunan rakit yang tidak seragam, sedangkan penurunan tidak seragam merupakan faktor yang dihindari dalam pemakaian fondasi tiang-rakit. Untuk itu dilakukan perbandingan antara penurunan maksimum permukaan rakit akibat penggalian terowongan secara bersamaan maupun bertahap. Perbandingan juga dilakukan terhadap variasi panjang tiang, dimana hal tersebut berpengaruh terhadap jarak bersih antara ujung tiang dengan terowongan.

Tabel 5.15 Penurunan maksimum fondasi tiang-rakit

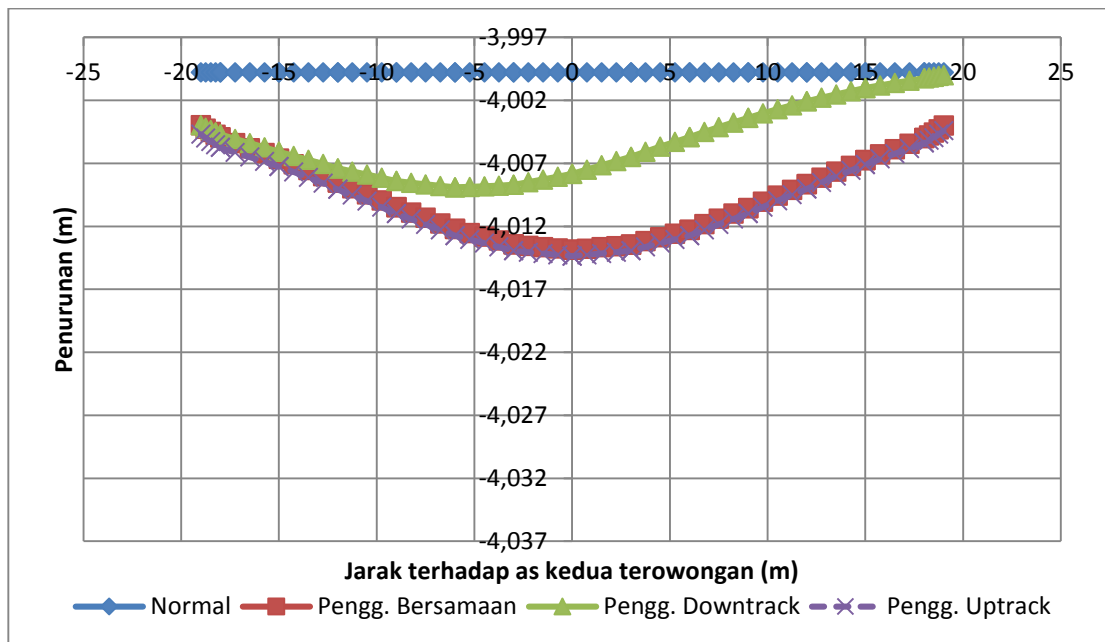
Panjang Tiang (m)	Penggalian		
	Bersamaan Uy (mm)	D/T Uy (mm)	U/T Uy (mm)
20	-10.199	-6.613	-10.471
22.5	-14.077	-9.115	-14.574
25	-18.820	-12.437	-19.604
27.5	-24.061	-16.211	-24.994
30	-28.380	-18.884	-29.129

Tabel 5.16 Penurunan diferensial maksimum fondasi tiang-rakit

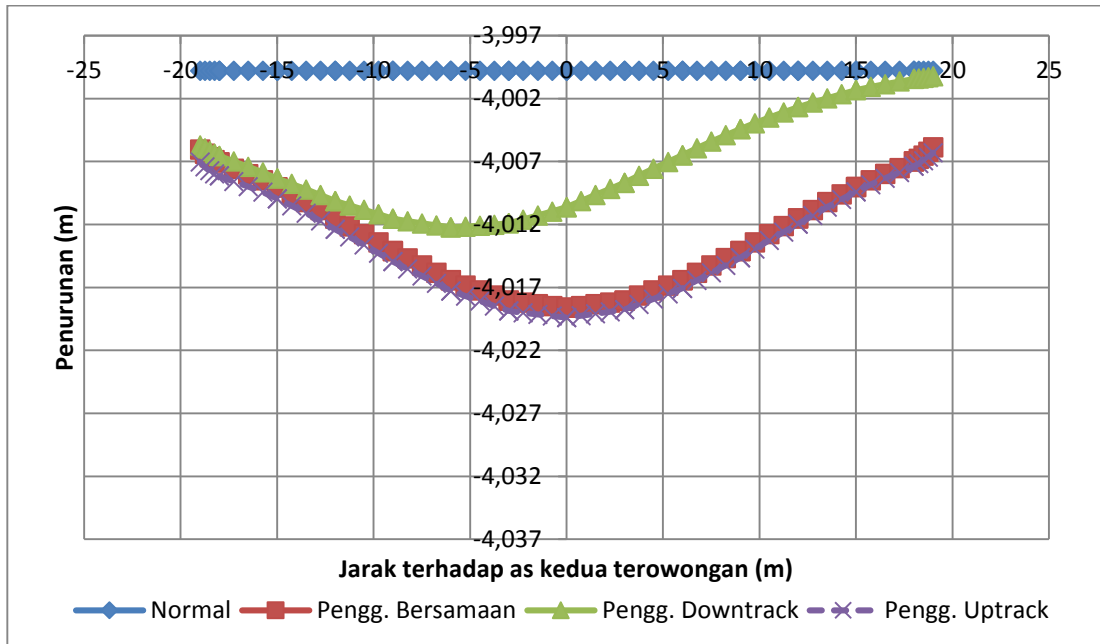
Panjang Tiang (m)	Penggalian		
	Bersamaan ΔU_y (mm)	D/T ΔU_y (mm)	U/T ΔU_y (mm)
20	7.263	6.427	7.269
22.5	9.900	8.897	9.952
25	12.744	11.992	13.091
27.5	15.566	15.515	16.545
30	18.929	17.913	19.524



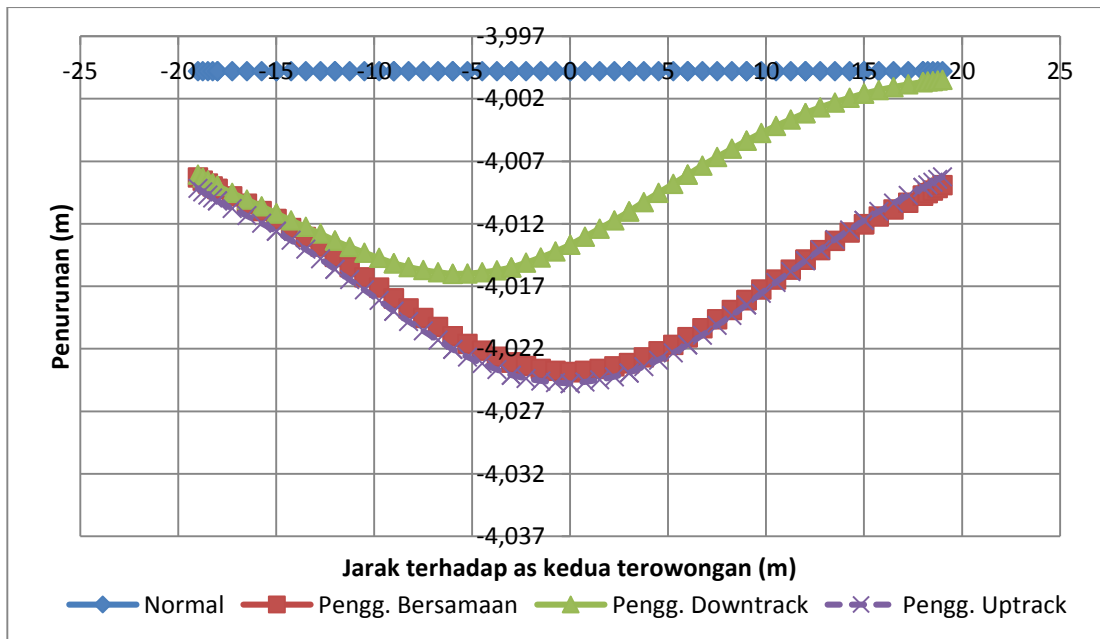
Gambar 5.21 Penurunan fondasi tiang-rakit dengan panjang tiang 20 m



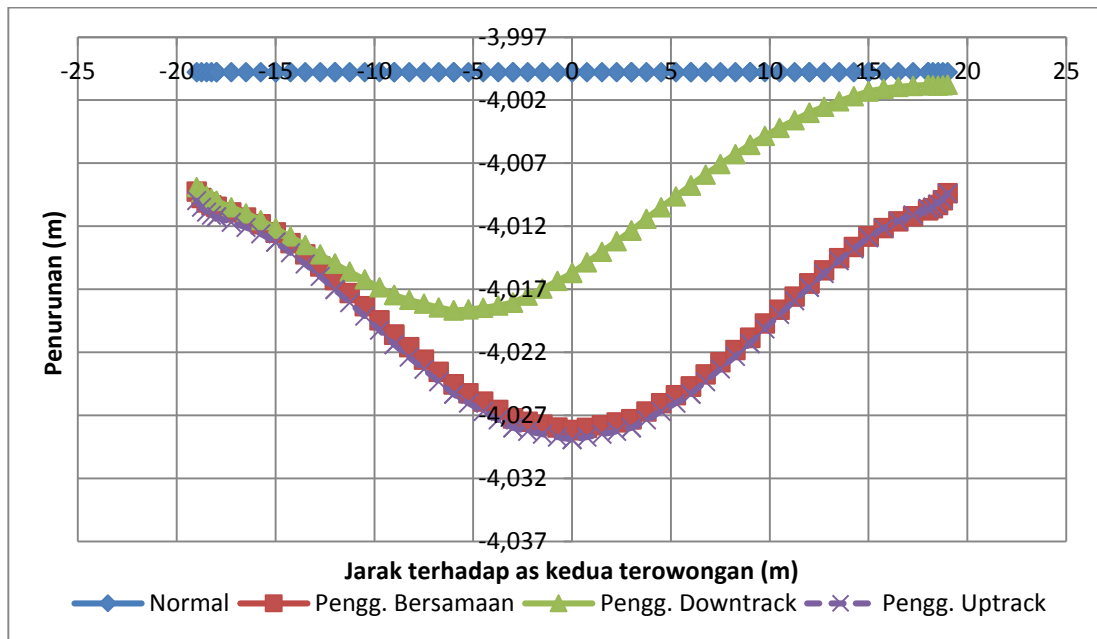
Gambar 5.22 Penurunan fondasi tiang-rakit dengan panjang tiang 22,5 m



Gambar 5.23 Penurunan fondasi tiang-rakit dengan panjang tiang 25 m



Gambar 5.24 Penurunan fondasi tiang-rakit dengan panjang tiang 27,5 m



Gambar 5.25 Penurunan fondasi tiang-rakit dengan panjang tiang 30 m

Dari Tabel 5.15 dan Tabel 5.16, penurunan terbesar (U_y) dan penurunan diferensial terbesar (ΔU_y) terjadi pada kasus penggalian terowongan secara bertahap dengan panjang tiang 30 m, yaitu masing-masing sebesar 29.129 mm dan 19.524 mm. Koordinat as dari kedua terowongan diatur pada titik (0,4) m. Penurunan akibat penggalian terowongan secara bersamaan lebih kecil nilainya dibandingkan dengan penggalian secara bertahap. Penggalian *downtrack* terlebih dahulu menunjukkan pola penurunan diferensial yang sangat tidak seragam seperti pada Gambar 5.21 hingga Gambar 5.25, namun nilai penurunan diferensial yang dihasilkan masih lebih kecil bila dibandingkan dengan setelah kedua terowongan digali. Seiring dengan panjang tiang yang semakin panjang, penurunan yang dihasilkan semakin besar. Hal ini menunjukkan jarak bersih antara tiang dengan terowongan mempengaruhi penurunan struktur yang ada di atasnya. Dari seluruh nilai penurunan dan penurunan diferensial yang terjadi, seluruhnya masih memenuhi syarat penurunan maksimum dari Skempton dan MacDonald (1956) sebesar 76 – 127 mm untuk fondasi rakit yang berada di tanah lempung.

BAB 6

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian mengenai studi perilaku terowongan bor ini adalah:

1. Pemodelan kekakuan terowongan sangat mempengaruhi gaya dalam dan deformasi yang terjadi pada terowongan. Pemodelan yang tidak sesuai dapat menimbulkan kekeliruan dalam proses produksi segmen terowongan maupun pelaksanaan konstruksi.
2. Jarak bersih antara struktur fondasi bangunan dengan terowongan mempengaruhi distribusi tegangan tanah yang dibebankan pada terowongan. Semakin kecil jarak antara struktur fondasi bangunan dengan terowongan, semakin besar gaya dalam yang dihasilkan.
3. Penggalan terowongan secara bersamaan, menghasilkan deformasi dan gaya-gaya dalam yang lebih kecil dibandingkan dengan penggalan terowongan secara bertahap. Hal ini membuktikan adanya pengaruh perbedaan antara penggalan kedua terowongan bersamaan dengan penggalan terowongan secara bertahap terhadap perilaku teknis dari terowongan.
4. Adanya air tanah meningkatkan beban tegangan yang diterima oleh terowongan, namun distribusi tegangan antarmuka terowongan yang dihasilkan lebih seragam dibandingkan dengan kasus terowongan tanpa pengaruh air tanah.
5. Perlunya perhitungan kebutuhan *grout pressure* secara akurat dalam menjaga stabilitas terowongan.
6. Dalam perancangan terowongan, diperlukan pertimbangan mengenai kedalaman terowongan dan diameter terowongan yang akan digali untuk memperkirakan stabilitas yang akan dicapai.

7. Penggalian terowongan secara bertahap menghasilkan penurunan dan beda penurunan rakit yang lebih besar dibandingkan dengan penggalian bersamaan.
8. Dari seluruh hasil yang didapatkan, disimpulkan bahwa semakin dekat terowongan bor dibangun terhadap struktur eksisting, semakin besar dampak yang dihasilkan terhadap struktur eksisting maupun terowongan tersebut.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka ada beberapa saran yang dapat dilakukan sebagai bentuk tindak lanjut untuk mengembangkan pengetahuan mengenai perilaku terowongan bor yang lain.

1. Penelitian mengenai interaksi tiang-terowongan sudah pernah dilakukan, namun yang dibahas pada umumnya adalah perilaku dari tiang. Dengan demikian, perlu dilakukan penelitian mengenai interaksi tiang-terowongan dengan memfokuskan penelitian pada perilaku terowongan dengan parameter lainnya.
2. Beban merata yang digunakan pada penelitian ini merupakan suatu pendekatan untuk pembebanan pada model. Pada kenyataannya, beban dari gedung tidak terdistribusi merata dan bersifat acak. Diharapkan untuk penelitian selanjutnya, komposisi beban dianalisis terlebih dahulu sehingga hasil yang didapatkan lebih realistis dan akurat.
3. PLAXIS 8.6 memodelkan galian terowongan secara *plane strain* (menerus, dengan panjang tak hingga), sehingga deformasi dan gaya dalam yang didapatkan adalah hasil setelah terowongan selesai digali. Dalam memodelkan perbedaan metode konstruksi dalam penggalian terowongan, diperlukan pendekatan yang lebih akurat dengan analisis tiga dimensi. Pada PLAXIS 3D, penggalian dapat dilakukan bertahap setiap penggalian per satuan panjang terowongan, sehingga deformasi dan gaya dalam yang terjadi saat penggalian dapat diamati.

DAFTAR PUSTAKA

- Ameratunga, J. (2016). *Correlation of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. Townsville: Springer.
- Broere, W. (2001). *Tunnel face Stability and New CPT Applications*. Netherlands: Delft University Press.
- BSI. (1994). *Patent No. BS 8002*. England.
- Hardiyatmo, H. (2012). *Mekanika Tanah 1*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hung, J. . (2009). *Technical Manual for Design and Constructon of Road Tunnels - Civil Elements*. New York: US Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Kolymbas, D. (2005). *Tunneling and Tunnel Mechanics*. Germany: Springer.
- Kriswanto, d. (2008). *Analisis Stabilitas Terowongan dengan Metode Elemen Hingga 2D dan 3D Studi Kasus Terowongan Panti Rao*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Kuesel, T. R. (1969). Earthquake Design Criteria for Subways. *Journal of the Structure Divisions ASCE* , 1213-1231.
- Natasya, B. (2011). *Studi Pemakaian Fondasi Tiang-Rakit Pada Sebuah Proyek Apartemen Di Jakarta Dengan Menggunakan Metode Konvensional Poulos Dan PLAXIS Dua Dimensi*. Depok: Universitas Indonesia.
- O'Rourke, T. D. (1984). *Guidelines for Tunnel Lining Design*. ASCE.
- Poulos, H. G. (2000). *Practical Design Procedures for Piled-Raft Foundations*. London: Thomas Telford Publishing.
- Rahardjo, P. P. (2004). *Teknik Terowongan*. Bandung: Geotechnical Engineering Center.

Skempton, A., & MacDonald, M. (1956). *The Allowable Settlements of Building*. London: Proceeding of Institution of Civil Engineer.

SOWJ. (2015). *Bored Tunnel Design for Design Section CP104-1*. Jakarta: PT.MRT Jakarta.

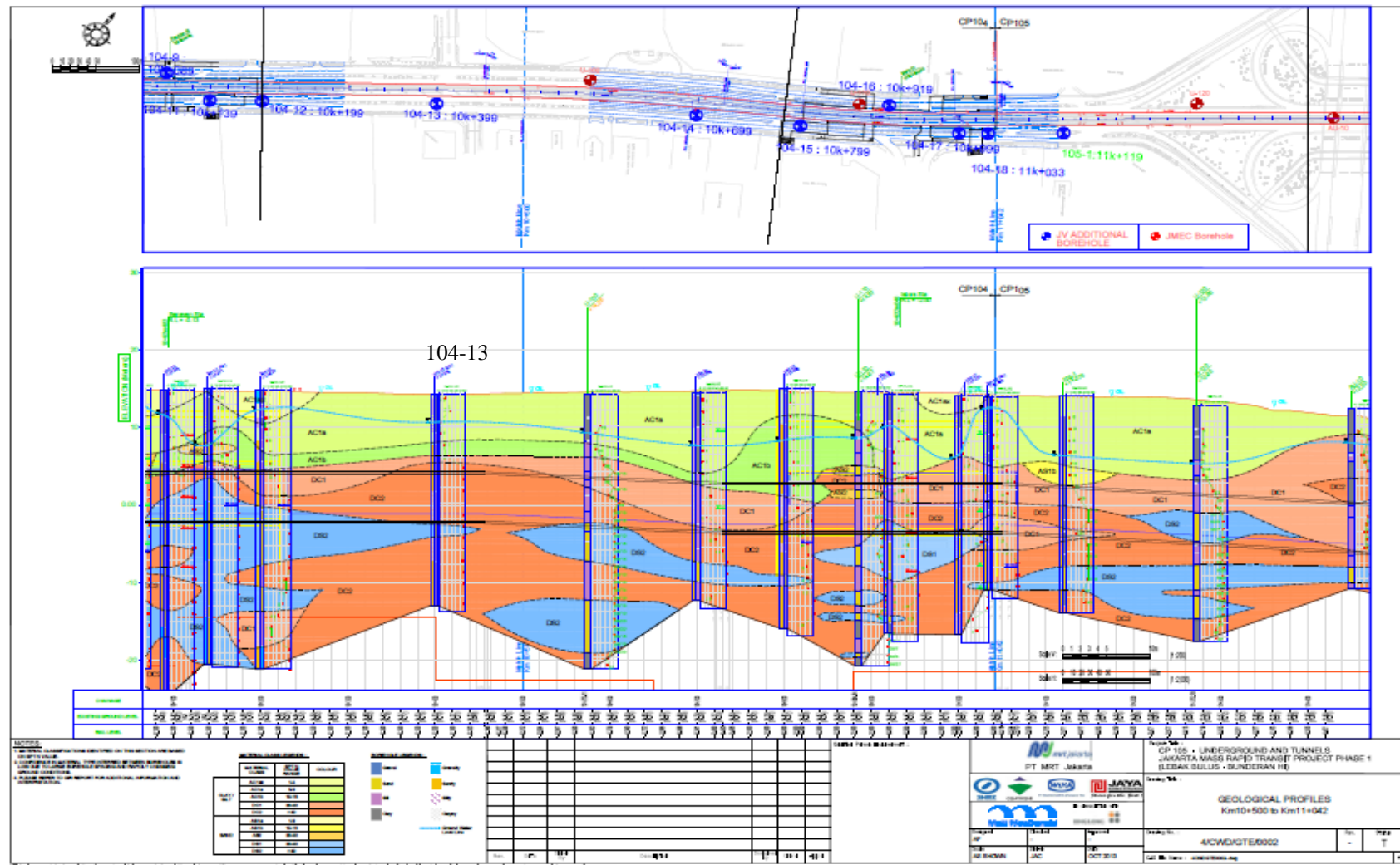
SOWJ. (2013). *Geotechnical Interpretative Report*. Jakarta: PT. MRT Jakarta.

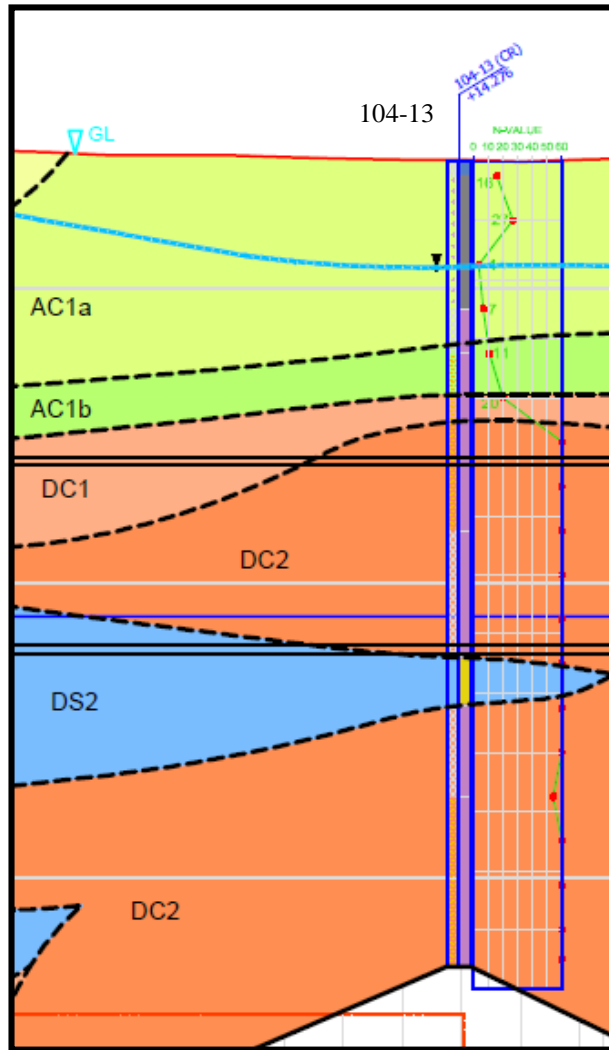
Suryolelono, K. B. (2004). *Teknik Fondasi*. Yogyakarta: Beta Offset.

Szechy. (1967). *The Art of Tunneling*. Budapest: Akademiai Kiado.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Geological Profiles CP 104-1 SOWJ-JV MRT Jakarta (km 10+500 – km 11+420)

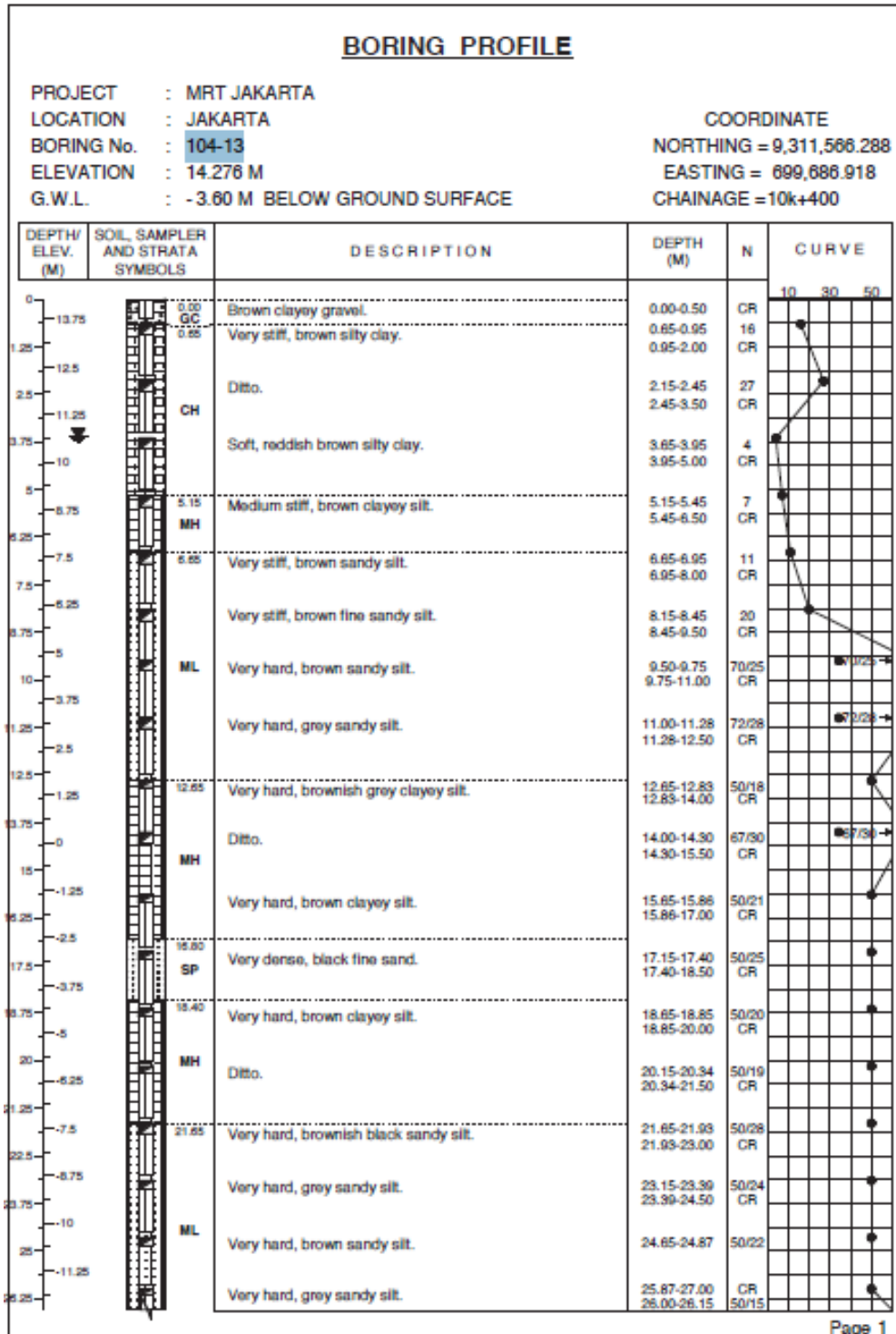





MATERIAL CLASS LEGENDS :				BOREHOLE LEGENDS :	
	MATERIAL CLASS	SPT N VALUE RANGE	COLOUR		
CLAY / SILT	AC1ax	1-4		Gravel	Gravelly
	AC1a	5-9		Sand	Sandy
	AC1b	10-19		Silt	Silty
	DC1	20-40		Clay	Clayey
	DC2	>40			Ground Water Level Line
SAND	AS1a	1-9			
	AS1b	10-19			
	AS2	20-40			
	DS1	20-40			
	DS2	>40			

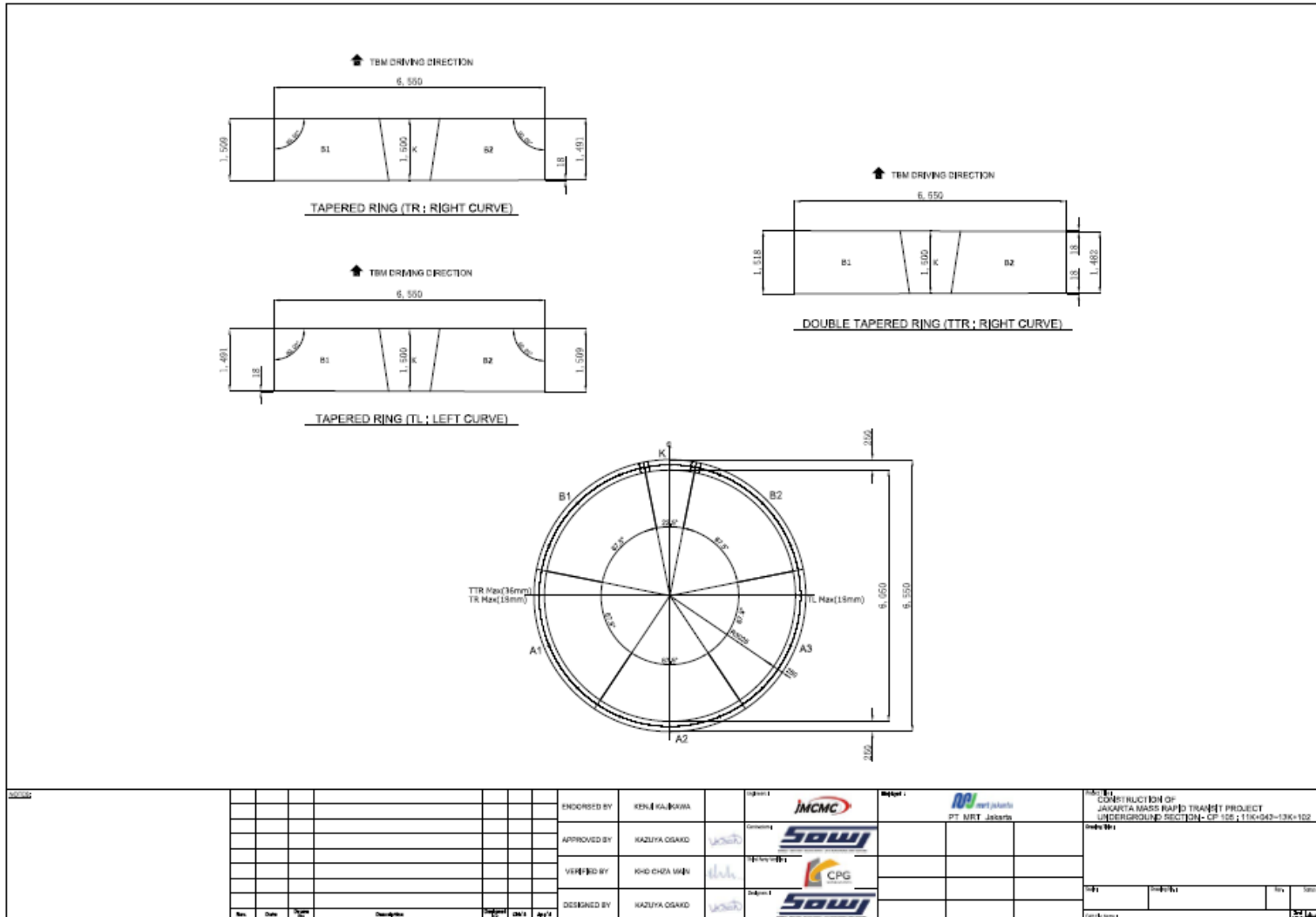
Detail interpretasi material *borelog* CP 104-13

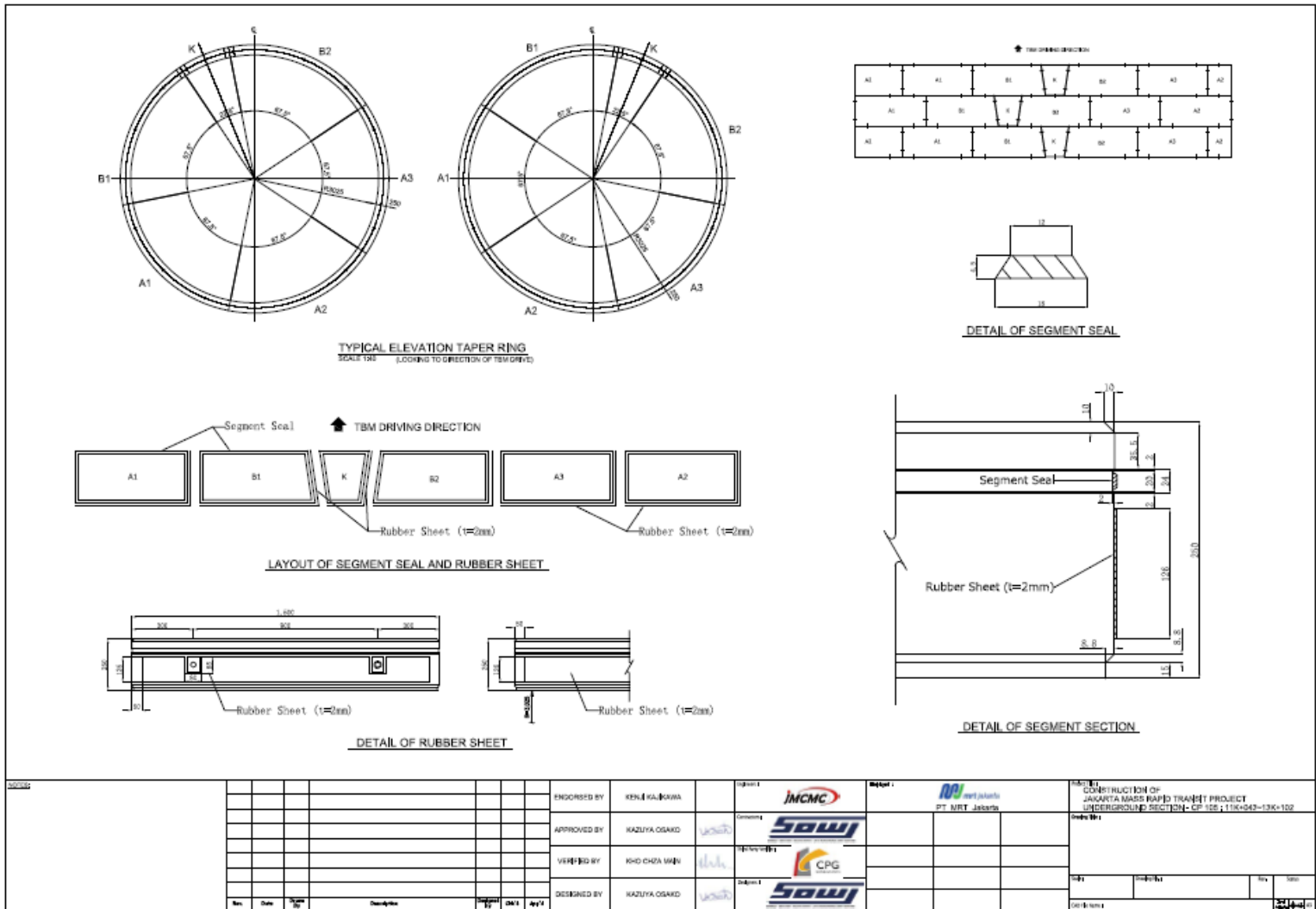
Lampiran 2 Boring Profile CP 104-1 no. 104-13



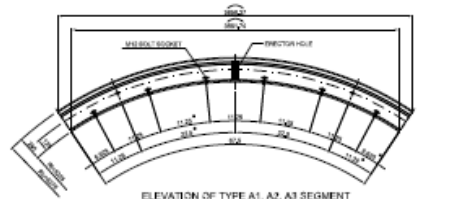
DEPTH/ ELEV. (M)	SOIL, SAMPLER AND STRATA SYMBOLS	DESCRIPTION	DEPTH (M)	N	CURVE		
					10	30	50
-12.5			26.15-27.00	CR 68/25			
27.5		27.25	27.00-27.25		68/25	68/25	
-13.75		Boring terminated at a depth of 27.25 m					
-15							
-16.25							
-17.5							
-18.75							
-20							
-21.25							
-22.5							
-23.75							
-25							
-26.25							
-27.5							
-28.75							
-30							
-31.25							
-32.5							
-33.75							
-35							
-36.25							
-37.5							
-38.75							
-40							
-41.25							
-42.5							
-43.75							

Lampiran 3 Segmental Construction Drawing

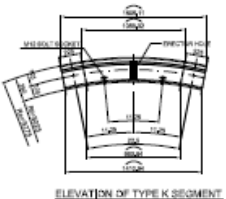




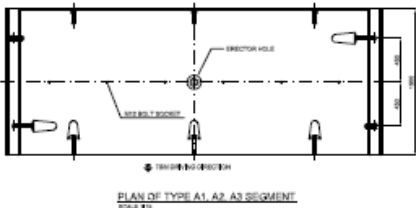
ENDORSED BY: KENILKA BOWA APPROVED BY: KAZUYA OSAKI VERIFIED BY: KHO CHA WEN DESIGNED BY: KAZUYA OSAKI				CLIENT: JMCNC CONTRACTOR: SOWJ SUBCONTRACTOR: CPG DESIGNER: SOWJ		PROJECT: PT MRT Jakarta TITLE: CONSTRUCTION OF JAKARTA MASS RAPID TRANSIT PROJECT UNDERGROUND SECTION- CP 102 ; 110x443-136x102 SHEET NO.: DATE: SCALE:	
Rev.	Date	By	Description	Checked By	App'd By	34/144	



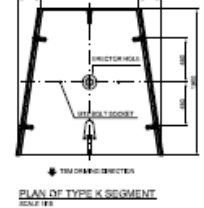
ELEVATION OF TYPE A1, A2, A3 SEGMENT
SCALE 1:20



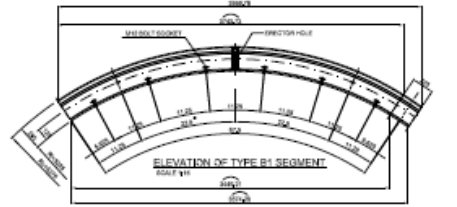
ELEVATION OF TYPE K SEGMENT
SCALE 1:20



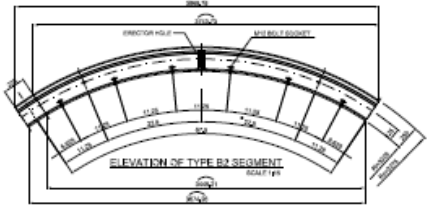
PLAN OF TYPE A1, A2, A3 SEGMENT
SCALE 1:20



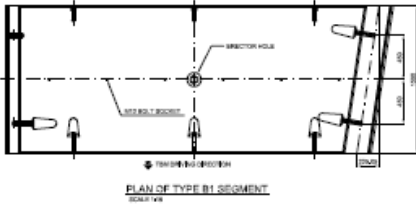
PLAN OF TYPE K SEGMENT
SCALE 1:20



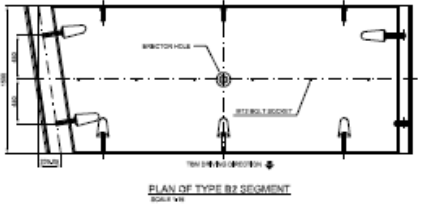
ELEVATION OF TYPE B1 SEGMENT
SCALE 1:20



ELEVATION OF TYPE B2 SEGMENT
SCALE 1:20

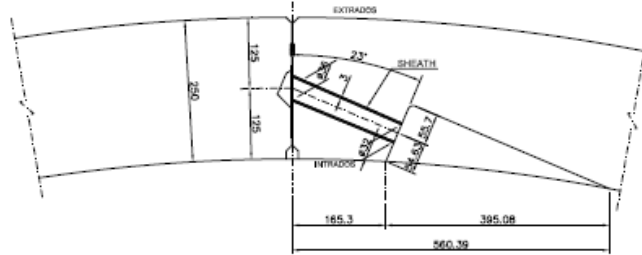


PLAN OF TYPE B1 SEGMENT
SCALE 1:20

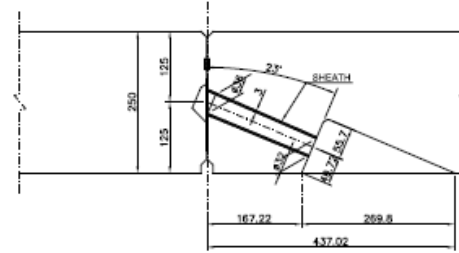


PLAN OF TYPE B2 SEGMENT
SCALE 1:20

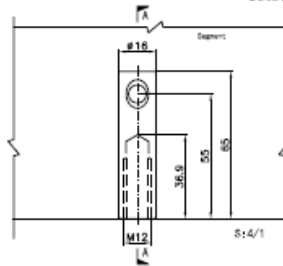
<table border="1"> <tr><td>Rev.</td><td>Date</td><td>Remark</td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>	Rev.	Date	Remark													ENGINEERED BY	KENJI KAIKAWA			PROJECT CONSTRUCTION OF JAKARTA MASS RAPID TRANSIT PROJECT UNDERGROUND SECTION - CP 102 ; 110K043-130K-102 DRAWING NO. SHEET NO. TOTAL SHEETS DATE DRAWN BY
	Rev.	Date	Remark																	
APPROVED BY	KAZUYA OSAKI																			
VERIFIED BY	KHO CHA UN																			
DESIGNED BY	KAZUYA OSAKI																			



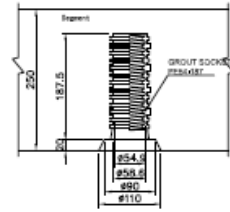
Detail for Radial Joint



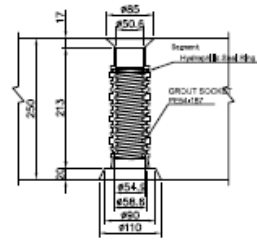
Detail for Circumferential Joint



M12 Bolt Socket
Material SUS 304



O-Ring
for Grout Plug

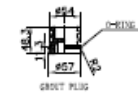


Segment (A1,A2,A3,K)
Ejector Hole for LR

#56.5

#3.55

Hydrophobic Seal Ring
for Grout Socket

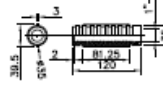


#56.5

#3.55



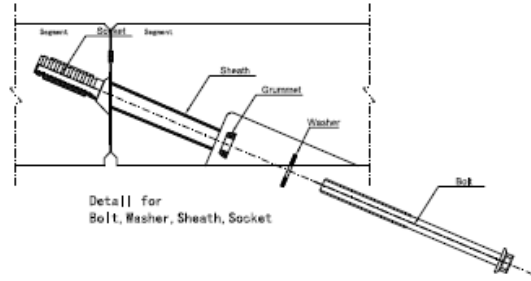
Segment (B1,B2)
Ejector Hole for LR and Grout



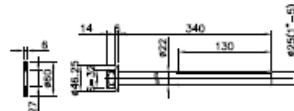
Socket T25-w20
Material PA-33%FG



Grummet D46-14
Material LDPE



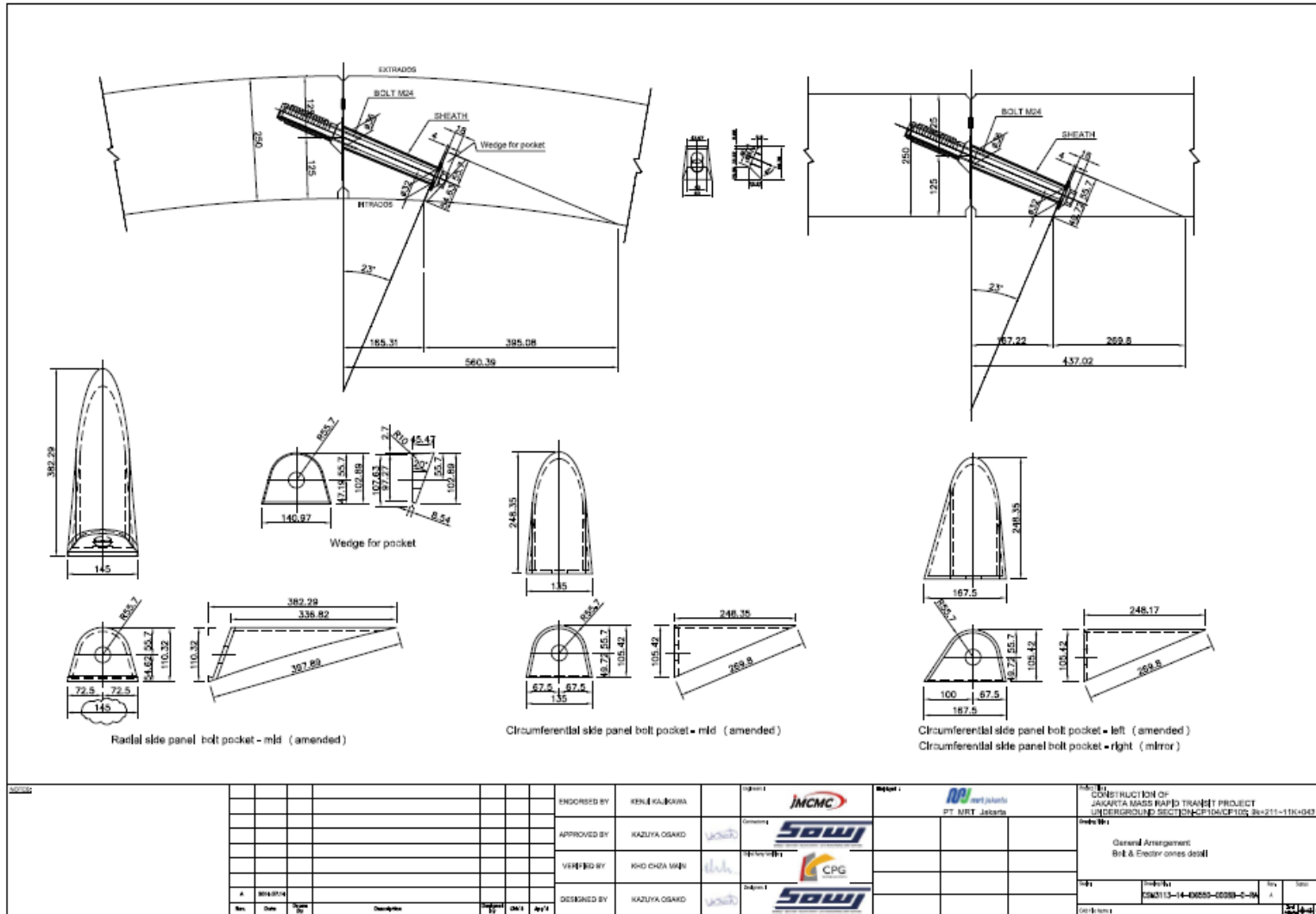
Detail for
Bolt, Washer, Sheath, Socket



Bolt T25-340 Material: 40Cr
(The Plug will be galvanized to BS EN ISO1461:1998)

No.	Date	Appr.	Description

ENDORSED BY	KEN KAJIUKAWA	Client		Support		PROJECT CONSTRUCTION OF JAKARTA MASS RAPID TRANSIT PROJECT UNDERGROUND SECTION-CP1&CP105 300x315-11K-048
APPROVED BY	KAZUYA OKANO	Contractor				Title General Arrangement Bolt & Ejector holes detail
CHECKED BY	RHO CHAI MOON	Client				No. 03M113-14-0000C-000A-3-09 Rev. A
DESIGNED BY	KAZUYA OKANO	Contractor				Date Issue 03/06/21



Lampiran 4 Perhitungan Validasi Data

1. Korelasi nilai N-SPT dengan Modulus Elastisitas untuk tanah kohesif

Lapisan 1 (Lempung Kelanauan, N = 5)

$$N_{60} = \frac{5 \times 78\% \times 1 \times 1 \times 0.75}{60} = 4.875$$

$$E = 1.2 \times 4.875 \times \frac{1000kN}{m^2} = 5850kN/m^2$$

Lapisan 2 (Lanau Kelempungan, N = 15)

$$N_{60} = \frac{15 \times 78\% \times 1 \times 1 \times 0.75}{60} = 14.625$$

$$E = 1.2 \times 14.625 \times \frac{1000kN}{m^2} = 17550kN/m^2$$

Lapisan 3 (Lanau Kepasiran, N = 25)

$$N_{60} = \frac{25 \times 78\% \times 1 \times 1 \times 0.75}{60} = 24.375$$

$$E = 1.2 \times 24.375 \times \frac{1000kN}{m^2} = 29250kN/m^2$$

Lapisan 4 dan 6 (Lanau Kelempungan, N = 45)

$$N_{60} = \frac{45 \times 78\% \times 1 \times 1 \times 0.75}{60} = 43.875$$

$$E = 1.2 \times 43.875 \times \frac{1000kN}{m^2} = 52650kN/m^2$$

2. Korelasi nilai N-SPT dengan Modulus Elastisitas untuk tanah non-kohesif

Lapisan 5 (Pasir Padat, N = 50)

$$E = 718 \times (1 - 0.35^2) \times 50 \times \frac{1000kN}{m^2} = 31502.25kN/m^2$$

3. Korelasi koefisien tekanan tanah lateral *at-rest* dengan sudut gesek tanah

Lapisan 1 (Lempung Kelanauan, $\phi = 28^\circ$)

$$K_0 = 1 - \sin 28^\circ = 0.531$$

Lapisan 2 (Lanau Kelempungan, $\phi = 28^\circ$)

$$K_0 = 1 - \sin 28^\circ = 0.531$$

Lapisan 3 (Lanau Kepasiran, $\phi = 32^\circ$)

$$K_0 = 1 - \sin 32^\circ = 0.470$$

Lapisan 4 dan 6 (Lanau Kelempungan, $\phi = 34^\circ$)

$$K_0 = 1 - \sin 34^\circ = 0.441$$

Lapisan 5 (Pasir Padat, $\phi = 37^\circ$)

$$K_0 = 1 - \sin 37^\circ = 0.398$$

4. Korelasi nilai c_u dengan N-SPT

Lapisan 1 (Lempung Kelanauan, $N_{60} = 4.875$)

$$c_u = 6 \times 4.875 = 29.25 \text{ MPa}$$

Lapisan 2 (Lanau Kelempungan, $N_{60} = 14.625$)

$$c_u = 6 \times 14.625 = 87.75 \text{ MPa}$$

Lapisan 3 (Lanau Kepasiran, $N_{60} = 24.375$)

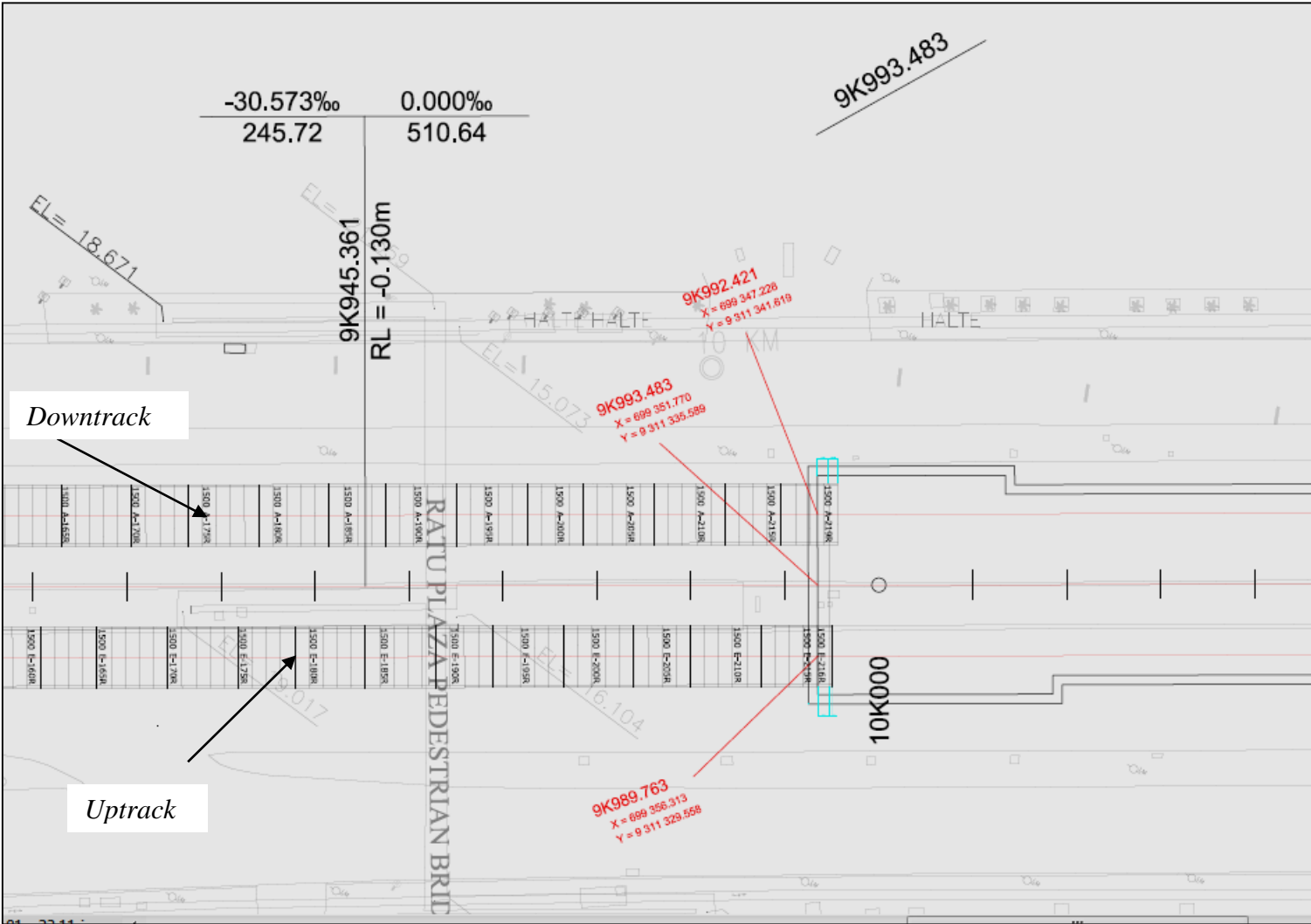
$$c_u = 6 \times 24.375 = 146.25 \text{ MPa}$$

Lapisan 4 dan 6 (Lanau Kelempungan, $N_{60} = 43.875$)

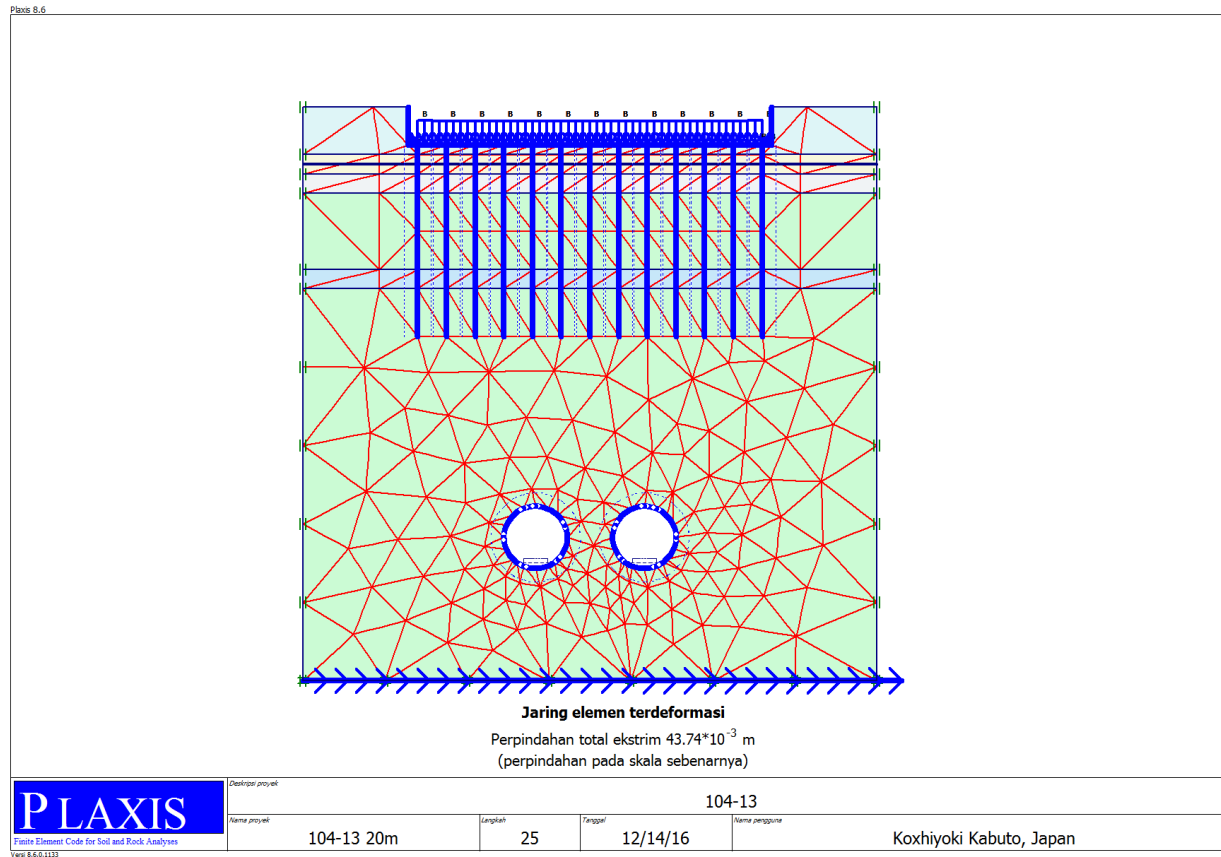
$$c_u = 6 \times 43.875 = 263.25 \text{ MPa}$$

Lampiran 5 Design parameters for general design SOWJ-JV

		SPT	unit weight	Cu	phi'	c'	Eu	E'	k	Ko
	Geo	N	kN/m3	kPa		kPa	MPa	MPa	m/s	
Clay / Silt	AC1ax*	1-4 (2)	18	12	22	1	150.Cu	E _v /1.2	1.E-07	1.0
	AC1a	5-9 (5)	18	30	28	5	250.Cu	E _v /1.2	1.E-07	0.7
	AC1b	10-19 (15)	18	80	28	10	400.Cu	E _v /1.2	1.E-07	0.7
	DC1	20-40 (25)	18	150	32	15	400.Cu	E _v /1.2	1.E-07	0.7
	DC2	>40 (45)	18	270	34	30	400.Cu	E _v /1.2	1.E-07	0.8
Sand	AS1a	1-9 (5)	18		30	0		2.N	1.E-05	0.5
	AS1b	10-19 (13)	18		32	0		2.N	1.E-05	0.5
	DS1	20-40 (25)	18		34	0		2.N	1.E-05	0.5
	DS2	>40 (50)	18.5		37	5		2.N	1.E-05	0.5

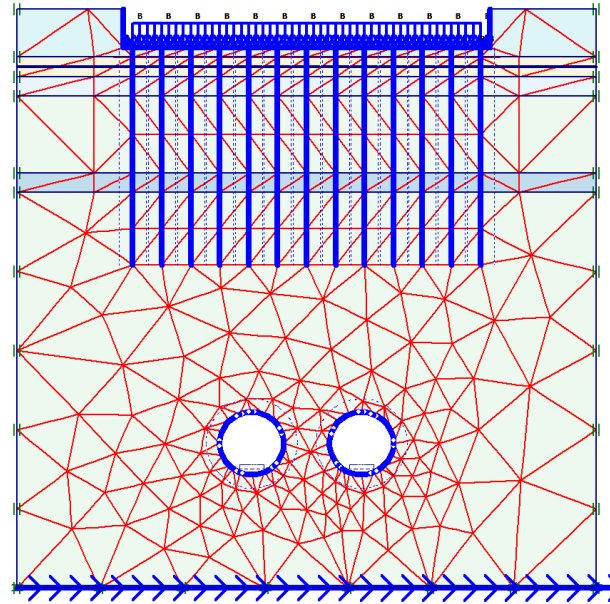


Lampiran 7 Model PLAXIS



Model terowongan dengan panjang tiang fondasi 20 m

Plaxis 8.6

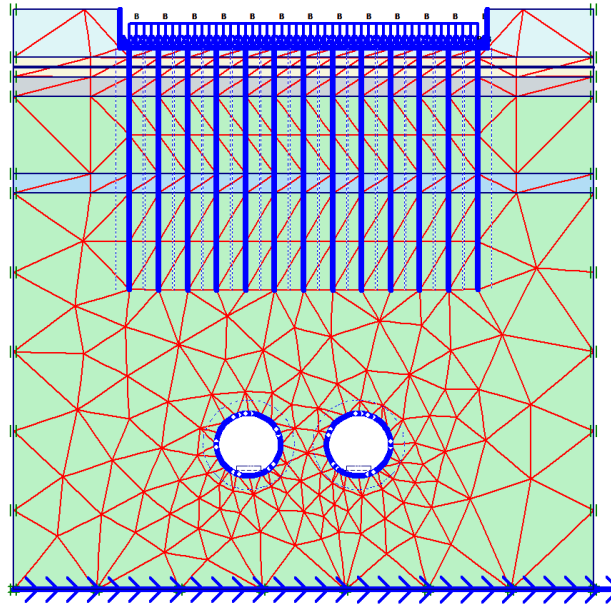


Jaring elemen terdeformasi
Perpindahan total ekstrim $53.26 \cdot 10^{-3}$ m
(perpindahan pada skala sebenarnya)

PLAXIS Finite Element Code for Soil and Rock Analyses Versi 8.6.0.1133	Deskripsi proyek	104-13					
	Nama proyek	104-13 22,5m	Langkah	30	Tanggal	12/14/16	Nama pengguna

Model terowongan dengan panjang tiang fondasi 22,5 m

Plaxis 8.6

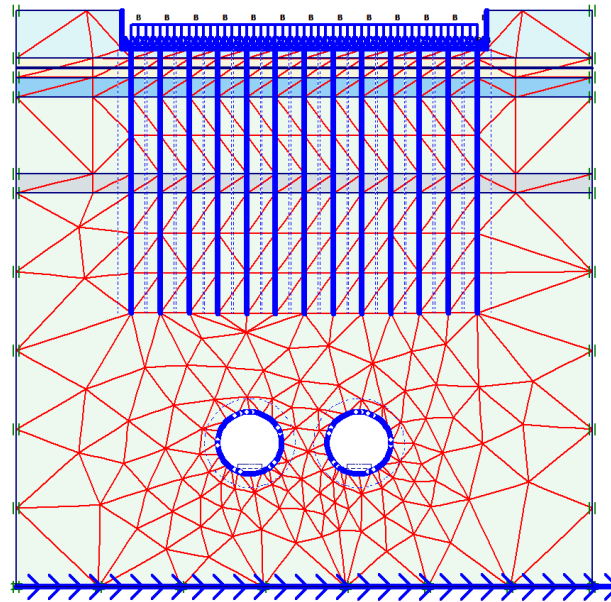


Jaring elemen terdeformasi

Perpindahan total ekstrim $64.56 \cdot 10^{-3}$ m
(perpindahan pada skala sebenarnya)

PLAXIS Finite Element Code for Soil and Rock Analysis Versi 8.6.0.1133	Deskripsi proyek	104-13					
	Nama proyek	104-13 25m	Langkah	33	Tanggal	12/14/16	Nama pengguna

Model terowongan dengan panjang tiang fondasi 25 m

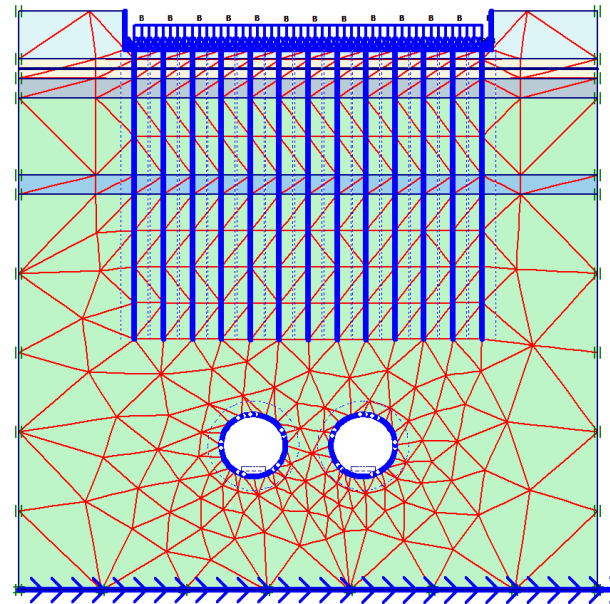


Jaring elemen terdeformasi
Perpindahan total ekstrim $76.96 \cdot 10^{-3}$ m
(perpindahan pada skala sebenarnya)

PLAXIS <small>Finite Element Code for Soil and Rock Analysis</small> <small>Veri 8.6.0.1133</small>	<small>Deskripsi proyek</small>	104-13		
	<small>Nama proyek</small>	<small>Langkah</small>	<small>Tanggal</small>	<small>Nama pengguna</small>
	104-13 27,5m	37	12/14/16	Koxhiyoki Kabuto, Japan

Model terowongan dengan panjang tiang fondasi 27,5 m

Plaxis 8.6



Jaring elemen terdeformasi
Perpindahan total ekstrim $86.42 \cdot 10^{-3}$ m
(perpindahan pada skala sebenarnya)

PLAXIS Finite Element Code for Soil and Rock Analyses Versi 8.6.0.1133	Deskripsi proyek				104-13		
	Nama proyek	104-13 30m	Langkah	36	Tanggal	12/14/16	Nama pengguna

Model terowongan dengan panjang tiang fondasi 30 m

Lampiran 8 Rekap hasil analisis

Penggalian Bersamaan

Deformasi terowongan (panjang tiang 20 m)

Titik	Θ	Downtrack		Uptrack	
	°	Deformasi (mm)			
		U_x (mm)	U_y (mm)	U_x (mm)	U_y (mm)
<i>Crown</i>	0	-9.602	-38.603	9.554	-38.685
<i>Spring Line 1</i>	90	15.286	-2.120	43.693	1.942
<i>Invert</i>	180	-4.776	27.264	4.773	27.282
<i>Spring Line 2</i>	270	-43.649	1.977	-15.349	-2.099

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 20 m)

Θ	Gaya Dalam					
	Downtrack			Uptrack		
	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-3174.363	-47.055	0.000	-3173.089	46.522	0.000
45	-3670.072	42.362	50.584	-3761.936	58.954	-67.019
90	-4282.027	66.417	-123.572	-4169.486	-14.884	0.000
135	-3847.633	-121.226	0.000	-3655.980	-15.066	-29.311
180	-3250.694	63.301	135.390	-3252.302	-62.672	135.333
225	-3653.440	13.238	-29.020	-3845.136	125.031	0.000
270	-4168.137	42.388	0.000	-4280.852	-68.834	-123.339
315	-3766.058	-60.522	-67.114	-3676.049	-37.864	50.558
<i>Max</i>	-4288.555	-126.030	152.830	-4288.367	125.890	152.873

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Deformasi terowongan (panjang tiang 22,5 m)

Titik	Θ	Downtrack		Uptrack	
	°	Deformasi (mm)			
		U_x (mm)	U_y (mm)	U_x (mm)	U_y (mm)
<i>Crown</i>	0	-11.947	-48.505	11.874	-48.558
<i>Spring Line 1</i>	90	18.517	-4.432	53.247	1.330
<i>Invert</i>	180	-5.866	31.335	5.880	31.388
<i>Spring Line 2</i>	270	-53.180	1.325	-18.589	-4.402

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 22,5 m)

Θ	Gaya Dalam					
	Downtrack			Uptrack		
°	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-3498.404	-55.567	0.000	-3497.250	55.610	0.000
45	-4092.416	52.603	63.325	-4215.503	74.628	-85.827
90	-4828.679	79.972	-149.912	-4683.071	-23.049	0.000
135	-4300.027	-145.345	0.000	-4044.050	-14.642	-30.396
180	-3572.077	75.787	160.846	-3574.156	-75.068	160.801
225	-4040.127	12.492	-30.042	-4297.482	150.105	0.000
270	-4680.476	56.922	0.000	-4827.630	-82.915	-149.723
315	-4220.035	-76.576	-85.964	-4099.689	-47.107	63.336
Max	-4835.922	-151.885	181.810	-4836.097	151.802	181.908

*Putaran searah jarum jam dari crown

Deformasi terowongan (panjang tiang 25 m)

Titik	Θ	Downtrack		Uptrack	
		Deformasi (mm)			
	°	Ux (mm)	Uy (mm)	Ux (mm)	Uy (mm)
Crown	0	-14.502	-60.073	14.660	-60.050
Spring Line 1	90	22.368	-7.100	64.447	0.463
Invert	180	-7.234	36.157	7.204	36.082
Spring Line 2	270	-64.558	0.412	-22.227	-7.179

*Putaran searah jarum jam dari crown

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 25 m)

Θ	Gaya Dalam					
	Downtrack			Uptrack		
°	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-3875.645	-70.903	0.000	-3878.006	67.790	0.000
45	-4589.508	64.051	76.866	-4739.141	92.589	-105.752
90	-5465.919	95.879	-180.430	-5278.140	-32.433	0.000
135	-4823.881	-173.857	0.000	-4492.186	-12.887	-33.162
180	-3942.149	90.553	191.583	-3946.929	-89.374	190.884
225	-4490.010	11.735	-32.833	-4824.168	179.642	0.000
270	-5278.657	72.922	0.000	-5463.564	-99.664	-180.148
315	-4741.805	-95.048	-106.114	-4595.430	-57.278	77.539
Max	-5473.480	-182.131	216.666	-5473.354	182.354	216.021

*Putaran searah jarum jam dari crown

Deformasi terowongan (panjang tiang 27,5 m)

Titik	Θ	Downtrack		Uptrack	
		Deformasi (mm)			
	$^{\circ}$	U_x (mm)	U_y (mm)	U_x (mm)	U_y (mm)
<i>Crown</i>	0	-17.314	-72.793	17.441	-72.576
<i>Spring Line 1</i>	90	26.406	-10.142	76.751	-0.871
<i>Invert</i>	180	-8.799	41.201	8.747	41.030
<i>Spring Line 2</i>	270	-76.959	-0.922	-26.199	-10.310

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 27,5 m)

Θ	Gaya Dalam					
	Downtrack			Uptrack		
	$^{\circ}$	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)
0	-4314.846	-80.845	0.000	-4319.070	78.967	0.000
45	-5157.397	74.589	88.993	-5322.908	110.671	-125.627
90	-6177.739	113.506	-212.755	-5945.516	-40.823	0.000
135	-5412.927	-205.075	0.000	-5002.209	-10.857	-39.637
180	-4364.075	106.247	225.856	-4370.140	-105.201	224.721
225	-4999.580	8.943	-39.747	-5413.794	212.047	0.000
270	-5947.140	88.224	0.000	-6174.430	-117.935	-212.762
315	-5325.725	-113.481	-125.179	-5162.154	-66.793	90.997
<i>Max</i>	-6185.607	-215.122	255.198	-6185.099	215.546	254.266

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Deformasi terowongan (panjang tiang 30 m)

Titik	Θ	Downtrack		Uptrack	
		Deformasi (mm)			
	$^{\circ}$	U_x (mm)	U_y (mm)	U_x (mm)	U_y (mm)
<i>Crown</i>	0	-19.160	-81.679	18.987	-81.896
<i>Spring Line 1</i>	90	29.108	-12.648	86.401	-1.906
<i>Invert</i>	180	-10.068	45.002	10.073	45.008
<i>Spring Line 2</i>	270	-86.363	-1.794	-29.257	-12.623

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 30 m)

Θ	Gaya Dalam					
	<i>Downtrack</i>			<i>Uptrack</i>		
°	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-4980.633	-92.051	0.000	-4981.421	88.859	0.000
45	-5904.931	83.198	100.705	-6080.099	124.243	-140.338
90	-7026.299	127.047	-237.764	-6776.043	-45.754	0.000
135	-6170.249	-228.860	0.000	-5710.613	-18.135	-37.934
180	-4991.675	118.509	251.091	-4996.838	-117.533	250.941
225	-5703.145	15.230	-36.253	-6166.500	236.586	0.000
270	-6771.087	100.119	0.000	-7024.731	-131.620	-237.070
315	-6087.296	-127.610	-141.568	-5917.523	-73.717	100.297
<i>Max</i>	-7034.524	-240.743	283.838	-7034.884	240.396	284.046

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Penggalian Bertahap

Deformasi terowongan (panjang tiang 20 m, penggalian *downtrack*)

Titik	Θ	<i>Downtrack</i>	
		Deformasi (mm)	
	°	<i>U_x</i> (mm)	<i>U_y</i> (mm)
<i>Crown</i>	0	-0.891	-43.566
<i>Spring Line 1</i>	90	30.143	-0.228
<i>Invert</i>	180	3.411	32.179
<i>Spring Line 2</i>	270	-39.031	2.544

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 20 m, penggalian *downtrack*)

Θ	Gaya Dalam		
	<i>Downtrack</i>		
°	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-3028.557	-63.151	0.000
45	-3510.078	56.557	97.049
90	-4206.591	90.188	-193.626
135	-3692.482	-160.966	0.000
180	-3105.546	82.864	162.607
225	-3576.594	16.781	-46.171
270	-4106.209	38.414	0.000
315	-3669.785	-63.074	-66.675
<i>Max</i>	-4211.728	-164.594	189.740

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Deformasi terowongan (panjang tiang 20 m, penggalian *uptrack*)

Titik	Θ	<i>Downtrack</i>		<i>Uptrack</i>	
		Deformasi (mm)			
	°	<i>U_x (mm)</i>	<i>U_y (mm)</i>	<i>U_x (mm)</i>	<i>U_y(mm)</i>
<i>Crown</i>	0	-9.425	-39.105	8.365	-39.998
<i>Spring Line 1</i>	90	15.763	-2.249	43.291	2.091
<i>Invert</i>	180	-4.509	27.338	3.193	27.460
<i>Spring Line 2</i>	270	-43.499	1.933	-12.887	-2.288

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 20 m, penggalian *uptrack*)

Θ	Gaya Dalam					
	<i>Downtrack</i>			<i>Uptrack</i>		
°	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-3168.327	-45.400	0.000	-3154.518	54.203	0.000
45	-3667.977	41.968	51.558	-3747.003	60.009	-67.869
90	-4284.212	67.724	-126.286	-4156.661	-12.169	0.000
135	-3846.740	-122.915	0.000	-3641.186	-17.429	-36.266
180	-3248.585	64.295	136.115	-3232.546	-70.953	147.209
225	-3647.758	11.967	-30.745	-3827.922	139.972	0.000
270	-4163.278	41.786	0.000	-4235.371	-76.799	-151.288
315	-3757.940	-61.052	-64.682	-3649.832	-44.365	69.352
<i>Max</i>	-4290.867	-127.886	154.044	-4245.720	141.629	168.708

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Deformasi terowongan (panjang tiang 22,5 m, penggalian *downtrack*)

Titik	Θ	<i>Downtrack</i>	
		Deformasi (mm)	
	°	<i>U_x (mm)</i>	<i>U_y (mm)</i>
<i>Crown</i>	0	-1.435	-54.612
<i>Spring Line 1</i>	90	36.723	-1.576
<i>Invert</i>	180	4.407	37.647
<i>Spring Line 2</i>	270	-47.235	2.246

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 22,5 m, penggalian *downtrack*)

Θ	Gaya Dalam		
	<i>Downtrack</i>		
$^{\circ}$	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-3318.299	-75.363	0.000
45	-3895.796	66.871	113.303
90	-4729.300	108.998	-232.856
135	-4104.917	-193.000	0.000
180	-3390.145	98.913	193.546
225	-3938.598	14.520	-53.487
270	-4595.303	50.698	0.000
315	-4092.478	-77.992	-82.695
<i>Max</i>	-4734.856	-197.966	226.066

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Deformasi terowongan (panjang tiang 22,5 m, penggalian *uptrack*)

Titik	Θ	<i>Downtrack</i>		<i>Uptrack</i>	
		Deformasi (mm)			
	$^{\circ}$	<i>U_x</i> (mm)	<i>U_y</i> (mm)	<i>U_x</i> (mm)	<i>U_y</i> (mm)
<i>Crown</i>	0	-11.793	-49.762	10.610	-50.181
<i>Spring Line 1</i>	90	19.259	-4.529	52.826	1.466
<i>Invert</i>	180	-5.480	31.519	4.006	31.568
<i>Spring Line 2</i>	270	-52.900	1.338	-15.429	-4.776

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 22,5 m, penggalian *uptrack*)

Θ	Gaya Dalam					
	<i>Downtrack</i>			<i>Uptrack</i>		
$^{\circ}$	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-3489.617	-54.141	0.000	-3476.822	65.047	0.000
45	-4089.980	49.632	58.338	-4199.074	75.843	-86.733
90	-4828.475	81.705	-151.615	-4668.151	-19.730	0.000
135	-4297.190	-146.881	0.000	-4026.039	-17.477	-38.768
180	-3568.134	76.416	161.572	-3550.477	-85.098	175.158
225	-4028.345	8.333	-34.856	-4277.822	168.365	0.000
270	-4668.173	55.049	0.000	-4773.609	-92.801	-183.574
315	-4202.211	-75.814	-80.518	-4068.862	-54.730	85.966
<i>Max</i>	-4835.964	-153.474	182.914	-4785.598	171.087	201.066

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Deformasi terowongan (panjang tiang 25 m, penggalian *downtrack*)

Titik	Θ	<i>Downtrack</i>	
		Deformasi (mm)	
	°	<i>U_x</i> (mm)	<i>U_y</i> (mm)
<i>Crown</i>	0	-1.893	-67.830
<i>Spring Line 1</i>	90	44.601	-3.061
<i>Invert</i>	180	5.596	44.122
<i>Spring Line 2</i>	270	-57.122	1.560

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 25 m, penggalian *downtrack*)

Θ	Gaya Dalam		
	<i>Downtrack</i>		
°	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-3660.183	-90.933	0.000
45	-4352.162	78.100	128.440
90	-5338.211	130.934	-277.291
135	-4582.518	-230.256	0.000
180	-3718.653	117.525	230.114
225	-4358.536	9.010	-68.389
270	-5164.453	64.146	0.000
315	-4579.636	-93.641	-102.936
<i>Max</i>	-5343.714	-236.412	268.869

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Deformasi terowongan (panjang tiang 25 m, penggalian *uptrack*)

Titik	Θ	<i>Downtrack</i>		<i>Uptrack</i>	
		Deformasi (mm)			
	°	<i>U_x</i> (mm)	<i>U_y</i> (mm)	<i>U_x</i> (mm)	<i>U_y</i> (mm)
<i>Crown</i>	0	-14.382	-62.423	13.383	-61.976
<i>Spring Line 1</i>	90	23.513	-7.084	64.012	0.634
<i>Invert</i>	180	-6.601	36.513	4.997	36.258
<i>Spring Line 2</i>	270	-64.154	0.371	-18.165	-7.800

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 25 m, penggalian *uptrack*)

Θ	Gaya Dalam					
	<i>Downtrack</i>			<i>Uptrack</i>		
°	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-3867.665	-65.795	0.000	-3856.105	77.794	0.000
45	-4587.451	58.034	63.192	-4721.292	93.924	-106.698
90	-5462.068	98.030	-180.087	-5260.745	-28.379	0.000
135	-4818.843	-174.737	0.000	-4470.634	-16.498	-43.081
180	-3937.188	90.440	191.653	-3919.078	-101.457	208.046
225	-4469.955	1.211	-45.789	-4802.332	201.682	0.000
270	-5255.565	69.731	0.000	-5399.879	-111.618	-220.936
315	-4714.891	-91.333	-100.718	-4559.188	-66.224	104.910
<i>Max</i>	-5470.032	-182.905	216.936	-5414.098	205.683	238.979

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Deformasi terowongan (panjang tiang 27,5 m, penggalian *downtrack*)

Titik	Θ	<i>Downtrack</i>	
		Deformasi (mm)	
	°	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>
<i>Crown</i>	0	-2.195	-81.858
<i>Spring Line 1</i>	90	53.068	-4.860
<i>Invert</i>	180	6.848	50.912
<i>Spring Line 2</i>	270	-67.955	0.339

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 27,5 m, penggalian *downtrack*)

Θ	Gaya Dalam		
	<i>Downtrack</i>		
°	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-4057.293	-100.411	0.000
45	-4873.935	90.651	147.964
90	-6022.187	154.627	-326.262
135	-5122.854	-271.079	0.000
180	-4097.527	137.858	270.360
225	-4839.387	5.183	-89.272
270	-5804.052	77.168	0.000
315	-5128.361	-108.942	-124.762
<i>Max</i>	-6027.391	-278.483	315.907

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Deformasi terowongan (panjang tiang 27,5 m, penggalian *uptrack*)

Titik	Θ	<i>Downtrack</i>		<i>Uptrack</i>	
		Deformasi (mm)			
	°	<i>U_x (mm)</i>	<i>U_y (mm)</i>	<i>U_x (mm)</i>	<i>U_y(mm)</i>
<i>Crown</i>	0	-17.103	-75.637	16.031	-74.638
<i>Spring Line 1</i>	90	27.917	-10.043	76.173	-0.558
<i>Invert</i>	180	-7.869	41.705	6.122	41.278
<i>Spring Line 2</i>	270	-76.432	-1.073	-21.222	-11.064

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 27,5 m, penggalian *uptrack*)

Θ	Gaya Dalam					
	<i>Downtrack</i>			<i>Uptrack</i>		
	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-4305.032	-71.435	0.000	-4293.747	90.442	0.000
45	-5152.854	67.498	72.374	-5301.730	112.261	-126.451
90	-6172.667	115.942	-212.266	-5924.003	-35.930	0.000
135	-5407.488	-205.701	0.000	-4976.148	-15.297	-51.131
180	-4359.924	105.838	224.853	-4337.163	-119.400	244.602
225	-4973.705	-4.242	-62.163	-5387.669	237.702	0.000
270	-5913.993	84.029	0.000	-6097.609	-131.836	-260.492
315	-5291.426	-106.241	-122.599	-5117.532	-77.376	123.285
<i>Max</i>	-6181.130	-215.752	254.469	-6113.642	242.685	280.998

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Deformasi terowongan (panjang tiang 30 m, penggalian *downtrack*)

Titik	Θ	<i>Downtrack</i>	
		Deformasi (mm)	
	°	<i>U_x (mm)</i>	<i>U_y (mm)</i>
<i>Crown</i>	0	-2.021	-90.214
<i>Spring Line 1</i>	90	58.626	-6.880
<i>Invert</i>	180	7.297	55.501
<i>Spring Line 2</i>	270	-76.598	-0.784

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 30 m, penggalian *downtrack*)

Θ	Gaya Dalam		
	<i>Downtrack</i>		
$^{\circ}$	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-4688.634	-122.267	0.000
45	-5590.309	107.773	185.146
90	-6863.218	172.037	-369.573
135	-5850.344	-304.263	0.000
180	-4697.333	155.415	302.824
225	-5534.671	13.959	-78.630
270	-6634.286	91.009	0.000
315	-5884.853	-132.376	-138.449
<i>Max</i>	-6867.588	-313.180	354.087

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Deformasi terowongan (panjang tiang 30 m, penggalian *uptrack*)

Titik	Θ	<i>Downtrack</i>		<i>Uptrack</i>	
		Deformasi (mm)			
	$^{\circ}$	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>	<i>Ux (mm)</i>	<i>Uy (mm)</i>
<i>Crown</i>	0	-18.809	-82.989	16.912	-84.356
<i>Spring Line 1</i>	90	30.229	-12.893	85.567	-1.613
<i>Invert</i>	180	-9.311	45.132	6.913	45.440
<i>Spring Line 2</i>	270	-86.033	-2.203	-24.306	-13.278

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 30 m, penggalian *uptrack*)

Θ	Gaya Dalam					
	<i>Downtrack</i>			<i>Uptrack</i>		
$^{\circ}$	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-4966.666	-89.510	0.000	-4946.051	102.416	0.000
45	-5900.143	81.386	102.021	-6050.962	125.903	-141.249
90	-7032.067	129.547	-243.077	-6748.776	-40.045	0.000
135	-6171.307	-231.884	0.000	-5677.875	-22.558	-51.925
180	-4991.766	119.707	252.013	-4955.721	-133.434	273.372
225	-5684.179	3.753	-48.073	-6130.800	264.601	0.000
270	-6755.399	98.501	0.000	-6934.239	-146.443	-289.289
315	-6066.616	-128.957	-135.690	-5864.415	-85.272	134.496
<i>Max</i>	-7040.701	-244.207	285.515	-6949.829	269.699	314.065

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Pengaruh beban permukaan saja

Deformasi terowongan (panjang tiang 20 m)

Titik	Θ	Downtrack		Uptrack	
		Deformasi (mm)			
	°	U_x (mm)	U_y (mm)	U_x (mm)	U_y (mm)
<i>Crown</i>	0	-0.722	-3.141	0.721	-3.145
<i>Spring Line 1</i>	90	1.092	-0.619	3.072	-0.158
<i>Invert</i>	180	-0.348	1.452	0.348	1.453
<i>Spring Line 2</i>	270	-3.071	-0.158	-1.094	-0.619

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 20 m)

Θ	Gaya Dalam					
	Downtrack			Uptrack		
	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-133.726	-3.558	0.000	-133.657	3.528	0.000
45	-165.905	3.453	4.142	-176.674	4.697	-5.792
90	-207.553	4.479	-8.701	-198.308	-2.125	0.000
135	-175.964	-8.139	0.000	-159.149	-0.452	-0.972
180	-133.724	4.211	8.828	-133.895	-4.157	8.820
225	-159.013	0.360	-0.961	-175.847	8.410	0.000
270	-198.237	3.988	0.000	-207.463	-4.645	-8.687
315	-176.923	-4.789	-5.805	-166.291	-3.115	4.148
<i>Max</i>	-207.732	-8.582	-10.380	-207.726	8.579	-10.372

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Deformasi terowongan (panjang tiang 22,5 m)

Titik	Θ	Downtrack		Uptrack	
		Deformasi (mm)			
	°	U_x (mm)	U_y (mm)	U_x (mm)	U_y (mm)
<i>Crown</i>	0	-0.758	-3.265	0.758	-3.267
<i>Spring Line 1</i>	90	1.125	-0.662	3.173	-0.160
<i>Invert</i>	180	-0.358	1.486	0.358	1.486
<i>Spring Line 2</i>	270	-3.173	-0.160	-1.126	-0.662

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 22,5 m)

Θ	Gaya Dalam					
	<i>Downtrack</i>			<i>Uptrack</i>		
$^{\circ}$	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-134.698	-3.708	0.000	-134.662	3.647	0.000
45	-167.764	3.609	4.379	-179.354	4.939	-6.130
90	-210.981	4.628	-9.033	-200.985	-2.322	0.000
135	-178.438	-8.384	0.000	-160.294	-0.376	-0.858
180	-134.594	4.324	9.040	-134.790	-4.264	9.026
225	-160.150	0.286	-0.844	-178.331	8.669	0.000
270	-200.912	4.276	0.000	-210.884	-4.800	-9.018
315	-179.604	-5.035	-6.150	-168.151	-3.257	4.385
<i>Max</i>	-211.189	-8.873	-10.76	-211.179	8.870	-10.7528

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Deformasi terowongan (panjang tiang 25 m)

Titik	Θ	<i>Downtrack</i>		<i>Uptrack</i>	
		Deformasi (mm)			
	$^{\circ}$	<i>U_x (mm)</i>	<i>U_y (mm)</i>	<i>U_x (mm)</i>	<i>U_y (mm)</i>
<i>Crown</i>	0	-0.792	-3.381	0.793	-3.386
<i>Spring Line 1</i>	90	1.157	-0.708	3.276	-0.166
<i>Invert</i>	180	-0.371	1.518	0.370	1.517
<i>Spring Line 2</i>	270	-3.277	-0.166	-1.157	-0.708

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 25 m)

Θ	Gaya Dalam					
	<i>Downtrack</i>			<i>Uptrack</i>		
$^{\circ}$	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-136.298	-3.922	0.000	-136.169	3.793	0.000
45	-170.081	3.801	4.635	-182.287	5.162	-6.442
90	-214.768	4.782	-9.370	-203.961	-2.534	0.000
135	-181.233	-8.641	0.000	-161.767	-0.322	-0.760
180	-135.755	4.442	9.271	-135.962	-4.379	9.255
225	-161.636	0.230	-0.749	-181.128	8.939	0.000
270	-203.909	4.541	0.000	-214.651	-4.961	-9.349
315	-182.540	-5.270	-6.477	-170.461	-3.414	4.632
<i>Max</i>	-215.000	-9.174	-11.152	-214.975	9.171	-11.138

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Deformasi terowongan (panjang tiang 27,5 m)

Titik	Θ	Downtrack		Uptrack	
		Deformasi (mm)			
	$^{\circ}$	U_x (mm)	U_y (mm)	U_x (mm)	U_y (mm)
<i>Crown</i>	0	-0.817	-3.489	0.820	-3.488
<i>Spring Line 1</i>	90	1.184	-0.751	3.368	-0.176
<i>Invert</i>	180	-0.384	1.542	0.384	1.542
<i>Spring Line 2</i>	270	-3.369	-0.177	-1.181	-0.751

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 27,5 m)

Θ	Gaya Dalam					
	Downtrack			Uptrack		
$^{\circ}$	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-138.388	-3.929	0.000	-138.373	3.917	0.000
45	-172.975	3.877	4.793	-185.345	5.342	-6.664
90	-218.723	4.927	-9.654	-207.157	-2.689	0.000
135	-184.262	-8.881	0.000	-163.679	-0.293	-0.714
180	-137.302	4.558	9.498	-137.519	-4.489	9.480
225	-163.568	0.203	-0.716	-184.167	9.193	0.000
270	-207.126	4.712	0.000	-218.602	-5.113	-9.639
315	-185.586	-5.435	-6.665	-173.337	-3.514	4.816
<i>Max</i>	-218.970	-9.448	-11.490	-218.944	9.448	-11.482

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Deformasi terowongan (panjang tiang 30 m)

Titik	Θ	Downtrack		Uptrack	
		Deformasi (mm)			
	$^{\circ}$	U_x (mm)	U_y (mm)	U_x (mm)	U_y (mm)
<i>Crown</i>	0	-0.839	-3.584	0.841	-3.591
<i>Spring Line 1</i>	90	1.208	-0.799	3.469	-0.195
<i>Invert</i>	180	-0.402	1.565	0.402	1.565
<i>Spring Line 2</i>	270	-3.470	-0.196	-1.207	-0.799

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 30 m)

Θ	Gaya Dalam					
	Downtrack			Uptrack		
°	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-141.647	-4.059	0.000	-141.523	3.989	0.000
45	-176.840	4.013	4.974	-188.961	5.495	-6.821
90	-223.489	5.087	-9.952	-211.131	-2.736	0.000
135	-187.997	-9.152	0.000	-166.351	-0.290	-0.737
180	-139.439	4.695	9.764	-139.651	-4.630	9.743
225	-166.226	0.198	-0.726	-187.880	9.473	0.000
270	-211.068	4.808	0.000	-223.359	-5.279	-9.926
315	-189.238	-5.578	-6.858	-177.229	-3.601	4.971
Max	-223.742	-9.750	-11.851	-223.708	9.745	-11.834

*Putaran searah jarum jam dari crown

Tidak ada pengaruh air tanah

Deformasi terowongan (panjang tiang 20 m)

Titik	Θ	Downtrack		Uptrack	
		Deformasi (mm)			
	°	<i>U_x</i> (mm)	<i>U_y</i> (mm)	<i>U_x</i> (mm)	<i>U_y</i> (mm)
Crown	0	-12.185	-51.689	12.173	-51.720
Spring Line 1	90	20.745	-4.073	59.446	0.085
Invert	180	-7.208	34.309	7.218	34.317
Spring Line 2	270	-59.425	0.086	-20.758	-4.064

*Putaran searah jarum jam dari crown

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 20 m)

Θ	Gaya Dalam					
	Downtrack			Uptrack		
°	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-2686.089	-59.697	0.000	-2685.533	58.981	0.000
45	-3346.772	51.978	61.931	-3418.834	69.084	-72.568
90	-4123.294	89.894	-162.977	-3992.976	-3.679	0.000
135	-3512.573	-167.024	0.000	-3309.041	-27.928	-53.537
180	-2706.169	88.240	191.884	-2708.958	-87.642	191.676
225	-3305.602	25.852	-53.302	-3510.092	171.603	0.000
270	-3991.974	40.745	0.000	-4121.560	-93.098	-162.708
315	-3423.634	-71.100	-72.621	-3353.799	-46.088	62.161
Max	-4128.312	-171.605	215.866	-4128.139	171.603	215.774

*Putaran searah jarum jam dari crown

Deformasi terowongan (panjang tiang 22,5 m)

Titik	Θ	Downtrack		Uptrack	
		Deformasi (mm)			
	$^{\circ}$	U_x (mm)	U_y (mm)	U_x (mm)	U_y (mm)
<i>Crown</i>	0	-14.375	-60.899	14.361	-60.950
<i>Spring Line 1</i>	90	23.769	-6.210	68.290	-0.473
<i>Invert</i>	180	-8.228	38.140	8.233	38.143
<i>Spring Line 2</i>	270	-68.247	-0.452	-23.790	-6.213

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 22,5 m)

Θ	Gaya Dalam					
	Downtrack			Uptrack		
$^{\circ}$	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-3003.036	-68.116	0.000	-3001.794	68.604	0.000
45	-3754.089	61.937	74.411	-3858.664	83.503	-90.647
90	-4648.543	102.564	-187.859	-4487.191	-11.169	0.000
135	-3949.833	-189.655	0.000	-3687.640	-27.864	-54.434
180	-3021.568	99.795	215.831	-3024.570	-99.159	215.545
225	-3684.284	25.616	-54.060	-3946.976	195.085	0.000
270	-4486.236	54.251	0.000	-4646.395	-106.249	-187.584
315	-3864.577	-85.846	-90.789	-3761.856	-55.046	74.573
<i>Max</i>	-4654.277	-195.069	243.063	-4653.919	195.085	242.966

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Deformasi terowongan (panjang tiang 25 m)

Titik	Θ	Downtrack		Uptrack	
		Deformasi (mm)			
	$^{\circ}$	U_x (mm)	U_y (mm)	U_x (mm)	U_y (mm)
<i>Crown</i>	0	-16.897	-71.845	16.986	-71.889
<i>Spring Line 1</i>	90	27.345	-8.920	78.819	-1.270
<i>Invert</i>	180	-9.508	42.550	9.495	42.532
<i>Spring Line 2</i>	270	-78.821	-1.263	-27.287	-8.913

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 25 m)

θ	Gaya Dalam					
	Downtrack			Uptrack		
°	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-3368.098	-84.396	0.000	-3368.902	80.861	0.000
45	-4228.868	74.251	89.162	-4367.095	100.591	-111.352
90	-5260.403	117.632	-217.357	-5060.363	-20.717	0.000
135	-4456.822	-216.617	0.000	-4123.307	-27.243	-55.849
180	-3383.349	113.613	244.490	-3387.743	-112.754	243.927
225	-4119.122	25.134	-55.495	-4454.476	223.020	0.000
270	-5058.697	70.055	0.000	-5257.914	-121.959	-216.960
315	-4371.587	-103.526	-111.518	-4237.787	-65.860	89.469
Max	-5266.862	-223.494	275.592	-5266.585	223.482	275.214

*Putaran searah jarum jam dari crown

Deformasi terowongan (panjang tiang 27,5 m)

Titik	θ	Downtrack		Uptrack	
		Deformasi (mm)			
	°	Ux (mm)	Uy (mm)	Ux (mm)	Uy (mm)
Crown	0	-19.594	-84.095	19.787	-83.945
Spring Line 1	90	31.324	-11.875	90.605	-2.270
Invert	180	-10.972	47.473	10.939	47.429
Spring Line 2	270	-90.710	-2.355	-31.142	-11.894

*Putaran searah jarum jam dari crown

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 27,5 m)

θ	Gaya Dalam					
	Downtrack			Uptrack		
°	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-3793.188	-93.478	0.000	-3795.372	92.997	0.000
45	-4777.041	85.532	103.408	-4939.947	119.172	-132.368
90	-5954.258	134.584	-249.607	-5709.628	-30.324	0.000
135	-5031.715	-246.942	0.000	-4619.433	-25.997	-59.479
180	-3796.149	129.344	277.182	-3801.906	-128.115	276.162
225	-4616.623	24.713	-59.054	-5030.457	254.417	0.000
270	-5710.398	85.925	0.000	-5950.781	-139.646	-249.290
315	-4945.373	-122.074	-131.981	-4785.061	-76.438	104.511
Max	-5961.169	-255.657	312.670	-5960.538	255.835	311.779

*Putaran searah jarum jam dari crown

Deformasi terowongan (panjang tiang 30 m)

Titik	θ	Downtrack		Uptrack	
		Deformasi (mm)			
	°	U_x (mm)	U_y (mm)	U_x (mm)	U_y (mm)
<i>Crown</i>	0	-22.935	-99.876	22.975	-99.938
<i>Spring Line 1</i>	90	35.905	-16.614	105.926	-4.931
<i>Invert</i>	180	-13.130	52.539	13.163	52.533
<i>Spring Line 2</i>	270	-105.910	-4.950	-35.870	-16.638

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Gaya dalam terowongan (panjang tiang 30 m)

θ	Gaya Dalam					
	Downtrack			Uptrack		
°	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)	N (kN/m)	Q (kN/m)	M (kNm/m)
0	-4312.131	-109.847	0.000	-4312.276	105.249	0.000
45	-5440.109	98.071	119.152	-5615.640	140.729	-153.852
90	-6785.665	156.057	-288.931	-6491.362	-37.375	0.000
135	-5718.225	-285.080	0.000	-5213.253	-24.280	-68.851
180	-4282.626	148.732	318.877	-4288.006	-147.732	318.077
225	-5206.870	22.082	-67.475	-5715.217	293.866	0.000
270	-6488.890	102.213	0.000	-6783.610	-161.769	-288.326
315	-5623.694	-144.018	-154.132	-5454.403	-87.586	119.850
<i>Max</i>	-6793.129	-296.018	359.642	-6793.826	295.932	359.142

*Putaran searah jarum jam dari *crown*

Lampiran 9 Penurunan fondasi tiang-rakit

Penurunan fondasi tiang rakit (panjang tiang 20 m)

Koordinat acuan pada rakit		Penggalian		
		Bersamaan	D/T	U/T
X (m)	Y (m)	Uy (mm)	Uy (mm)	Uy (mm)
-9	-4	-3.107	-3.414	-3.554
-5	-4	-5.089	-4.860	-5.443
1	-4	-7.809	-6.318	-8.089
7	-4	-9.901	-6.452	-10.174
13	-4	-9.890	-4.889	-10.158
19	-4	-7.753	-2.654	-8.000
25	-4	-4.912	-0.899	-5.120
29	-4	-2.936	-0.186	-3.202
<i>Max Settlement</i>		-10.199	-6.613	-10.471

Penurunan fondasi tiang rakit (panjang tiang 22,5 m)

Koordinat acuan pada rakit		Penggalian		
		Bersamaan	D/T	U/T
X (m)	Y (m)	Uy (mm)	Uy (mm)	Uy (mm)
-9	-4	-4.177	-4.182	-4.892
-5	-4	-6.844	-6.308	-7.466
1	-4	-10.686	-8.622	-11.209
7	-4	-13.640	-8.919	-14.149
13	-4	-13.669	-6.702	-14.146
19	-4	-10.782	-3.611	-11.202
25	-4	-6.960	-1.237	-7.319
29	-4	-4.216	-0.218	-4.622
<i>Max Settlement</i>		-14.077	-9.115	-14.574

Penurunan fondasi tiang rakit (panjang tiang 25 m)

Koordinat acuan pada rakit		Penggalian		
		Bersamaan	D/T	U/T
X (m)	Y (m)	Uy (mm)	Uy (mm)	Uy (mm)
-9	-4	-6.252	-5.926	-7.253
-5	-4	-9.255	-8.557	-10.167
1	-4	-14.322	-11.759	-15.169
7	-4	-18.249	-12.121	-19.075
13	-4	-18.249	-8.904	-18.969
19	-4	-14.316	-4.636	-14.866
25	-4	-9.247	-1.542	-9.621
29	-4	-6.075	-0.445	-6.513
<i>Max Settlement</i>		-18.820	-12.437	-19.604

Penurunan fondasi tiang rakit (panjang tiang 27,5 m)

Koordinat acuan pada rakit		Penggalian		
		Bersamaan	D/T	U/T
X (m)	Y (m)	Uy (mm)	Uy (mm)	Uy (mm)
-9	-4	-8.495	-8.264	-9.377
-5	-4	-11.837	-11.368	-12.807
1	-4	-18.182	-15.363	-19.211
7	-4	-23.309	-15.702	-24.325
13	-4	-23.343	-11.221	-24.142
19	-4	-18.321	-5.554	-18.692
25	-4	-12.240	-1.787	-11.936
29	-4	-9.107	-0.696	-8.449
<i>Max Settlement</i>		-24.061	-16.211	-24.994

Penurunan fondasi tiang rakit (panjang tiang 30 m)

Koordinat acuan pada rakit		Penggalian		
		Bersamaan	D/T	U/T
X (m)	Y (m)	Uy (mm)	Uy (mm)	Uy (mm)
-9	-4	-9.452	-9.097	-10.179
-5	-4	-12.714	-12.373	-13.479
1	-4	-20.808	-17.667	-21.588
7	-4	-27.422	-18.258	-28.193
13	-4	-27.508	-12.555	-28.207
19	-4	-21.053	-5.742	-21.526
25	-4	-13.024	-1.518	-13.106
29	-4	-9.594	-0.971	-9.605
<i>Max Settlement</i>		-28.380	-18.884	-29.129