

TUGAS AKHIR

**ANALISIS STABILITAS TEROWONGAN DENGAN
PERKUATAN *ROCKBOLT* DAN *SHOTCRETE*
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA
(*TUNNEL STABILITY ANALYSIS WITH
REINFORCEMENT OF ROCKBOLT AND SHOTCRETE
USING FINITE ELEMENT METHOD*)**

*(studi kasus proyek PT. Kereta Cepat Indonesia China terowongan STA
DIK 3+420 di Halim, Jakarta Timur)*

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



**GEO PRADANA MAHARDIKA
16511083**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA**

2022

TUGAS AKHIR

ANALISIS STABILITAS TEROWONGAN DENGAN PERKUATAN *ROCKBOLT* DAN *SHOTCRETE* MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA (*TUNNEL STABILITY ANALYSIS WITH REINFORCEMENT OF ROCKBOLT AND SHOTCRETE USING FINITE ELEMENT METHOD*)

(studi kasus proyek PT. Kereta Cepat Indonesia China terowongan STA 3+420
di Halim, Jakarta Timur)

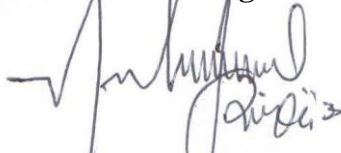
Disusun oleh

Geo Pradana Mahardika
16511083

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal 02 Juli 2022
Oleh Dewan Penguji

Pembimbing



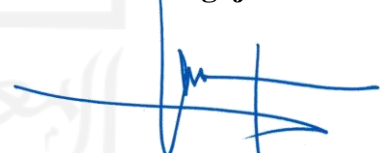
Muhammad Rifqi A. S.T., M.Eng.
NIK: 135111101

Penguji I



Ir. Akhmad Marzuko, M.T.
NIK: 885110107

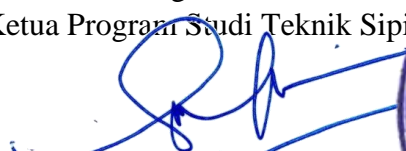
Penguji II



Dr. Ir. Lalu Makrup, M.T.
NIK: 885110106

Mengesahkan

Ketua Program Studi Teknik Sipil



Dr. Ir. Sri Amini Zuni Astuti, M.T.
NIK: 885110101



PERNYATAAN BEBAS PALGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Proposal Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan Proposal Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari karya saya sendiri atau adanya pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundangundangan yang berlaku.

YOGYAKARTA, April 2022

Yang membuat pernyataan

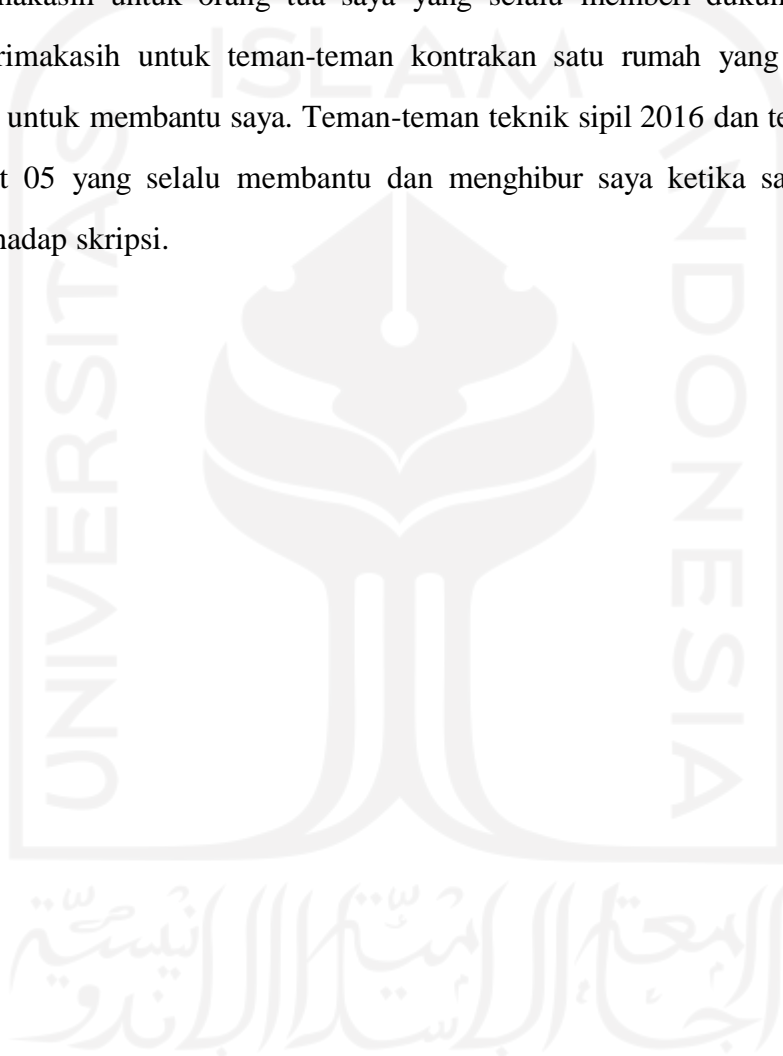


Geo Pradana Mahardika

(16511083)

LEMBAR DEDIKASI

Terimakasih untuk teman teman yang sudah membantu saya mengerjakan skripsi ini. Terimakasih untuk orang tua saya yang selalu memberi dukungan kepada saya. Terimakasih untuk teman-teman kontrakan satu rumah yang selalu siap sedia ada untuk membantu saya. Teman-teman teknik sipil 2016 dan teman teman KKN unit 05 yang selalu membantu dan menghibur saya ketika saya merasa jenuh terhadap skripsi.



KATA PENGANTAR

Puji syukur kita panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul Analisis Stabilitas Terowongan Dengan Perkuatan Rockbolt menggunakan metode elemen hingga. Tugas Akhir merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan Program Studi Sarjana pada Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Dalam penyusunan Tugas Akhir penulis mendapatkan banyak hambatan saar penyusunan dan banyak mendapatkan bantuan dari lingkungan sekitar, seperti bantuan bimbingan, saran, kritik, dan curhatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan hasil yang maksimal. Pada kesempatan kali ini penyusun ingin menyampaikan ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Muhammad Rifqi Abdurrozak, S.T., M.Eng., selaku dosen pembimbing.
2. Bapak Ir. Akhmad Marzuko, M.T. dan Bapak Dr. Ir. Lalu Makrup, M.T., selaku dosen penguji Tugas Akhir.
3. Ibu Dr. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, M.T selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
4. Ayah, Ibu, dan Adik tercinta, yang selalu memberi dukungan kepada penulis.
5. Teman-teman dari Sumur Tengah, Teknik Sipil 2016 dan Alicia Afra yang selalu ada untuk menemani saat proses pembuatan Tugas Akhir.
6. Teman-teman KKN unit 05 angkatan 60 yang sudah memotivasi penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Akhirnya penulis berharap agar Proposal Tugas Akhir ini dapat memberi manfaat bagi siapapun pihak yang membacanya.

Yogyakarta, Juli 2022

Penulis

Geo Pradana Mahardika

(16511083)

DAFTAR ISI

Halaamn Judul	i
Halaman Pengesahan	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
LEMBAR DEDIKASI	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xviii
ABSTRAK	xx
ABSTRACT	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Tinjauan Umum	5
2.2 Stabilitas Terowongan	5

2.3 Stabilitas Terowongan dengan Perkuatan	6
2.4 Pengaruh Penyangga pada Deformasi Terowongan	7
2.5 Pengaruh Beban Gempa Terhadap Stabilitas Terowongan	8
2.6 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Sekarang	9
BAB III LANDASAN TEORI	14
3.1 Terowongan	14
3.2 Sistem Penyangga Terowongan	15
3.2.1 <i>Rockbolt</i>	15
3.2.2 <i>Shotcrete</i>	16
3.2.3 <i>wiremesh</i>	17
3.2.4 <i>Steel Rib</i>	17
3.3 Faktor Keamanan	18
3.4 Deformasi	20
3.5 Modulus Elastisitas Tanah	20
3.6 Metode Elemen Hingga	21
3.7 Program Plaxis v.20	22
3.8 Kriteria Keruntuhan Batuan	22
BAB IV METODE PENELITIAN	24
4.1 Umum	24
4.2 Lokasi Penelitian	24
4.3 Peralatan Penelitian	25

4.4 Tahapan Penelitian	25
4.4.1 Pengumpulan Data Struktur Terowongan	25
4.4.2 Data Parameter Tanah	26
4.4.3 Data Topografi	27
4.4.4 Data Gemps	28
4.5 Langkah-Langkah Analisis Dengan <i>Plaxis v.20</i>	29
4.5.1 Pembuatan Pemodelan <i>Soil</i>	29
4.5.2 Pembuatan <i>Material Sets Shotcrete</i>	30
4.5.3 Pembuatan <i>Material Sets Rockbolt</i>	31
4.5.4 Pembuatan Pemodelan Geometri Terowongan	31
4.5.5 Tahap Perhitungan	33
4.6 Bagan Alir Penelitian	34
BAB V ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	37
5.1 Terowongan Asli	37
5.2 Analisis Terowongan Tanpa Perkuatan	38
5.2.1 Pemodelan Terowongan Tanpa Perkuatan	38
5.2.2 Analisis Deformasi dan <i>safety factor</i> Terowongan Tanpa Perkuatan	39
5.3 Analisis Terowongan Dengan Perkuatan	45
5.3.1 Analisis Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i>	46
5.3.2 Analisis Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 2 <i>Rockbolt</i>	53
5.3.3 Analisis Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 4 <i>Rockbolt</i>	60

5.3.4 Analisis Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 6 <i>Rockbolt</i>	66
5.3.5 Analisis Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 8 <i>Rockbolt</i>	71
5.4 Rekapitulasi Hasil Analisis Terowongan Dengan Plaxis v.20	78
5.5 Pembahasan	81
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	84
6.1 Kesimpulan	84
6.2 Saran	85
DAFTAR PUSTAKA	86
LAMPIRAN	87



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Sebelum dengan Penelitian Sekarang	10
Tabel 3.1 Nilai Faktor Keamanan Terhadap Bidang Longsor	19
Tabel 3.2 Korelasi antara jenis tanah dengan modulus elastisitas	21
Tabel 4.1 Parameter Tanah Tiap Lapisan	27
Tabel 5.1 Rekapitulasi Hasil Analisis Terowongan dengan Plaxis v.20	78



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Lokasi <i>Tunnel 1</i> Kereta Cepat Jakarta-Bandung	2
Gambar 3.1 Struktur Bagian <i>Rockbolt</i>	16
Gambar 3.2 Metode Penggunaan <i>Dry Mix Shotcrete</i>	17
Gambar 3.3 Tipe <i>Steel Rib</i>	18
Gambar 3.4 Metode Lingkaran Mohr dan Coulumb	23
Gambar 4.1 Peta Lokasi Penelitian	25
Gambar 4.2 Data Penampang Terowongan	26
Gambar 4.3 Data Topografi Bawah Tanah Sepanjang Trase Terowongan	28
Gambar 4.4 Data Peta Gempa	29
Gambar 4.5 Lembar Jendela <i>Borehole</i>	30
Gambar 4.6 <i>Material Sets</i> Tanah	30
Gambar 4.7 <i>Material Sets Shotcrete</i>	31
Gambar 4.8 <i>Material Sets Rockbolt</i>	31
Gambar 4.9 Pemodelan Terowongan dengan <i>Plaxis</i>	32
Gambar 4.10 Jendela Tabel <i>Phases Explorer</i>	33
Gambar 4.11 Titik <i>Node</i> Pada Pemodelan Terowongan	33
Gambar 4.12 Proses <i>Calculate</i>	34

Gambar 4.13 Bagan Alir Penelitian	36
Gambar 5.1 Penggunaan Mata Bor <i>Tunnel Bored Machine</i>	37
Gambar 5.2 Pemodelan Terowongan Tanpa Perkuatan	39
Gambar 5.3 <i>Total Displacement</i> Terowongan Tanpa Perkuatan	40
Gambar 5.4 Arah Pergerakan Tanah Terowongan tanpa Perkuatan	40
Gambar 5.5 Daerah Potensi Keruntuhan Saat Pengeboran	41
Gambar 5.6 <i>Horizontal Displacement</i> Terowongan Tanpa Perkuatan	42
Gambar 5.7 <i>Vertical Displacement</i> Terowongan Tanpa Perkuatan	42
Gambar 5.8 <i>Total Displacement</i> Terowongan Tanpa Perkuatan Dengan Beban Gempa	43
Gambar 5.9 Arah Pergerakan Tanah Terowongan Tanpa Perkuatan Dengan Beban Gempa	43
Gambar 5.10 Daerah Potensi Keruntuhan Saat Pengeboran Dengan Beban Gempa	44
Gambar 5.11 <i>Horizontal Displacement</i> Terowongan Tanpa Perkuatan Dengan Beban Gempa	45
Gambar 5.12 <i>Vertical Displacement</i> Terowongan Tanpa Perkuatan Dengan Beban Gempa	45
Gambar 5.13 Jendela <i>Material Set</i>	47
Gambar 5.14 Pemodelan <i>Meshing</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i>	48
Gambar 5.15 <i>Total Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i>	48
Gambar 5.16 Arah Pergerakan Tanah Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i>	49

Gambar 5.17 Daerah Potensi Keruntuhan Terowongan dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i>	49
Gambar 5.18 <i>Horizontal Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i>	50
Gambar 5.19 <i>Vertical Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i>	50
Gambar 5.20 <i>Total Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> Setelah Adanya Beban Gempa	51
Gambar 5.21 Arah Pergerakan Tanah Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> Setelah Adanya Beban gempa	51
Gambar 5.22 Daerah Potensi Keruntuhan Dengan Beban Gempa Setelah Adanya Perkuatan <i>Shotcrete</i>	52
Gambar 5.23 <i>Horizontal Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> Setelah Adanya Beban Gempa	53
Gambar 5.24 <i>Vertical Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> Setelah Adanya Beban Gempa	53
Gambar 5.25 Pemodelan Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 2 <i>Rockbolt</i>	54
Gambar 5.26 <i>Total Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 2 <i>Rockbolt</i>	55
Gambar 5.27 Arah Pergerakan Tanah Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 2 <i>Rockbolt</i>	55
Gambar 5.28 Daerah Potensi Keruntuhan Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 2 <i>Rockbolt</i>	56

Gambar 5.29 <i>Horizontal Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 2 <i>Rockbolt</i>	56
Gambar 5.30 <i>Vertical Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 2 <i>Rockbolt</i>	57
Gambar 5.31 <i>Total Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 2 <i>Rockbolt</i> Setelah Adanya Beban Gempa	57
Gambar 5.32 Arah Pergerakan Tanah Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 2 <i>Rockbolt</i> Setelah Adanya Beban Gempa	58
Gambar 5.33 Daerah Potensi Keruntuhan Dengan Beban Gempa Setelah Adanya Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 2 <i>Rockbolt</i>	58
Gambar 5.34 <i>Horizontal Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 2 <i>Rockbolt</i> Setelah Adanya Beban Gempa	59
Gambar 5.35 <i>Vertical Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 2 <i>Rockbolt</i> Setelah Adanya Beban Gempa	59
Gambar 5.36 Pemodelan Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 4 <i>Rockbolt</i>	60
Gambar 5.37 <i>Total Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 4 <i>Rockbolt</i>	61
Gambar 5.38 Arah Pergerakan Tanah Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 4 <i>Rockbolt</i>	61
Gambar 5.39 Daerah Potensi Keruntuhan Dengan <i>Shotcrete</i> dan 4 <i>Rockbolt</i>	62
Gambar 5.40 <i>Horizontal Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 4 <i>Rockbolt</i>	62

Gambar 5.41 <i>Vertical Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 4 <i>Rockbolt</i>	63
Gambar 5.42 <i>Total Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 4 <i>Rockbolt</i> Setelah Adanya Beban Gempa	63
Gambar 5.43 Arah Pergerakan Tanah Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 4 <i>Rockbolt</i> Setelah Adanya Beban Gempa	64
Gambar 5.44 Daerah Potensi Keruntuhan Dengan Beban Gempa Setelah Adanya Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 4 <i>Rockbolt</i>	64
Gambar 5.45 <i>Horizontal Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 4 <i>Rockbolt</i> Setelah Adanya Beban Gempa	65
Gambar 5.46 <i>Vertical Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 4 <i>Rockbolt</i> Setelah Adanya Beban Gempa	65
Gambar 5.47 Pemodelan Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 6 <i>Rockbolt</i>	66
Gambar 5.48 <i>Total Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 6 <i>Rockbolt</i>	67
Gambar 5.49 Arah Pergerakan Tanah Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 6 <i>Rockbolt</i>	67
Gambar 5.50 Daerah Potensi Keruntuhan Dengan <i>Shotcrete</i> dan 6 <i>Rockbolt</i>	68
Gambar 5.51 <i>Horizontal Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 6 <i>Rockbolt</i>	68
Gambar 5.52 <i>Vertical Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 6 <i>Rockbolt</i>	69

Gambar 5.53 <i>Total Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 6 <i>Rockbolt</i> Setelah Adanya Beban Gempa	69
Gambar 5.54 Arah Pergerakan Tanah Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 6 <i>Rockbolt</i> Setelah Adanya Beban Gempa	70
Gambar 5.55 Daerah Potensi Keruntuhan Dengan Beban Gempa Setelah Adanya Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 6 <i>Rockbolt</i>	70
Gambar 5.56 <i>Horizontal Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 6 <i>Rockbolt</i> Setelah Adanya Beban Gempa	71
Gambar 5.57 <i>Vertical Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 6 <i>Rockbolt</i> Setelah Adanya Beban Gempa	71
Gambar 5.58 Pemodelan Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 8 <i>Rockbolt</i>	72
Gambar 5.59 <i>Total Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 8 <i>Rockbolt</i>	73
Gambar 5.60 Arah Pergerakan Tanah Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 8 <i>Rockbolt</i>	73
Gambar 5.61 Daerah Potensi Keruntuhan dengan <i>Shotcrete</i> dan 8 <i>Rockbolt</i>	74
Gambar 5.62 <i>Horizontal Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 8 <i>Rockbolt</i>	74
Gambar 5.63 <i>Vertical Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 8 <i>Rockbolt</i>	75
Gambar 5.64 <i>Total Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 8 <i>Rockbolt</i> Setelah Adanya Beban Gempa	75

Gambar 5.65 Arah Pergerakan Tanah Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 8 <i>Rockbolt</i> Setelah Adanya Beban Gempa	76
Gambar 5.66 Daerah Potensi Keruntuhan Dengan Beban Gempa Setelah Adanya Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 8 <i>Rockbolt</i>	76
Gambar 5.67 <i>Horizontal Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 8 <i>Rockbolt</i> Setelah Adanya Beban Gempa	77
Gambar 5.68 <i>Vertical Displacement</i> Terowongan Dengan Perkuatan <i>Shotcrete</i> dan 8 <i>Rockbolt</i> Setelah Adanya Beban Gempa	77
Gambar 5.69 Grafik Nilai <i>Total Displacement</i> Pada Beban Sendiri dan Beban Gempa	79
Gambar 5.70 Grafik Nilai <i>Safety Factort</i> Pada Beban Sendiri dan Beban Gempa	79
Gambar 5.71 Grafik Nilai <i>Horizontal Displacement</i> Pada Beban Sendiri dan Beban Gempa	80
Gambar 5.72 Grafik Nilai <i>Vertical Displacement</i> Pada Beban Sendiri dan Beban Gempa	80

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

E	: Modulus Young (kN/m ²)
E _s	: Modulus Elastisitas (MPa)
f	: Faktor aman
c	: Kohesi tanah (kN/m ²)
c'	: Kohesi tanah efektif (kN/m ²)
K	: Koefisien tanah (m/day)
ν	: Sudut gesek dalam (derajat)
α _i	: Sudut bidang gelincir pada tiap irisan (derajat)
W	: Berat struktur (kg/m)
W _s	: Berat butiran padat (kg/m)
W _i	: Berat tiap irisan tanah pada irisan ke-i (kg/m)
L	: Lebar irisan (m)
Q	: Beban terbagi rata (kN/m ²)
SF	: Faktor aman
τ _f	: Kuat geser tanah (kN/m ²)
τ _d	: Tegangan geser yang bekerja (kN/m ²)
σ	: Tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m ²)
φ	: Sudut gesek dalam tanah (°)
σ' ₁	: Tegangan utama mayor efektif (kN/m ²)
σ' ₃	: Tegangan utama minor efektif (kN/m ²)
θ	: Sudut keruntuhan (°)
γ	: Berat volume tanah (kN/m ³)

γ_b : Berat volume tanah basah (kN/m^3)

γ_{sat} : Berat volume tanah jenuh (kN/m^3)



ABSTRAK

Proyek Kereta Cepat Jakarta-Bandung akan membangun 13 terowongan yang tersebar di kawasan Jakarta, Karawang, Purwakarta, dan Bandung. Salah satu terowongan yang dibangun terdapat di kawasan Halim, Jakarta Timur. Terowongan ini membentang sepanjang 1.885 meter dan berada dibawah permukaan tanah dengan kedalaman 40 meter. Dalam pembangunan terowongan ini menggunakan metode pengeboran TBM (*Tunnel Bored Machine*). Pada saat proses pengeboran didapat kondisi tanah sangat tidak stabil dan beresiko terjadi kelongsoran maka, perlu dilakukan pencarian alternatif desain perkuatan terowongan. Tujuan analisis untuk Tugas Akhir ini adalah mengetahui nilai deformasi dan angka keamanan terowongan sebelum dan sesudah diberi perkuatan *shotcrete* dan *rockbolt*.

Stabilitas terowongan yang dilakukan menggunakan program Plaxis v.20 dan dalam perhitungannya dengan metode elemen hingga. Dalam desain perkuatan terowongan diperlukan data terowongan, data tanah, dan data gempa juga diperhitungkan dalam desain. Pemodelan terowongan pada program Plaxis v.20 dibagi menjadi 6 variasi yaitu, proses pengeboran, *shotcrete*, *shotcrete* dan 2 *rockbolt*, *shotcrete* dan 4 *rockbolt*, *shotcrete* dan 6 *rockbolt*, serta *shotcrete* dan 8 *rockbolt*. Dalam analisis variasi tiap pemodelan terowongan dilakukan dengan menggunakan 2 macam pembebanan yaitu, beban sendiri dan beban gempa.

Hasil analisis dari program Plaxis v.20 pada terowongan tanpa perkuatan saat beban sendiri didapatkan nilai deformasi sebesar 0,02437 meter dan nilai angka keamanan sebesar 0,507 mengalami *soil body collapse*. Untuk terowongan tanpa perkuatan dengan beban gempa besar deformasi adalah 0,02934 meter dan nilai angka keamanan sebesar 0,498 mengalami *soil body collapse*. Nilai *total displacement* dengan beban sendiri, untuk perkuatan *shotcrete* 0,0271meter, untuk perkuatan *shotcrete* + 2 *rockbolt* mengalami kenaikan sebesar 0,15%, untuk perkuatan *shotcrete* + 4 *rockbolt* mengalami kenaikan sebesar 1,4% dari variasi sebelumnya, untuk perkuatan *shotcrete* + 6 *rockbolt* mengalami penurunan nilai dari variasi sebelumnya sebesar 0,15%, dan untuk perkuatan *shotcrete* + 8 *rockbolt* mengalami keanikan nilai kembali sebesar 0,29%. Dari hasil tersebut didapatkan nilai acak setiap penambahan perkuatan. Nilai angka keamanan, untuk perkuatan *shotcrete* 1,985, untuk perkuatan *shotcrete* + 2 *rockbolt* adalah 3,058, untuk perkuatan *shotcrete* + 4 *rockbolt* adalah 3,239, untuk perkuatan *shotcrete* + 6 *rockbolt* adalah 4,113, dan untuk perkuatan *shotcrete* + 8 *rockbolt* adalah 5,748. Dari hasil tersebut nilai angka keamanan mengalami kenaikan. Nilai *total displacement* dengan beban gempa, untuk perkuatan *shotcrete* mengalami penurunan nilai sebesar 3,5%, untuk perkuatan *shotcrete* + 2 *rockbolt* mengalami penurunan nilai sebesar 0,67% dari variasi sebelumnya, untuk perkuatan *shotcrete* + 4 *rockbolt* mengalami kenaikan dari variasi sebelumnya sebesar 1,5%, untuk perkuatan *shotcrete* + 6 *rockbolt* mengalami penurunan nilai sebesar 0,25%, dan untuk perkuatan *shotcrete* + 8 *rockbolt* kembali mengalami kenaikan nilai sebesar 0,25%. Dari hasil tersebut terjadi nilai acak untuk setiap *total displacement*. Nilai angka keamanan dengan beban gempa, untuk perkuatan *shotcrete* 1,573, untuk perkuatan *shotcrete* + 2 *rockbolt* adalah 2,786, untuk perkuatan *shotcrete* + 4 *rockbolt* adalah 3,051, untuk perkuatan *shotcrete* + 6 *rockbolt* adalah 3,889, dan untuk perkuatan *shotcrete* + 8 *rockbolt* adalah 5,146. Dengan hasil tersebut, semua hasil nilai angka keamanan dengan diberi perkuatan sudah memenuhi syarat >1,25. Penulis merekomendasikan dalam desain pemodelan ini bisa menggunakan terowongan dengan perkuatan *shotcrete* + 2 *rockbolt*.

Kata Kunci: Stabilitas terowongan, *Shotcrete*, *Rockbolt*, Plaxis

ABSTRACT

The Jakarta-Bandung High-Speed Train Project will build 13 tunnels spread across Jakarta, Karawang, Purwakarta, and Bandung. One of the tunnels built is located in the Halim area, East Jakarta. This tunnel stretches for 1,885 meters and is below the surface of the ground with a depth of 40 meters. In the construction of this tunnel using the TBM (Bored Machine Tunnel) drilling method. This method uses a cylindrical drill tool that follows the size of the tunnel hole. When the drilling process is obtained the soil condition is unstable and at risk of landslide then, it is necessary to find an alternative tunnel reinforcement design. The purpose of the analysis for this Final Task is to know the deformation value and tunnel safety factor before and after being reinforcement of shotcrete and rockbolt.

Tunnel stability is carried out by the Plaxis v.20 program and in its calculation with the finite element method. In the design of tunnel reinforcement required tunnel data, soil data, and earthquake data are also taken into account in the design. Tunnel modeling in the Plaxis v.20 program is divided into 6 variations, namely, drilling process, shotcrete, shotcrete and 2 rockbolt, shotcrete and 4 rockbolt, shotcrete and 6 rockbolt, as well as shotcrete and 8 rockbolt. Based on the analysis of variation, each tunnel modeling is operate using 2 types of reinforcement, which is self-reinforcement and earthquake reinforcement

The results of the analysis of the Plaxis v.20 program in tunnels without retrofitting when the load itself obtained a deformation value of 0.02437 meters and a safety score of 0.507 experiencing soil body collapse. For tunnels without reinforcement with a large earthquake load deformation was 0.02934 meters and a safety value of 0.498 experiences soil body collapse. The total displacement value, for 0.0271meter shotcrete reinforcement, for shotcrete + 2 rockbolt retrofitting was increase 0,15%, for shotcrete reinforcement + 4 rockbolt was imcrease 1,4%, for shotcrete + 6 rockbolt retrofitting was decrease 0,15%, and for shotcrete + 8 rockbolt strengthening was increase 0,29%. From these results, a random number of additions was obtained for each addition of reinforcement. The safety factor value, for shotcrete reinforcement was 1.985, for shotcrete + 2 rockbolt reinforcement was 3.058, for shotcrete reinforcement + 4 rockbolt was 3.239, for shotcrete + 6 rockbolt strengthening was 4.113, and for shotcrete reinforcement + 8 rockbolt was 5.748. From these results, the value of the security figure had increased. The results of tunnel analysis with reinforcement due to earthquake loads total displacement value, for the reinforcement of the shotcrete was decrease 3,5%, for the strengthening of the shotcrete + 2 rockbolt was decrease 0,67%, for the strengthening of the shotcrete + 4 rockbolt was increase 0,15%, for the strengthening of the shotcrete + 6 rockbolt was decrease 0,25%, and for the strengthening of the shotcrete + 8 rockbolt was increase 0,15%. From these results a random value occured for each total displacement. The safety number value, for shotcrete reinforcement was 1.573, for shotcrete + 2 rockbolt reinforcement was 2.786, for shotcrete reinforcement + 4 rockbolt was 3.051, for shotcrete + 6 rockbolt strengthening was 3.889, and for shotcrete + 8 rockbolt strengthening was 5.146. With these results, all the results of the security number value by being strengthened had met the requirements of >1.25. The author recommends in this modeling design could use tunnels with reinforcing shotcrete + 2 rockbolt.

keywords: *Tunnel stability, Shotcrete, Rockbolt, Plaxis*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Negara Indonesia memiliki kondisi topografi berbagai macam pada setiap wilayahnya. Pada kota-kota besar sudah adanya kepadatan penduduk dan mengakibatkan pertumbuhan penggunaan transportasi. Oleh karena itu, diperlukan adanya sebuah solusi untuk sistem transportasi di Indonesia saling terhubung. Indonesia sudah mulai merencanakan pembangunan infrastruktur di permukaan untuk mengatasi kondisi topografi yang bermacam. Pada karakteristik wilayah pegunungan dan padat penduduk dibutuhkan transportasi umum untuk menunjang kegiatan masyarakat. Maka, direncanakanlah transportasi umum berupa kereta cepat yang akan melintasi daerah Jakarta – Bandung. PT. Kereta Cepat Indonesia China selaku perusahaan yang menangani proyek pembangunan kereta cepat Jakarta-Bandung, memikirkan segala kendala yang ada. Permasalahan seperti ketersediaan lahan yang semakin terbatas, diperlukan rekayasa yang efisien dalam membangun infrastruktur jalur kereta api cepat. Salah satu solusi untuk mengatasi ketersediaan lahan yang terbatas adalah dengan adanya terowongan bawah tanah (*underground tunneling*).

Pembangunan infrastruktur berupa terowongan dapat menjadi alternatif pada jalur transportasi di wilayah pegunungan dan padat penduduk dengan membangun terowongan bawah tanah (*underground tunneling*). Pembangunan terowongan akan semakin banyak seiring perkembangan jalur transportasi di Indonesia. Jalur transportasi kereta baru yang akan dibangun yaitu proyek kereta cepat Jakarta-Bandung yang akan ditangani oleh PT. Kereta Cepat Indonesia China menghubungkan dua Ibukota yaitu, Jakarta dan Bandung.

Sepanjang jalur kereta cepat Jakarta-Bandung terdapat 13 terowongan yang akan dibangun. Satu dari 13 terowongan yang dibangun pada proyek kereta api cepat Jakarta-Bandung dibangun di Jalan Tol Jakarta-Cikampek KM 5+500, Halim Jakarta Timur. Terowongan ini sering disebut dengan nama *Tunnel 1*. *Tunnel 1* dengan panjang 1.885 meter tersebut sudah selesai proses pembangunannya pada bulan Januari 2021 dengan menggunakan metode *Tunnel Bor Machine* (TBM). Dalam pembangunan terowongan diperlukan sistem penyangga untuk menahan beban agar terowongan tidak runtuh. Dengan mempertimbangkan pentingnya analisis sistem penyangga terowongan, maka perlu dilakukan penelitian tentang tinjauan kekuatan penyangga pada konstruksi terowongan. Apabila kekuatan sistem penyangga dapat dianalisis dengan baik, hal tersebut dapat berguna untuk perkembangan terowongan kedepannya. Pemilihan sistem penyangga terowongan dapat dilakukan efisien dan ekonomis. Untuk penampakan *Tunnel 1* dapat dilihat pada Gambar 1.1 dibawah ini.



Gambar 1.1 Lokasi *Tunnel 1* Kereta Cepat Jakarta-Bandung

(Sumber : PT. KCIC, 2020)

Dalam menganalisis sistem penyangga terowongan dapat dibantu dengan metode elemen hingga menggunakan *software* Plaxis untuk simulasi analisis stabilitas terowongan dengan menggunakan metode elemen hingga. Dapat menentukan desain metode perkuatan terowongan apa yang tepat untuk mengatasi keruntuhan pada terowongan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang ingin dibahas pada penelitian sebagai berikut ini.

1. Bagaimana deformasi dan faktor keamanan terowongan tanpa perkuatan akibat beban sendiri?
2. Bagaimana deformasi dan faktor keamanan terowongan tanpa perkuatan akibat beban sendiri dan beban gempa?
3. Bagaimana deformasi dan faktor keamanan terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan variasi perkuatan *rockbolt* akibat beban sendiri?
4. Bagaimana deformasi dan faktor keamanan terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan variasi perkuatan *rockbolt* akibat beban sendiri dan beban gempa?
5. Bagaimana desain perkuatan yang efektif dan efisien untuk meningkatkan faktor keamanan dan mengurangi deformasi terowongan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang ingin dibahas pada penelitian sebagai berikut ini.

1. Untuk mengetahui deformasi dan faktor keamanan terowongan tanpa perkuatan akibat beban sendiri.
2. Untuk mengetahui deformasi dan faktor keamanan terowongan tanpa perkuatan akibat beban sendiri dan gempa.
3. Untuk mengetahui deformasi dan faktor keamanan terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan variasi perkuatan *rockbolt* akibat beban sendiri.
4. Untuk mengetahui deformasi dan faktor keamanan terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan variasi perkuatan *rockbolt* akibat beban sendiri dan beban gempa.
5. Untuk mengetahui desain perkuatan yang efektif dan efisien dalam meningkatkan faktor keamanan dan mengurangi deformasi terowongan.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan memberi manfaat sebagai berikut ini.

1. Mengetahui seberapa besar pengaruh perkuatan pada nilai angka keamanan di proyek konstruksi terowongan di Halim, Jakarta Timur.
2. Memberi bahan masukan kepada PT. Kereta Cepat Indonesia China dalam menganalisis terowongan yang ada di Halim, Jakarta Timur.
3. Menambah wawasan dalam bidang Teknik Sipil terutama mengenai konstruksi terowongan.
4. Sebagai acuan untuk mahasiswa atau peneliti lain untuk melakukan penelitian sejenis.

1.5 Batasan Penelitian

Analisis ini dikhususkan sesuai dengan tujuan penelitian dari penulis agar pembahasan tidak menyimpang dan meluas. Maka diperlukan batasan-batasan dalam penelitian meliputi hal-hal sebagai berikut ini.

1. Terowongan yang diamati adalah *tunnel 1* merupakan terowongan pada proyek kereta api cepat Jakarta-Bandung yang ada di Halim, Jakarta Timur.
2. Penelitian ini dalam analisis menggunakan metode elemen hingga dengan program Plaxis v.20.
3. Analisis terowongan dengan perkuatan yang akan ditambahkan menggunakan perkuatan jenis *rockbolt* dan *shotcrete*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Pada suatu penelitian dibutuhkan sebuah tinjauan pustaka, pada bab II akan menerangkan tentang tinjauan pustaka mengenai penelitian-penelitian yang sudah dilakukan oleh peneliti terdahulu sebagai bahan referensi dan pertimbangan untuk penelitian tugas akhir ini.

2.2 Stabilitas Terowongan

Penelitian tentang analisis stabilitas terowongan sendiri sudah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya, yang membedakan adalah waktu dan lokasi. Hasil penelitian mengenai analisis stabilitas terowongan yang sebelumnya dapat dijadikan referensi untuk penelitian kali ini.

Fadhilah (2016) melakukan penelitian tentang analisis geoteknik terowongan batuan Geurutee Aceh menggunakan metode elemen hingga. Dalam penelitian tersebut bertujuan agar dapat menambah pengetahuan menganalisis dan meninjau data tanah/batuan di suatu tempat juga dapat mendesain terowongan untuk jalan raya pada kondisi batuan tertentu. Dari penelitian tersebut didapat nilai safety factor yang diatas batas aman selama panjang terowongan tersebut 19,5 m tetapi, pemodelan tanpa perkuatan sementara diperkirakan akan mengalami penurunan nilai safety factor sampai < 2 pada penggalian selanjutnya, sehingga pemodelan terowongan tanpa perkuatan sementara tidak dianjurkan.

Hermawan (2019) melakukan penelitian tentang analisis geoteknik terowongan kereta api Kebasen, Banyumas. Dalam penelitian tersebut untuk mengetahui nilai

factor keamanan dan gaya-gaya dalam yang bekerja pada terowongan. Hasil dari penelitian tersebut didapat nilai angka keamanan yang terus menurun seiring dengan panjang penggalian. Akhirnya didapat nilai factor keamanan model terowongan tanpa perkuatan adalah $1,84 < 2$, hasil ini menandakan bahwa penggalian yang dilakukan pada daerah terowongan Kebasen harus membutuhkan *immediately support* untuk mempertahankan bentuk lubang yang digali.

2.3 Stabilitas Terowongan dengan Perkuatan

Hatmoko (2018) melakukan penelitian tentang analisis stabilitas terowongan dengan perkuatan *rockbolt* dan *wiremesh* menggunakan metode elemen hingga. Pada penelitian tersebut bertujuan untuk mempelajari metode elemen hingga dan menentukan desain perkuatan *rockbolt* dan *wiremesh* yang tepat untuk mencari nilai angka aman (*safety factor*) $>1,25$ yang dapat dikatakan aman. Dari hasil analisis dengan menggunakan perkuatan *wiremesh* dan penambahan jumlah *rockbolt* mendapatkan nilai angka keamanan (*safety factor*) yang meningkat. Hasil berbeda diperoleh dari nilai deformasi jika konstruksi diberi beban gempa maka nilai deformasi dengan penambahan perkuatan pada terowongan akan menurun. Maka dengan hasil analisis tersebut dapat memperhitungkan penggunaan perkuatan dengan *wiremesh* + 3 *rockbolt* akan dikatakan aman dan mengurangi biaya dan waktu pekerjaan.

Apriyono (2010) melakukan penelitian dengan tinjauan kekuatan sistem penyangga terowongan menggunakan metode elemen hingga. Dalam penelitian tersebut bertujuan untuk mempelajari metode elemen hingga dan membuat desain metode perkuatan terowongan yang tepat untukantisipasi keruntuhan terowongan. Dari penelitian yang dilakukan, hasil penelitian pemasangan sistem penyangga mengakibatkan penurunan nilai displacement di sekitar terowongan, penurunan nilai *displacement* rata-rata sebesar 12,5 mm. Selain itu, sistem penyangga berdasarkan Q sistem mengurangi nilai *displacement* terowongan secara signifikan sehingga pantas untuk dipertimbangkan dalam perencanaan.

2.4 Pengaruh Penyangga pada Deformasi Terowongan

Saptono (2017) melakukan penelitian tentang analisis pengaruh penyangga terhadap deformasi pada terowongan Tol Cisumdawu, Jawa Barat. Salah satu hal yang dipertimbangkan dalam pembuatan terowongan ini adalah kondisi batuan yang sangat lunak dan berada di atas elevasi muka air tanah sehingga dibutuhkan penyangga yang lebih spesifik untuk mengatasi deformasi dari terowongan.

Dari hasil penelitian didapatkan dari analisis perhitungan analitik dengan pendekatan perkiraan kekuatan massa batuan. Didapatkan nilai deformasi terowongan tanpa adanya perkuatan sebesar 5mm. Terowongan ini menggunakan penyangga *steel rib* dan *shotcrete* pada sistem konstruksinya. Dari hasil perhitungan didapatkan nilai deformasi terbesar untuk *steel rib* sebesar 2,1219 mm dan *shotcrete* 2,1826 mm. Dengan hasil tersebut sistem penyangga dapat berpengaruh besar terhadap penurunan nilai deformasi dari terowongan tersebut.

Alamsyah (2020) melakukan penelitian tentang analisa deformasi Terowongan Kereta Cepat Indonesia China. Analisis yang dilakukan untuk mengetahui deformasi terowongan akibat galian dilakukan analisis statik dan analisis dinamik. Metode galian dengan *Tunneling Bore Machine* (TBM) yang menggunakan perkuatan *lining precast* dan *grouting*.

Berdasarkan hasil dari nilai total displacement pada saat pelaksanaan konstruksi yang membandingkan dua model dari sistem perkuatan, nilai deformasi terbesar menggunakan perkuatan *lining* sebesar 0,0306 m dan nilai deformasi dengan perkuatan *lining+grouting* sebesar 0,0306m. Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan perkuatan *grouting* tidak optimal karena perbandingan nilai deformasinya tidak signifikan dengan nilai deformasi terbesar keduanya 0,0306 m. Kondisi tersebut disebabkan karena stabilitas muka galian atau *face stability* termasuk dalam kondisi yang stabil.

Van Gosliga (2014) melakukan penelitian tentang *Deformation Analysis of a Bored Tunnel by Means of Terrestrial Laser Scanning*. Penelitian dilakukan bertujuan untuk mengetahui besar deformasi saat proses penggalian terowongan. Metode yang digunakan dengan *Terrestrial Laser Scanning* yang sangat jarang digunakan untuk menganalisis deformasi terowongan di Indonesia. Menggunakan laser scan sebagai alat untuk menentukan titik-titik pada bagian terowongan dan dilanjutkan dengan menganalisis data menggunakan *software Matlab* dengan memasukan rumus.

Sebelum analisis deformasi dilakukan semua data dimasukan kedalam sistem katersian koordinat. Silinder koordinat pada dinding terowongan sebagai lokasi penentuan titik sebagai sinyal untuk melakukan *scanning*. Kemudian, dibuat simulasi deformasi dengan data dan parameter terowongan. Berdasarkan hasil dari perhitungan menunjukan semua nilai deformasi yang dianalisis lebih dari 15mm.

2.5 Pengaruh Beban gempa Terhadap Stabilitas Terowongan

Darmawan (2018) melakukan penelitian tentang analisis perilaku terowongan sirkular akibat beban gempa dengan permodelan elemen hingga pada terowongan proyek MRT Jakarta. Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pegraruh penurunan permukaan tanah akibat beban gempa dan stabilitas terowogan. Pelaksanaan konstruksi terowongan pada tanah berlangsung dengan penggalian dan pembuangan tanah dimuka terowongan dengan pemasangan lining dibelakangnya untuk menahan bagian atas dinding dan lantai terowongan.

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan dengan menggunakan software *Plaxis v.8*. dan *EBAQUS V.6.11*. Analisis kekuatan *lining* terowongan menggunakan metode empiris dan numeris. Untuk analisis gaya aksial pada *lining* metode empiris kenaikan rata-rata yang terjadi sebesar 282,42 kN (12,02 %) untuk *Load Case*. Kenaikan rata-rata momen lentur metode empiris yang terjadi sebesar 20,03 kNm (12,08 %). Penurunan permukaan tanah analisis metode numeris akibat variasi beban gempa mengalami peningkatan. Untuk analisis permukaan tanah metode numeris

software PLAXIS kenaikan rata-rata yang terjadi sebesar 3,18 mm (22,37 %) untuk *Load Case*. Untuk *software* ABAQUS kenaikan rata-rata yang terjadi sebesar 4,43 mm (24,40 %) untuk *Load Case*. Secara umum penurunan permukaan tanah dapat dikatakan aman karena masih dalam batas pemurunan maksimum sebesar 127 mm.

2.6 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Sekarang

Beberapa perbandingan penelitian penulis dengan penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 2.1 dibawah ini.



Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Sebelum dengan Penelitian Penulis

Penulis	Apriyono (2010)	Van Gosliga (2014)	Fadhillah (2016)	Pradana (2022)
Judul	Tinjauan Kekuatan Sistem Penyangga Terowongan dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga	<i>Deformation Analysis of a Bored Tunnel by Means of Terrestrial Laser Scanning</i>	Analisis Geotektik Terowongan Batuan Geurutee Aceh Menggunakan Metode Elemen Hingga	analisis stabilitas terowongan dengan perkuatan rockbolt dan shotcrete menggunakan metode elemen hingga
Lokasi	Gunung Pongkor, Bogor-Jawa Barat	Heinenoord tunnel, Rotterdam, Netherlands	Gunung Geurutee, Aceh	Terowongan Proyek kereta cepat, Halim, Jakarta Timur.
Masalah	Banyak kasus keruntuhan terowongan akibat kegagalan sistem penyangga.	Sedikit ada yang menggunakan metode <i>Terrestrial Laser Scanning</i> untuk analisis deformasi terowongan.	Kondisi batuan pada Pegunungan Geurutee yang keras dan penggalian tidak menggunakan perkuatan.	Memiliki kedalaman yang berada dibawah lebih dari 20meter dan memiliki lalu lintas yang sibuk dalam pembangunan konstruksi
Tujuan	Untuk mempelajari metode elemen hingga untuk simulasi analisis stabilitas terowongan.	Untuk Mengetahui besar deformasi terowongan akibat proses penggalian.	Mengetahui kebutuhan perkuatan dalam kondisi batuan keras	Untuk mengetahui berapa besar deformasi yang terjadi jika diberi perkuatan <i>rockbolt</i> dan <i>shotcrete</i> . Pengaruh gempa terhadap nilai deformasi dan faktor keamanan.
Metode	Analisis stabilitas terowongan menggunakan <i>software Plaxis 3D</i> .	Untuk Analisis menggunakan metode <i>Terrestrial Laser Scanning</i> dan dengan <i>software Matlab</i> .	Analisis menggunakan metode elemen hingga dan menggunakan <i>software Plaxis 3D</i> .	Menggunakan data di lapangan Untuk analisis dilakukan dengan <i>Plaxis v.20..</i>
Hasil Penelitian	Sistem penyangga di lokasi penelitian mengakibatkan penurunan nilai <i>displacement</i> rerata sebesar 12,5 mm (46,30 %), sedangkan sistem penyangga berdasarkan analisis menggunakan program <i>Plaxis v8.2</i> menyebabkan penurunan nilai <i>displacement</i> rerata sebesar 9,25 mm (34,26 %)	Hasil dari nilai semua deformasi yang di analisis lebih besar dari dideteksi dengan tes stabilitas di laboratorium. Pada analisis juga mengungkapkan dua masalah. Pertama, terkadang salah menandai titik saat sedang scanning. Kedua, menggunakan stochastic model tidak sesuai situasi nyata.	Terowongan dengan perkuatan nilai deformasi lebih kecil yaitu sebesar 7,64E-03m. sedangkan tanpa perkuatan sebesar 8,60E-03m. Nilai <i>safety factor</i> dengan perkuatan pada penggalian 19,5 m yaitu 2,644 dan masih di angka aman yaitu <2.	<i>nilai total displacement</i> dengan beban sendiri sebesar 0,0271meter dan untuk nilai total displacement dengan beban gempa sebesar 0.02829meter. Nilai <i>safety factor</i> terowongan setelah adanya perkuatan <i>shotcrete</i> dengan beban sendiri adalah sebesar 1,985 dan dengan beban gempa sebesar 1,573.

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Sebelum dengan Penelitian Penulis

Penulis	Jufrizal (2017)	Saptono (2017)	Hatmoko (2018)	Pradana (2022)
Judul	Analisis Pengaruh Penguatan <i>Rockbolt</i> Terhadap Kekuatan Pilar Persegi Di Tambang Bawah Tanah Dengan Pengujian Skala Laboratorium	analisis pengaruh penyangga terhadap deformasi pada terowongan di batuan lemah	Analisis Stabilitas Terowongan dengan Perkuatan Wiremesh dan Rockbolt menggunakan metode elemen hingga	analisis stabilitas terowongan dengan perkuatan rockbolt dan shotcrete menggunakan metode elemen hingga
Lokasi	Laboratorium Bahan Jurusan Teknik Sipil, dan Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang	Terowongan Tol Cisumdawu, Jawa Barat	Proyek Pembangunan Jalur Ganda Kereta Api Notog, Purwokerto-Jawa Tengah	Terowongan Proyek kereta cepat, Halim, Jakarta Timur.
Masalah	Daerah penambangan bawah tanah membutuhkan penyangga pilar dengan ditambahkan perkuatan.	kondisi batuan yang sangat lapuk dan berada di atas elevasi muka air tanah. Didaerah yang mempunyai seismic tektonik yang tinggi.	Memiliki kondisi batuan/tanah yang bermacam-macam maka diperlukan beberapa tipe perkuatan	Memiliki kedalaman yang berada dibawah lebih dari 20meter dan memiliki lalu lintas yang sibuk dalam pembangunan konstruksi
Tujuan	Mengetahui pengaruh <i>rockbolt</i> pada kekuatan pilar	Untuk mengetahui berapa besar deformasi yang terjadi jika diberi perkuatan <i>steel rib</i> dan <i>shotcrete</i> dan <i>concrete lining</i> .	Untuk mencari nilai angka keamanan tanpa perkuatan atau dengan perkuatan <i>rockbolt</i> dan <i>wiremesh</i> .	Untuk mengetahui berapa besar deformasi yang terjadi jika diberi perkuatan <i>rockbolt</i> dan <i>shotcrete</i> . Pengaruh gempa terhadap nilai deformasi dan faktor keamanan.
Metode	Menggunakan data pada pengujian di laboratorium dan analisis menggunakan Phase2	Menggunakan data di lapangan dan laboratorium. Untuk analisis dilakukan berdasarkan teori <i>Hoek-Brown</i> .	Analisis menggunakan metode elemen hingga dan menggunakan <i>software Plaxis v.8.2</i> .	Menggunakan data di lapangan Untuk analisis dilakukan dengan <i>Plaxis v.20..</i>
Hasil Penelitian	pengaruh pemasangan penguatan <i>rockbolt</i> pada pilar menyebabkan terjadinya peningkatan nilai strength factor sebesar 18,36%.serta, nilai horizontal <i>displacement</i> pada model pilar tanpa perkuatan adalah $5,8 \times 10^2$ m dan nilai horizontal displacement dengan rokbolt adalah $2,2 \times 10^2$ m. Terjadi penurunan nilai horizontal displacement sebesar 37,93%.	Nilai deformasi terbesar untuk <i>steel rib</i> sebesar 2.1219 mm dan <i>shotcrete</i> 159.3114 mm. Untuk nilai zona plastis terkecil dari terowongan dengan penyangga <i>steel rib</i> 4.5051 mm dan <i>shotcrete</i> 4.4729 mm, untuk nilai zona plastis terbesar dari penyangga <i>steel rib</i> 113.5986 mm dan <i>shotcrete</i> 111.9032 mm.	Diperoleh nilai <i>safety factor</i> dengan perkuatan <i>wiremesh</i> + 3 <i>rockbolt</i> sebesar 6,551 dan nilai displacement sebesar 0,0123. Sedangkan nilai <i>safety factor</i> dengan perkuatan <i>wiremesh</i> + 4 <i>rockbolt</i> sebesar 6,572. Perbedaan nilai <i>safety factor</i> antara penggunaan 3 <i>rockbolt</i> dengan 4 <i>rockbolt</i> sangat sedikit yaitu sebesar 0,021	<i>nilai total displacement</i> dengan beban sendiri sebesar 0,0271meter dan untuk nilai total displacement dengan beban gempa sebesar 0.02829meter. Nilai <i>safety factor</i> terowongan setelah adanya perkuatan <i>shotcrete</i> dengan beban sendiri adalah sebesar 1,985 dan dengan beban gempa sebesar 1,573.

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Sebelum dengan Penelitian Penulis

Penulis	Darmawan (2018)	Shalaan (2018)	Hermawan (2019)	Pradana (2022)
Judul	Analisis Perilaku Terowongan Sirkular Akibat Beban Gempa dengan Pemodelan Elemen Hingga	<i>Numerical Analysis of TBM Tunnel Lining Behavior using Shotcrete Constitutive Mode</i>	Analisis geoteknik terowongan kereta api Kebasen menggunakan metode elemen hingga 3D	analisis stabilitas terowongan dengan perkuatan rockbolt dan shotcrete menggunakan metode elemen hingga
Lokasi	Stasiun MRT Istora Senyan, Jakarta	Pahang-Selangor raw water tunnel, Malaysia	Jalur Kereta Api Kebasen, Banyumas	Terowongan Proyek kereta cepat, Halim, Jakarta Timur.
Masalah	Kota Jakarta yang berada pada zona percepatan puncak dasar (<i>Peak Ground Acceleration</i>)	Penggalian terowongan berada pada 1200m dibawah permukaan. Panjang terowongan mencapai 44,6 km dan membutuhkan 3 seksi penggalian dengan metode TBM.	Wilayah yang jangkauannya terbatas untuk pembangunan infrastuktur karena daerah perbukitan.	Memiliki kedalaman yang berada dibawah lebih dari 20meter dan memiliki lalu lintas yang sibuk dalam pembangunan konstruksi
Tujuan	Untuk mengetahui perilaku terowongan terhadap pengaruh beban gempa dan dampak terhadap bangunan sekitarnya.	Untuk menghitung besar pengaruh <i>shotcrete</i> sebagai lapisan perkuatan terowongan.	Untuk mengetahui berapa nilai <i>safety factor</i> dan deformasi terowongan	Untuk mengetahui berapa besar deformasi yang terjadi jika diberi perkuatan <i>rockbolt</i> dan <i>shotcrete</i> . Pengaruh gempa terhadap nilai deformasi dan faktor keamanan.
Metode	Analisis menggunakan <i>software Plaxis v.8.6</i> dan <i>ABAQUS V.6.11</i> .	Untuk analisis menggunakan data asli di lapangan dan menggunakan <i>software Plaxis 2D</i> dengan metode numerik.	Menggunakan data di lapangan dan laboratorium dan Analisis dilakukan dengan <i>software Plaxis 3D 2017</i> .	Menggunakan data di lapangan Untuk analisis dilakukan dengan <i>Plaxis v.20..</i>
Hasil Penelitian	<i>Hasil software PLAXIS</i> kenaikan rata-rata yang terjadi sebesar 3,18 mm (22,37 %) untuk <i>Load Case..</i> Untuk <i>software ABAQUS</i> kenaikan rata-rata yang terjadi sebesar 4,43 mm (24,40 %). Untuk <i>Load Case</i> .	Hasil pengujian dengan variasi ketebalan <i>shotcrete</i> yaitu, 0.1m, 0,15m, 0.2m, 0,25m. Nilai distribusi tegangan mengalami penurunan semakin tebal lapisan dan nilai <i>displacement</i> vertikal terjadi penurunan setiap semakin tebal lapisan <i>shotcrete</i> .	Model tanpa perkuatan memperoleh nilai deformasi sebesar 0,417 m dan 0,0737 m pada model dengan perkuatan. Pemodelan terowongan dengan perkuatan mendapatkan hasil nilai faktor kemanan keamanan akhir sebesar $8,35 > 2,5$. Model terowongan tanpa perkuatan adalah $1,84 < 2$.	<i>nilai total displacement</i> dengan beban sendiri sebesar 0,0271meter dan untuk nilai total displacement dengan beban gempa sebesar 0.02829meter. Nilai <i>safety factor</i> terowongan setelah adanya perkuatan <i>shotcrete</i> dengan beban sendiri adalah sebesar 1,985 dan dengan beban gempa sebesar 1,573.

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Sebelum dengan Penelitian Penulis

Penulis	Dhanti (2019)	Yogaswara (2019)	Alamsyah (2020)	Pradana (2022)
Judul	Analisis Stabilitas Terowongan Dangkal pada Tanah Lunak.	Analisis Terowongan Jalan Raya Dengan Proteksi Umbrella Grouting Menggunakan Metode Elemen Hingga 2D	analisa stabilitas dan deformasi Terowongan Kereta Cepat Indonesia China dengan pendekatan numerik tiga dimensi	analisis stabilitas terowongan dengan perkuatan rockbolt dan shotcrete menggunakan metode elemen hingga
Lokasi	Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur dan Kabupaten Barito Selatan, Kalimantan Tengah	Terowongan Tol Cisumdawu, Jawa Barat	Proyek Kereta Api cepat Jakarta-Bandung Halim, Jakarta	Terowongan Proyek kereta cepat, Halim, Jakarta Timur.
Masalah	Belum banyak di Indonesia yang memperhitungkan pengaruh swelling pada penggalian terowongan bawah tanah	Penelitian dilakukandari STA 26+200 sampai dengan STA 26+275 dengan kondisi batuan yang lunak dan posisi terowongan diatas muka air tanah.	Berada diatas elevasi muka air dan terdapat gaya aksial yang besar akibat arus kendaraan diatas terowongan.	Memiliki kedalaman yang berada dibawah lebih dari 20meter dan memiliki lalu lintas yang sibuk dalam pembangunan konstruksi
Tujuan	Untuk mengetahui pengaruh <i>swelling</i> akibat adanya air pada terowongan.	Untuk mengetahui nilai displacement saat diberi perkuatan umbrella grouting.	Untuk mengetahui nilai <i>total displacement</i> , deformasi, dan gaya-gaya dalam dengan perkuatan <i>grouting</i> dan <i>lining precast</i> .	Untuk mengetahui berapa besar deformasi yang terjadi jika diberi perkuatan <i>rockbolt</i> dan <i>shotcrete</i> . Pengaruh gempa terhadap nilai deformasi dan faktor keamanan.
Metode	Menggunakan uji <i>swelling</i> , dan analisis menggunakan <i>software Phase2</i>	Menggunakan data lapangan dan analisis menggunakan Plaxis v8.6 2D	Analisis menggunakan metode numerik tiga dimensi dengan menggunakan <i>software Plaxis 3D</i> .	Menggunakan data di lapangan Untuk analisis dilakukan dengan Plaxis v.20..
Hasil Penelitian	untuk nilai E = 118,83 MPa mengalami displacement pada hari ke 2 (0,2178 m) dan hari ke 4 (0,2428 m). Untuk nilai E = 145,58 MPa mengalami displacement sebesar pada hari ke 2 (0.2178 m) dan hari ke 4 (0,2319 m). Untuk nilai E = 182,54 MPa mengalami displacement sebesar 0,1264 m pada hari ke 2 (0,0914 m) dan hari ke 4 (0,2178m)	Nilai deformasi dari analisis dengan Plaxis 2D lebih besar yaitu 44mm, bila dibandingkan dengan deformasi yang terjadi di lapangan yaitu 30 mm. Hal ini menunjukkan bahwa perkuatan terowongan dengan <i>Umbrella Grouting</i> mampu mengurangi deformasi pada tanah disekitar lubang terowongan.	Hasil gaya-gaya dalam menghasilkan nilai-nilai <i>axial force</i> terbesar 3.101 kN/m; <i>shear force</i> terbesar 584,3 kN/m; dan <i>bending moment</i> 505,9 kNm/m. Penambahan perkuatan grouting tidak optimal karena perbandingan nilai deformasinya tidak signifikan dengan nilai deformasi terbesar keduanya 0,0306 m.	<i>nilai total displacement</i> dengan beban sendiri sebesar 0,0271meter dan untuk nilai total displacement dengan beban gempa sebesar 0.02829meter. Nilai <i>safety factor</i> terowongan setelah adanya perkuatan <i>shotcrete</i> dengan beban sendiri adalah sebesar 1,985 dan dengan beban gempa sebesar 1,573.

(sumber: Alamsyah,2020; Apriyono,2010; Darmawan,2018; Dhanti,20119; Fadhilah,2016; Hatmoko,2018; Hermawan,2019; Jufriзал,2017; Pradana,2022; Saptono,2017; Shalaan,2018; Van Gosliga,2014; Yogaswara,2019)

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Terowongan

Terowongan adalah bangunan lubang tembusan bawah permukaan yang menembus bantala/ground yang terdiri tanah atau batuan dari gunung, sungai, bawah jalan, dan lain-lain dengan fungsi sebagai jalan raya, jalan KA, jalan air, dan sebagainya (Kementerian PUPR, 2011).

Menurut Tibri (2017), terowongan didefinisikan sebagai lubang bukaan yang dibuat dengan dua lubang bukaan yang saling berhubungan langsung atau dengan kata lain kedua lubang bukaan tersebut harus menembus bagian kerak bumi, yakni perbukitan, sebagai media transportasi, drainase, penambangan, dan lain-lain.

Pendapat menurut Kementerian PUPR dan Tibri secara umum dapat dikatakan terowongan adalah sebuah bangunan lubang yang menembus tanah atau batuan dengan fungsi sebagai media konstruksi. Dijelaskan lebih bahwa terowongan memiliki beberapa jenis dengan klasifikasi sebagai berikut.

Menurut Szechy (1967) terowongan berdasarkan fungsinya dibagi menjadi 3 jenis utama sebagai berikut ini.

1. Terowongan lalu lintas adalah terowongan yang digunakan sebagai sarana lalu lintas kendaraan untuk menghubungkan dua tempat, meliputi terowongan kereta api, terowongan jalan raya.
2. Terowongan angkutan adalah terowongan yang digunakan untuk tujuan mempermudah pekerjaan manusia, meliputi terowongan pembangkit listrik, terowongan penyedia air, terowongan drainase, dan terowongan *intake*.

3. Terowongan tambang adalah terowongan yang digunakan untuk kegiatan eksploitasi tambang dan pelayanan rute untuk kegiatan tambang.

Pada penjelasan diatas tadi bahwa Terowongan halim *Tunnel 1* termasuk kedalam jenis terowongan lalu lintas karena sesuai dari fungsinya yang digunakan sebagai jalur transportasi kereta bawah tanah.

3.2 Sistem Penyangga Terowongan

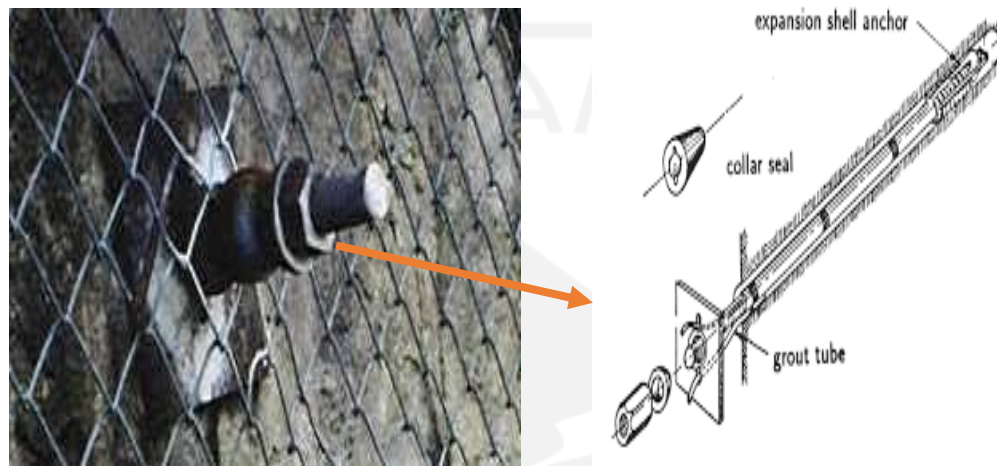
Dalam membangun terowongan sangat diperlukan perkuatan untuk menyangga bagian terowongan agar tidak terjadi kerutntuhan. Perkuatan pada terowongan membentuk sebuah komponen bahan yang menjadi sistem penyangga terowongan. Ada beberapa material yang bias digunakan sebagai perkuatan. Berikut merupakan macam-macam sistem penyangga terowongan.

3.2.1. Rockbolt

Rockbolt merupakan batang baja yang ditancapkan di dalam batuan. *Rockbolt* merupakan sistem ankur dalam terowongan yang bila digunakan akan menjadi kesatuan bagian dari massa batuan. Fungsi *rockbolt* yaitu memberi penguatan massa batuan dengan tujuan memperkecil deformasi atau menjaga kestabilan terowongan. Penggunaan *rockbolt* sebagai perkuatan penyangga harus memperhatikan kondisi batuan. *Rockbolt* tidak dapat digunakan pada batuan/tanah yang terlalu lunak atau terlalu keras. Secara umum penggunaan *rockbolt* memberi pengaruh sebagai berikut, antara lain:

1. pengaruh stabilisator pada batuan yang retak atau yang mengalami penggalian dengan ledakan,
2. merekatkan lapisan, hal ini terjadi jika *rockbolt* ditempatkan dengan menembus lapisan berbeda yang relatif tipis, dan
3. menaikkan kemampuan dukung, tegangan pada *rockbolt* akan menekan batuan sehingga menghasilkan kekakuan yang baik dan peningkatan kekuatan geser.

Ukuran diameter dan panjang *rockbolt* ada berbagai macam. Pada penelitian ini menggunakan *rockbolt* dengan diameter 30 mm dan panjang 3m. Struktur bagian pada *rockbolt* dapat dilihat Gambar 3.1 dibawah ini.

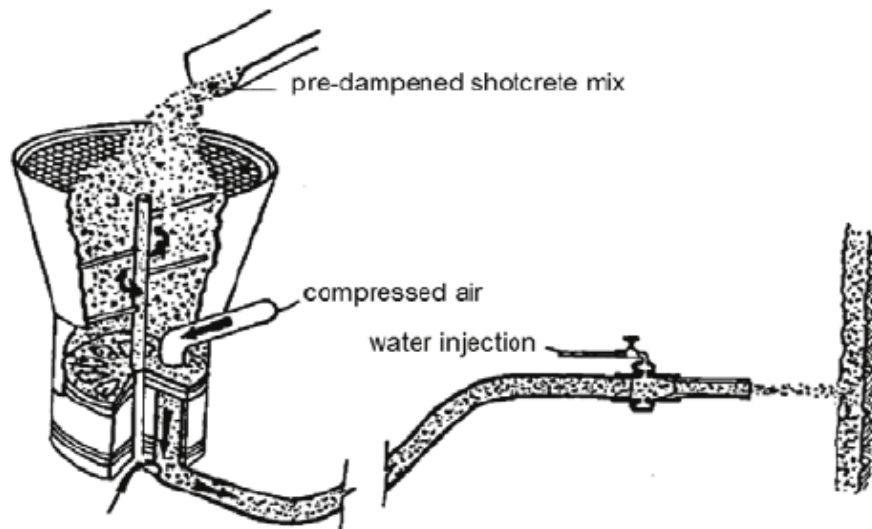


Gambar 3.1 Struktur Bagian *Rockbolt*

(Sumber : Hoek, 2006)

3.2.2 *Shotcrete*

Shotcrete diterapkan untuk menutup permukaan yang terbuka akibat pengeboran dan untuk mendukung rongga pada bukaan terowongan. Beton yang digunakan sebagai *shotcrete* memiliki karakteristik yang hampir sama dengan beton biasa, hanya saja modulus elastisitasnya lebih rendah dari beton biasa. Kekakuan *shotcrete* bertambah seiring dengan pertambahan umur *shotcrete*. Ketebalan *shotcrete* pada konstruksi terowongan tergantung dari luas bukaan terowongan dan sesuai dari perjanjian kontrak. Untuk penggunaan *shotcrete* dapat dilihat pada Gambar 3.2 dibawah ini.



Gambar 3.2 Metode Penggunaan *Dry Mix Shotcrete*

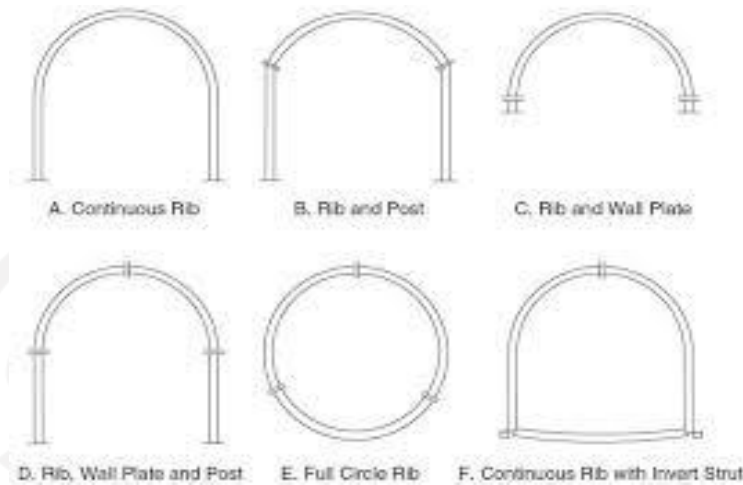
(Sumber : Kolymbus, 2005)

3.2.3 Wiremesh

Wiremesh kawat yang sering digunakan adalah *chailink mesh* dan *weld mesh*. *Chailink mesh* digunakan pada permukaan karena kuat dan fleksibel, sedangkan *weld mesh* terdiri atas kabel baja yang diatur dengan pola segiempat atau bujur sangkar dan disambung dengan cara dipatri pada titiktitik perpotongnya, serta memperkuat beton tembak dan lebih kaku. Dalam hal ini, kawat yang digunakan di terowongan Halim adalah jenis *weld mesh*. Hal itu disebabkan untuk memenuhi fungsinya untuk memperkuat beton tembak agar lebih kaku, selain itu untuk mengikat material batuan yang kecil dan menahannya agar tidak jatuh.

3.2.4 Steel Rib

Steel rib merupakan salah satu jenis penyangga konstruksi terowongan yang terbuat dari baja. Tipe *steel rib* dapat dilihat dalam Gambar 3.3 dibawah ini.



Gambar 3.3 Tipe Steel Rib

(Sumber: Singh dan Rajnish, 2006)

3.3 Faktor Keamanan

safety factor (SF), adalah istilah yang menggambarkan kapasitas struktural dari suatu part atau sistem di luar beban yang diharapkan atau beban aktual. Sederhananya SF adalah seberapa kuat bagian atau sistem itu menahan beban yang diterapkan. Banyak rumus perhitungan Faktor Keamanan lereng (material tanah) yang diperkenalkan untuk mengetahui tingkat kestabilan lereng ini. Rumus dasar Faktor Keamanan. Rumus dasar Faktor keamanan lereng dapat dinyatakan pada persamaan 3.1, Persamaan 3.2, dan Persamaan 3.3 dibawah ini.

$$\tau = c + \sigma \tan \theta \quad (3.1)$$

$$F_s = \frac{\text{Gaya yang menghambat gerak}}{\text{Gaya yang meningkatkan gerak}} \quad (3.2)$$

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (3.3)$$

Faktor Keamanan(FK) lerng terhadap longSORan tergantung pada ratio antara kekuatan geser tanah (τ_f) dan tegangan geser yang bekerja (τ_d). Nilai faktor keamanan terhadap bidang longSOR dapat dilihat pada Tabel 3.1 dibawah ini.

Tabel 3.1 Nilai Faktor Keamanan Terhadap Bidang LongSOR

Faktor Aman	Kejadian
$SF \leq 1,07$	LongSOR sering terjadi
$1,07 \leq SF \leq 1,25$	LongSOR dapat terjadi
$SF \geq 1,25$	LongSOR jarang terjadi

(Sumber: Bowles,1984)

Salah satu metode dalam mencari nilai faktor keamanan pada program *Plaxis v.20* adalah dengan metode fellinius. Metode ini menyatakan asumsi bahwa keruntuhan terjadi melalui rotasi dari suatu blok tanah pada permukaan longSOR berbentuk lingkaran (sirkuler) dengan titik O sebagai titik pusat rotasi. Metode ini juga menganggap bahwa gaya normal bekerja ditengah-tengah slice. Diasumsikan juga bahwa resultan gaya-gaya antar irisan pada tiap irisan adalah sama dengan nol, atau dengan kata lain bahwa resultan gaya-gaya antar irisan diabaikan. Persamaan 3.4 dapat dilihat dibawah ini.

$$F = \frac{C \cdot L + \tan \varphi (W_i \cos \alpha_i)}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (3.4)$$

Dimana:

F = faktor aman

c = kohesi (kN/m²)

φ = sudut gesek dalam (derajat)

α_i = sudut bidang gelincir pada tiap irisan (derajat)

W_i = berat tiap irisan tanah pada irisan ke-i (kN)

3.4 Deformasi

Salah satu fungsi yang terpenting dalam studi mekanika tanah adalah perkiraan mengenai besarnya tegangan yang terjadi akibat suatu pembebanan yang akan menghasilkan deformasi atau perubahan dari kondisi semula. Setiap beban akan menghasilkan tegangan dan regangan yang berintegrasi pada zona tegangan yang ditinjau karena menyebabkan deformasi yang pada umumnya dapat berupa penurunan.

Deformasi terbagi menjadi dua jenis yaitu deformasi elastis dan deformasi plastis. Deformasi elastis adalah deformasi atau perubahan bentuk yang disebabkan oleh pemberian beban, dimana apabila beban dihilangkan maka bentuk dan ukuran akan kembali ke bentuk semula atau deformasi yang terjadi akan hilang. Sedangkan, deformasi plastis adalah perubahan bentuk yang merupakan kelanjutan dari deformasi elastis yang bersifat permanen meskipun beban dihilangkan.

3.5 Modulus Elastisitas Tanah

Modulus elastisitas diartikan sebagai perbandingan antara tegangan dan regangan. Tegangan (σ) adalah besar gaya yang bekerja, dibagi dengan luas permukaan dari sampel material. Sedangkan regangan (ϵ) adalah perubahan bentuk akibat tegangan, diukur sebagai rasio perubahan dari sejumlah dimensi benda terhadap dimensi awal dimana perubahan terjadi.

Nilai modulus young merupakan nilai yang menunjukkan besarnya nilai elastisitas tanah yang merupakan perbandingan antara tegangan dan regangan. Nilai ini bisa didapatkan dari *Triaxial Test*. Nilai Modulus elastisitas (E_s) secara empiris dapat ditentukan dari jenis tanah dan data sondir seperti terlihat pada Tabel 3.2 berikut ini.

Tabel 3.2 Korelasi antara jenis tanah dengan modulus elastisitas

Jenis Tanah	Modulus Young (Es) (x 10 ³ KN/m ²)	Angka Poisson (ν)
<i>Loose Sand</i>	10.35 – 24.15	0.20 – 0.40
<i>Medium Dense Sand</i>	17.25 – 27.60	0.25 – 0.40
<i>Dense Sand</i>	34.50 – 55.20	0.30 – 0.45
<i>Silty Sand</i>	10.35 – 17.25	0.20 – 0.40
<i>Sand and Gravel</i>	69.00- 172.5	0.15 – 0.35
<i>Soft Clay</i>	2.07 – 5.18	0.20 – 0.50
<i>Medium Clay</i>	5.18 – 10.35	0.20 – 0.50
<i>Stiif Clay</i>	10.35 – 24.15	0.20 – 0.50

(Sumber: Das,1995)

3.6 Metode Elemen Hingga

Konsep dari metode elemen hingga (*finite element method*) adalah dengan cara membagi model yang akan dianalisis menjadi berhingga yang meliputi bagian-bagian kecil yang disebut elemen. Analisis permasalahan dilakukan pada elemen-elemen ini. Tiap titik simpul (nodul) dari elemenelemen akan membentuk rangkaian yang secara keseluruhan mendekati bentuk nodul semula.

Metode elemen juga merupakan salah satu metode pendekatan secara numerik yang merupakan metode differensial. Metode ini dapat digunakan untuk mengetahui dan menganalisis tegangan dan perpindahan pada sebuah struktur. Ada beberapa jenis elemen hingga yang ada dibawah sebagai berikut ini.

1. Elemen hingga satu dimensi, disebut juga dengan elemen garis.
2. Elemen hingga dua dimensi, disebut juga elemen bidang yang berbentuk segitiga atau segiempat.
3. Elemen hingga tiga dimensi, yang dapat berbentuk prisma segienam. Bagian-bagian dari suatu elemen dapat berupa titik simpul, garis simpul dan bidang simpul seperti terlihat dalam gambar.

Semakin kecil ukuran dari elemen-elemen, maka ketelitiannya akan semakin tinggi atau semakin mendekati jawaban penyelesaian dari suatu permasalahan yang diteliti. Untuk menjalankan metode elemen hingga ini dibutuhkan suatu perangkat lunak (*software*) pada komputer untuk menganalisis suatu nodal-nodal tersebut. Program yang akrab digunakan untuk analisis terowongan adalah program *Plaxis*.

3.7 Program *Plaxis v.20*

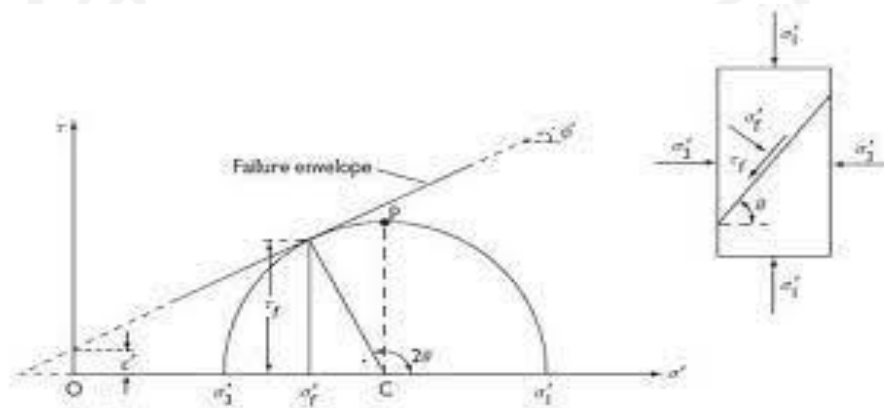
Plaxis adalah program elemen hingga yang dikembangkan untuk analisis deformasi, stabilitas dan aliran air tanah dalam rekayasa geoteknik. Perkembangan *plaxis* dimulai pada tahun 1987 di *Delft University of Technology* sebagai inisiatif Kementerian Pekerjaan Umum dan Pengelolaan Air (*Rijkswaterstaat*) Belanda. Tujuan semula adalah untuk mengembangkan kode elemen hingga 2D yang mudah digunakan untuk analisis tanggul sungai di tanah lunak dari dataran rendah Belanda. Dalam beberapa tahun berikutnya, *plaxis* diperluas untuk mencakup sebagian besar wilayah lain untuk rekayasa geoteknik. Karena terus berkembang, perusahaan *plaxis (Plaxis bv)* dibentuk pada tahun 1993.

Sudah banyak yang versi yang dikeluarkan perusahaan *plaxis*, untuk penelitian ini penulis menggunakan *software* program *Plaxis v.20*. Program ini dapat mencari tahu seberapa besar pengaruh perkuatan terhadap nilai *safety factor* dan deformasi yang terjadi pada terowongan

3.8 Kriteria Keruntuhan Batuan

Keruntuhan geser (*shear failure*) tanah terjadi bukan disebabkan hancurnya butir-butir tanah tersebut tetapi karena adanya gerak relatif antara butir-butir tanah tersebut. Kriteria keruntuhan Mohr Coulumb menjelaskan bahwa keruntuhan sebagai akibat dari kombinasi kritis antara tegangan normal dan geser dan bukan hanya akibat tegangan geser minimum dan tegangan geser maksimum saja.

Model Mohr Coloumb membutuhkan lima buah parameter yang umum digunakan oleh para ahli geoteknik dan dapat diperoleh dari uji-uji yang umum dilaksanakan di laboratorium. Parameter-parameter tersebut adalah modulus young (E_{ref}) (kN/m²), angka poisson (γ), sudut geser (ϕ) (°), kohesi (c_{ref}) (kN/m²), dan sudut dilatansi (ψ) (°). Lingkaran Mohr berbentuk setengah lingkaran dengan koordinat (τ) dan (σ') dillihatkan dalam Gambar 3.4 di bawah ini.



Gambar 3.4 Metode lingkaran Mohr dan Coulumb

(Sumber : Mohr,2002)

Dari lingkaran Mohr dapat dilihat:

σ'_1 = tegangan utama mayor efektif (kN/m²)

σ'_3 = tegangan utama minor efektif (kN/m²)

θ = sudut keruntugan (°) c' = kohesi (kN/m²)

ϕ' = sudut gesek dalam efektif

BAB IV

METODE PENELITIAN

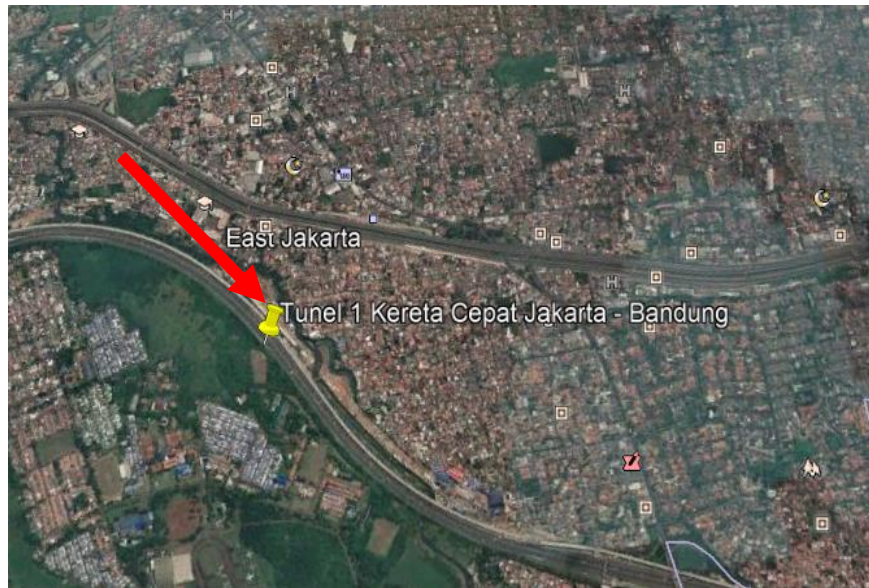
4.1 Umum

Metode penelitian secara umum adalah sebuah proses atau cara yang digunakan secara spesifik untuk menyelesaikan masalah yang diajukan dengan sebuah riset untuk mendapatkan data dengan tujuan tertentu. Secara umum data yang telah didapatkan dari penelitian dapat digunakan untuk memahami, merumuskan, dan memecahkan suatu masalah. Memahami artinya memperjelas suatu masalah yang tidak diketahui kemudian menjadi mengerti. Merumuskan berarti dapat menjabarkan suatu masalah yang ingin dibuktikan. Memecahkan berarti mengupayakan agar masalah tidak terjadi.

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif analitis adalah penelitian dengan cara mengumpulkan data-data yang selanjutnya dijelaskan dan dianalisis. Pada penelitian ini dilakuksn beberapa langkah dalam proses pengambilan data dan pengolahan data untuk mendapatkan hasil penelitian.

4.2 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan pada proyek kereta api cepat Jakarta-Bandung di Halim, Jakarta Timur yang sedang dikerjakan oleh PT. Kereta Api Cepat Indonesia China. Proyek ini membangun sebanyak 13 terowongan, salah satunya terletak di Jalan Tol Jakarta-Cikampek KM 5+500 Halim, Jakarta Timur yang membentang sepanjang 1885 meter. Berikut lokasi terowongan dapat dilihat pada Gambar 4.1 dibawah ini.



Gambar 4.1 Peta lokasi Penelitian

(Sumber: Google Earth Pro)

4.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut ini.

1. Perangkat keras (*hardware*), berupa laptop dan komputer.
2. Perangkat lunak (*software*), berupa program *Plaxis v.20* dengan *operating system windows 10*.

4.4 Tahapan Penelitian

Pada penelitian ini ada beberapa tahapan dalam penelitian untuk penyelesaian tugas akhir ini. Diperlukan susunan yang sistematis dalam mencapai tujuan dari penelitian ini. Berikut beberapa tahapan yang dilakukan penulis pada penelitian ini

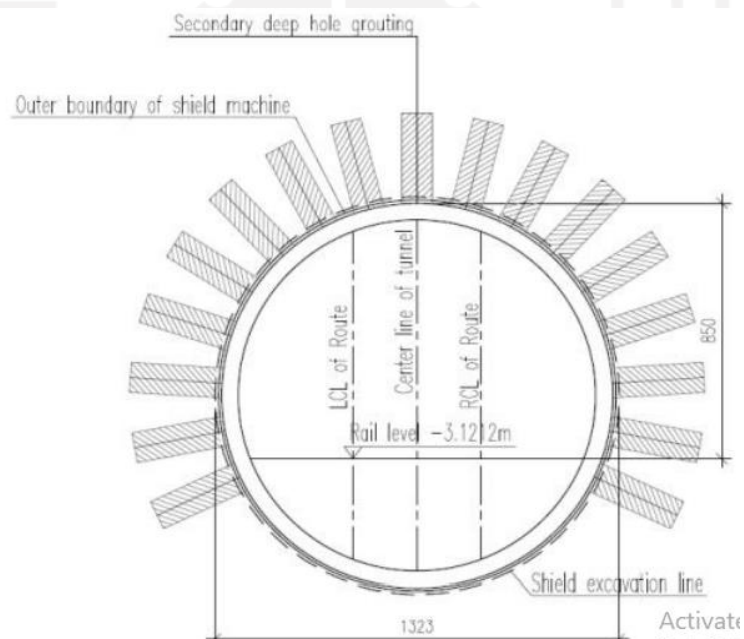
4.4.1 Pengumpulan Data Struktur Terowongan

Pengumpulan data dilakukan demi memperoleh data yang akan diolah pada tahapan selanjutnya. Data struktur diperlukan untuk membuat geometri model

terowongan. Untuk mendapatkan data-data yang dibutuhkan sudah diperoleh langsung dari perusahaan terkait yaitu PT. Kereta Cepat Indonesia China. Adapun data struktur terowongan yang diambil sebagai berikut ini.

1. Panjang terowongan.
2. Diameter terowongan.
3. Penampang terowongan.

Terowongan ini memiliki panjang total 1.885 meter dan memiliki diameter berukuran 13,23 meter. Bentuk penampang terowongan dapat dilihat pada Gambar 4.2 dibawah ini.



Gambar 4.2 Data Penampang Terowongan

(sumber: PT. KCIC, 2020)

4.4.2 Data Parameter Tanah

Parameter tanah sebagai masukan (*input*) pada analisis untuk permodelan terowongan menggunakan Plaxis v.20. Data parameter tanah diperoleh dari hasil

penyelidikan tanah yang sudah dilakukan oleh PT. Kereta Api Cepat Indonesia China. Data parameter tanah dapat dilihat pada Tabel 4.1 dibawah ini.

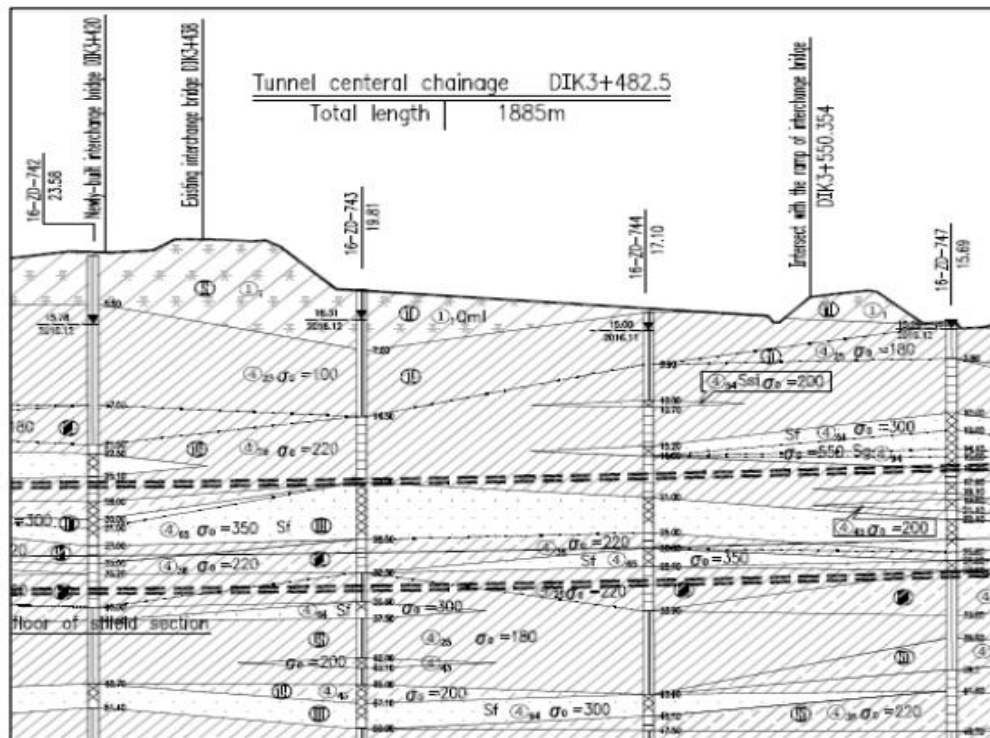
Tabel 4.1 Parameter Tanah Tiap Lapisan

Tebal Lapisan [m]	N_{SPT}	Jenis Tanah	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E' [kPa]	ϕ' [°]	c' [kPa]	k [m/day]
5,5	4	clay	14	15	6.000	29	16	0,000864
11,5	8	clay	15	16	12.000	31	20	0,000864
9,7	48	clay	17	18	72.000	25	46	0,000864
2	50	sand	20	21	38.300	48	9	8,64
1,2	50	clay	17	18	75.000	27	43	0,00864
5,3	49	sand	20	21	37.534	47	7	8,64
15,75	30	clay	16	17	45.000	42	50	0,000864
2	48	silt	19	20	72.000	28	45	0,0864
1	50	sand	18	19	38.300	48	20	0,864
0,7	32	sand	18	19	24.512	42	17	0,864
1,5	33	clay	17	18	49.500	43	50	0,00864

(sumber: PT. KCIC, 2020)

4.4.3 Data Topografi

Data topografi yang digunakan untuk penyelidikan tanah yang ada dibawah permukaan. Bentuk topografi dari sepanjang trase terowongan dapat dilihat pada Gambar 4.3 dibawah ini.

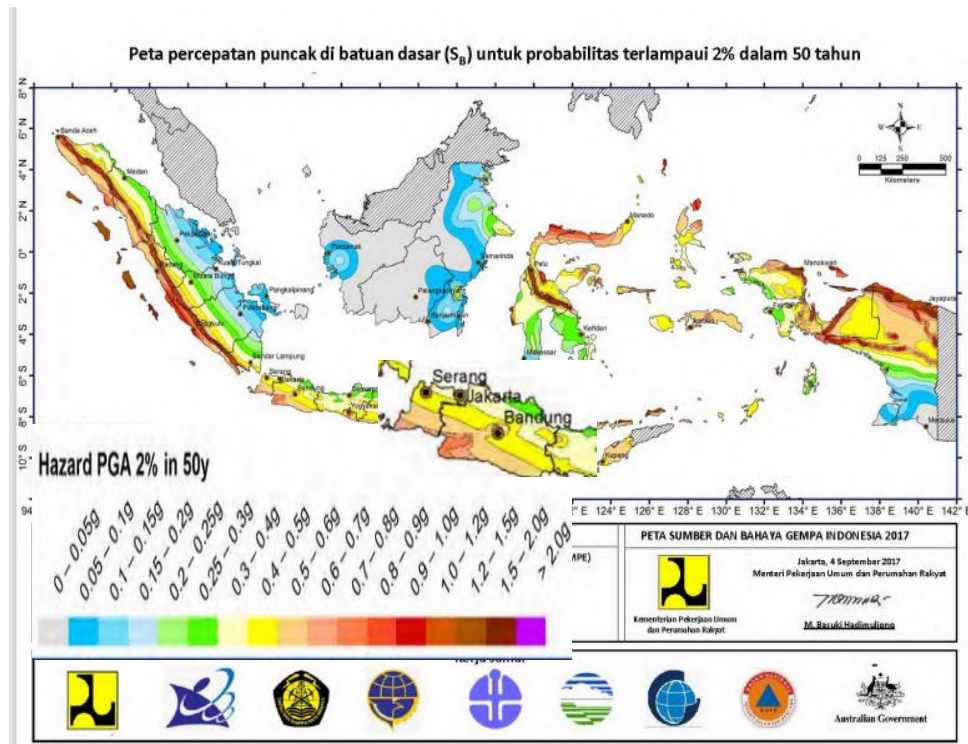


Gambar 4.3 Data topografi bawah tanah sepanjang trase terowongan

(Sumber: PT. KCIC, 2020)

4.4.4 Data Gempa

Data gempa yang digunakan merupakan data dari peta Pusat Studi Gempa Nasional tahun 2017. Dalam mengetahui beban gempa menggunakan peta percepatan dengan probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun. Dari peta pada Gambar 4.4, wilayah Jakarta masuk pada zona yang mempunyai percepatan puncak gempa sebesar 0,4g. Peta gempa dapat dilihat pada Gambar 4.4 dibawah ini.

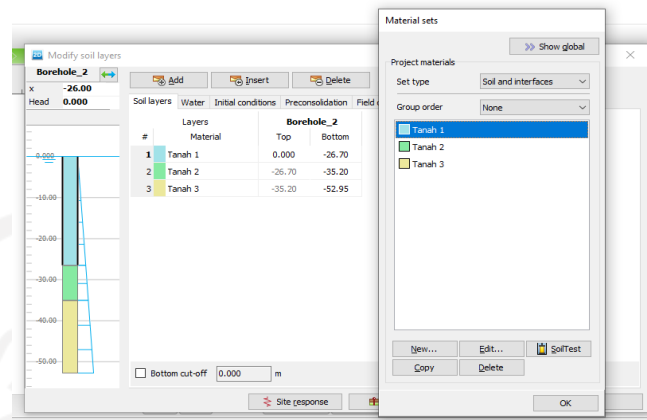


Gambar 4.4 Data Peta Gempa
 (sumber: Pusat Studi Gempa Nasional, 2017)

4.5 Langkah-Langkah Analisis dengan *Plaxis v.20*

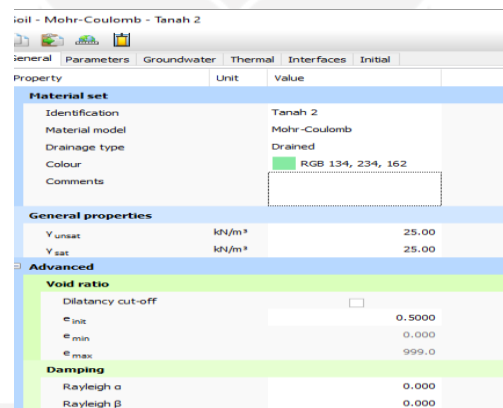
4.5.1 Pembuatan Pemodelan *Soil*

Dalam pembuatan pemodelan tanah atau *soil* diperlukan data-data sekunder berupa material tanah yang didapat dari PT. Kereta Cepat Indonesia China. Pada *Plaxis v.20* untuk membuat pemodelan tanah dapat dengan klik menu *<Borehole>*. Berikut dibawah ini merupakan pembuatan pemodelan tanah pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Lembar Jendela Borehole

Setelah pemodelan tanah sudah dibuat dimasukkan data tanah untuk input pada tab *material sets*. Pemodelan tanah ini menggunakan tipe Mohr-Coloumb. Berikut *material sets* tanah dapat dilihat pada Gambar 4.6 dibawah ini.



Gambar 4.6 Material Sets Tanah

4.5.2 Pembuatan *Material Sets Shotcrete*

Dalam pembuatan model *material sets* dari kekuatan *shotcrete* diperlukan data-data sekunder yang didapat pada PT. Kereta Cepat Indonesia China. Dengan klik CTRL+M pada keyboard dan pada tab *set type* pilih '*Plates*' lalu, Klik '*New*' nanti akan muncul jendela *material sets plates*. Berikut dapat dilihat pada Gambar 4.7 dibawah ini.

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		concrete lining
Comments		
Colour		RGB 0, 0, 255
Material type		Elastic
Properties		
Isotropic		<input checked="" type="checkbox"/>
EA ₁	kN/m	6.000E6
EA ₂	kN/m	6.000E6
EI	kN m ² /m	20.00E3
d	m	0.2000
w	kN/m/m	55.60
v (nu)		0.1500
Rayleigh α		0.000
Rayleigh β		0.000
Prevent punching		<input checked="" type="checkbox"/>

Gambar 4.7 Material Sets Shotcrete

4.5.3 Pembuatan Material Sets Rockbolt

Dalam pembuatan model *material sets* dari kekuatan *rockbolt* diperlukan data-data sekunder yang didapat pada PT. Kereta Cepat Indonesia China. Dengan klik CTRL+M pada keyboard dan pada tab *set type* pilih ‘*Embedded beam row*’ lalu, Klik ‘*New*’ nanti akan muncul jendela *material sets embedded beam row*. Berikut dapat dilihat pada Gambar 4.8 dibawah ini.

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		rockbolt 30mm
Comments		
Colour		RGB 199, 82, 143
Material type		Elastic
Properties		
E	kN/m ²	300.0E9
V	kN/m ³	75.00
Beam type		Predefined
Predefined beam type		Massive circular beam
Diameter	m	0.03000
A	m ²	0.7065E-3
I	m ⁴	0.03976E-6
L spacing	m	1.000
Rayleigh α		0.000
Rayleigh β		0.000
Axial skin resistance		
Axial skin resistance		Linear
T _{skin, start, max}	kN/m	63.00
T _{skin, end, max}	kN/m	63.00
Lateral resistance		
Lateral resistance		Unlimited
Base resistance		
F _{max}	kN	0.000

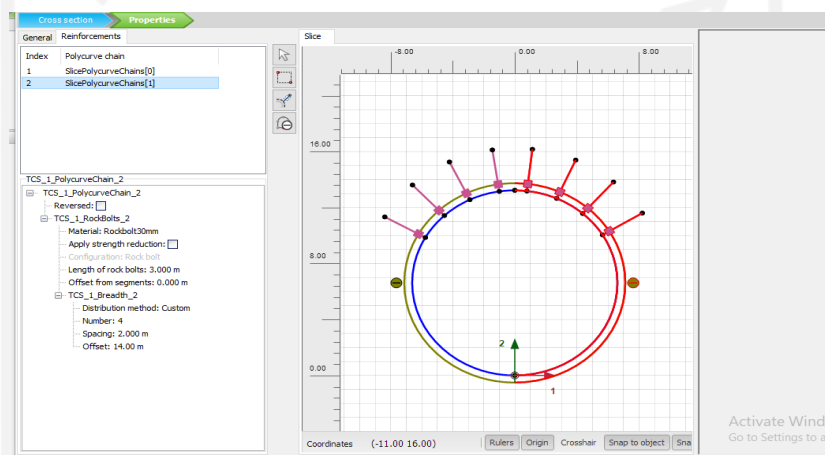
Gambar 4.8 Material Sets Rockbolt

4.5.4 Pembuatan Pemodelan Geometri Terowongan

Pemodelan terowongan dilakukan menggunakan program *software Plaxis v.20* dengan menganalisis data lapangan yang sebelumnya sudah didapat. Tujuan dari

pemodelan terowongan yaitu, memodelkan geometri bentuk penampang terowongan sesuai dengan gambar rencana yang nantinya akan digunakan dalam simulasi analisis.

Adapun pemodelan dapat dimulai dengan klik menu <Tunnel> lalu, sesuaikan bentuk terowongan dengan gambar rencana dengan klik pada tab 'cross section'. Untuk memasukan perkuatan pada pemodelan terowongan dapat klik tab 'properties'. Berikut merupakan pemodelan geometri terowongan dapat dilihat pada Gambar 4.9 dibawah ini.



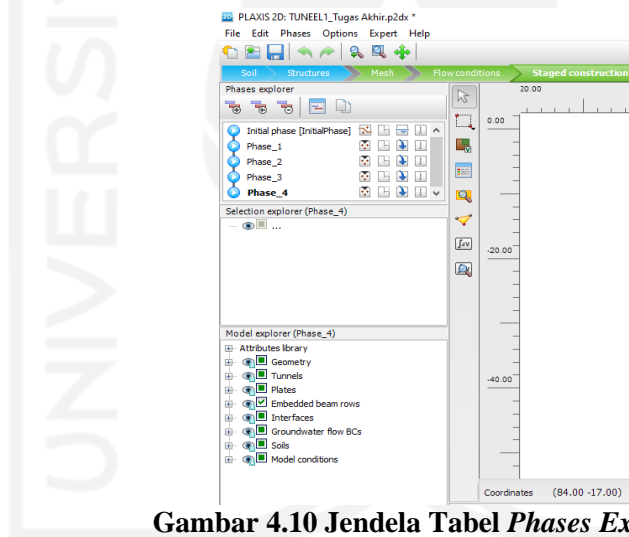
Gambar 4.9 Pemodelan terowongan dengan Plaxis v.20

Dalam melakukan pemodelan terowongan penulis hanya memodelkan terowongan pada trase STA DIK3+420. Pemodelan ini menambahkan perkuatan *rockbolt* dan *shotcrete* dalam melakukan analisis stabilisasi terowongan. Pengaruh beban gempa juga ditinjau dalam melakukan analisis stabilisasi terowongan. Jadi, variasi pemodelannya membandingkan pengaruh beban mati dengan saat ditambahkan beban gempa. Adapun variasi permodelannya sebagai berikut ini.

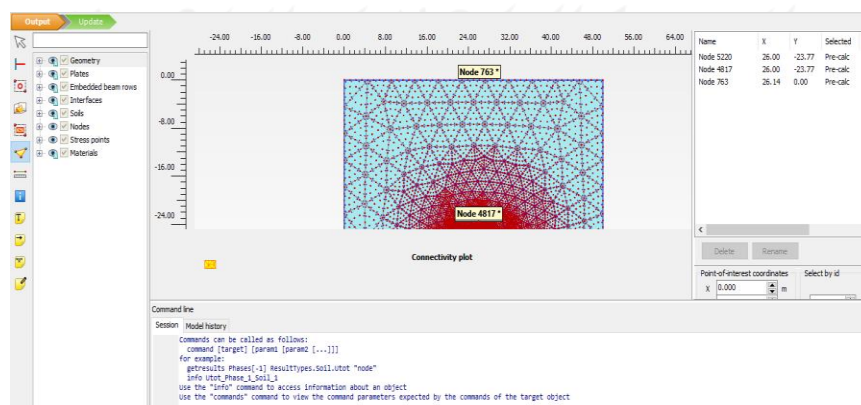
1. Pemodelan terowongan tanpa perkuatan/saat penggalian.
2. Pemodelan terowongan dengan perkuatan *shotcrete*.
3. Pemodelan terowongan dengan perkuatan *shotcrete* + 2 *rockbolt*.
4. Pemodelan terowongan dengan perkuatan *shotcrete* + 4 *rockbolt*.
5. Pemodelan terowongan dengan perkuatan *shotcrete* + 6 *rockbolt*.
6. Pemodelan terowongan dengan perkuatan *shotcrete* + 8 *rockbolt*.

4.5.5 Tahap Perhitungan

Setelah penyusunan dalam pemodelan terowongan pada *Plaxis v.20* dilakukan tahap perhitungan. Untuk tahap perhitungan ini masuk ke menu *staged construction* dengan pemodelan geometri terowongan dibagi menjadi beberapa 'phase' yang dapat diinput pada tabel *phases explorer*. Setelah membagi menjadi beberapa *phase*, langkah selanjutnya menentukan titik *node* dengan klik ikon 'select icon' yang otomatis akan diarahkan ke program *plaxis output*. Pada program *plaxis output* ini pilih titik *node* yang ada dibagian atas pemodelan tanah dan pemodelan struktur terowongan. Adapun untuk menginput *phase* dan menentukan titik *node* dapat dilihat pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 dibawah ini.

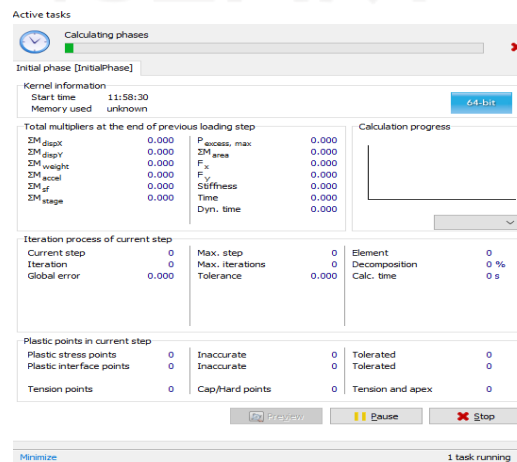


Gambar 4.10 Jendela Tabel *Phases Explorer*



Gambar 4.11 Titik Node Pada Pemodelan Terowongan

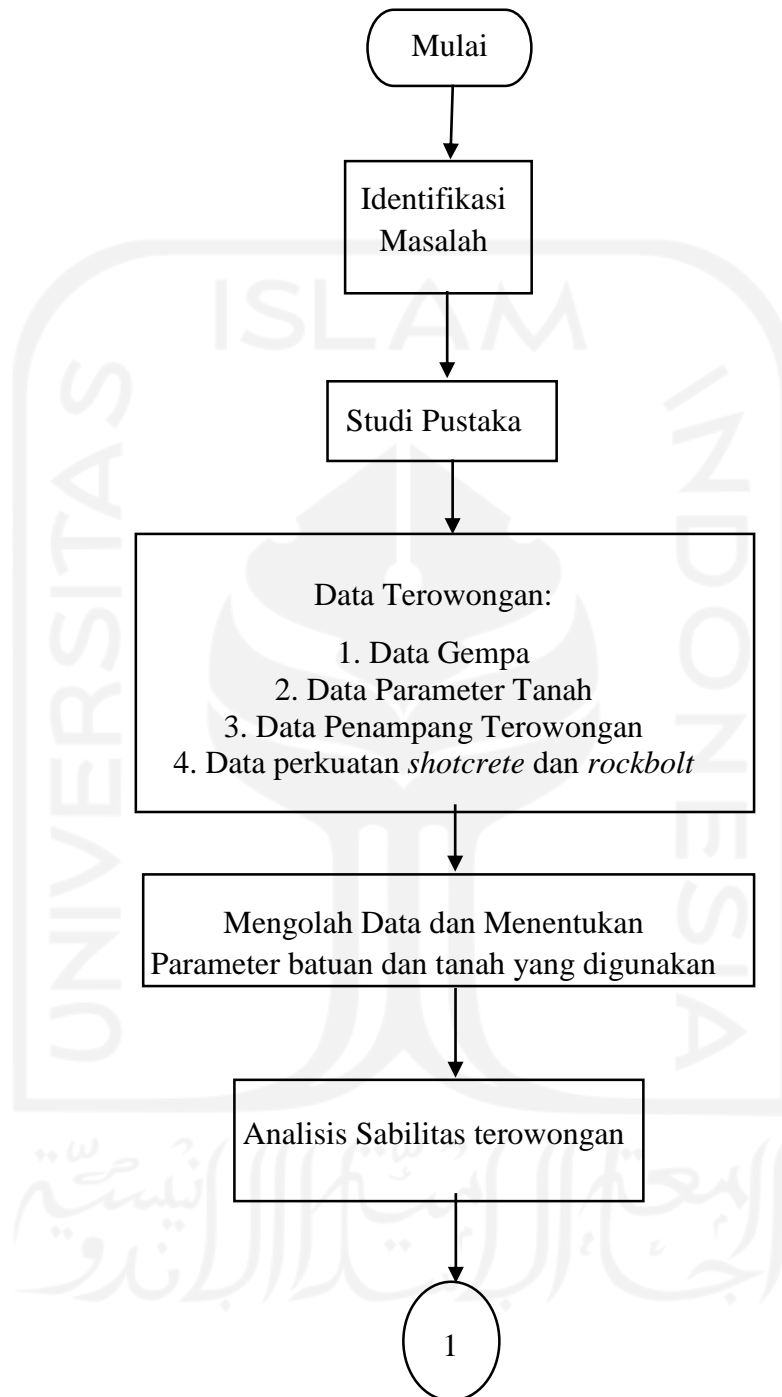
Setelah menentukan titik *node* dapat kembali ke pemodelan terowongan lagi dengan klik menu *Update* pada *plaxis output*. Selanjutnya untuk memproses hasil *input* data-data sekunder menjadi *output* hasil analisis bisa klik tombol '*calculate*' dan jika sudah tidak ada *error* pada proses *calculate*, bisa dilanjutkan dengan klik tombol '*view output*' yang otomatis akan diarahkan ke program *plaxis output*. Adapun proses *calculate* pemodelan terowongan dapat dilihat pada Gambar 4.12 dibawah ini.

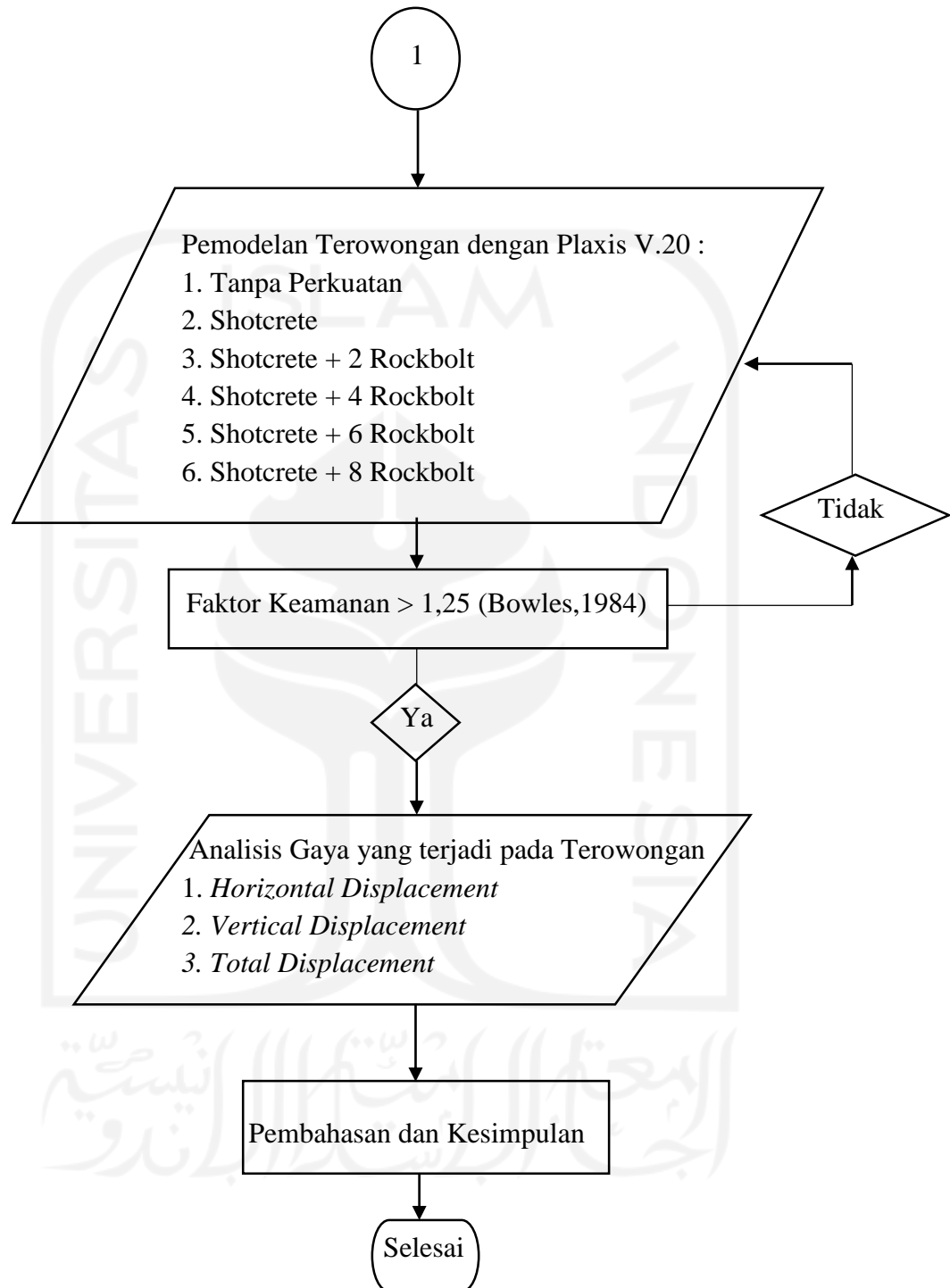


Gambar 4.12 Proses Calculate

4.6 Bagan Alir Penelitian

Pada setiap penelitian diperlukan tahapan untuk mulai proses dari awal hingga akhir yang digambarkan dengan bagan alir penelitian. Disetiap bagan alir penelitian akan berisi tahapan-tahapan yang dimulai dari identifikasi masalah, pengumpulan data, analisis, pembahasan, hingga memperoleh kesimpulan dan digambarkan pada bagan alir penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 4.13 dibawah ini.





Gambar 4.13 Bagan Alir Penelitian

BAB V

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

5.1 Terowongan Asli

Pada tugas akhir ini, penulis meneliti terowongan yang ada pada proyek pembangunan kereta cepat Jakarta-Bandung pada STA DIK3+420. Letak Terowongan yang ada dibawah permukaan tanah dengan kedalaman 40 meter membuat lapisan tanah pada kedalaman tertentu memiliki jenis tanah yang bervariasi. Setiap lapisan tanah dengan tebal dan jenis yang berbeda perlu dilakukan penyelidikan tiap lapisan tanah dalam rancangan pembangunan terowongan. Pembangunan terowongan ini proses pengeboran menggunakan metode *Tunnel Bored Machine* (TBM). Metode *Tunnel Bored Machine* (TBM) terbilang baru di Indonesia melakukan pengeboran terowongan. Dalam metode ini penggalian tanah menggunakan alat mata bor yang berbentuk biasanya lingkaran mengikuti bentuk dan diameter lubang terowongan. Mata bor yang digunakan pada *Tunnel 1* dapat dilihat pada Gambar 5.1 dibawah ini



Gambar 5.1 Penggunaan Mata Bor *Tunnel Bored Machine*

(sumber: PT.KCIC,2020)

Dalam penelitian ini penulis ingin mengetahui kekuatan tanah menahan besar beban yang diterima saat proses pengeboran. Untuk melakukan penelitian ini diperlukan bantuan *software* dari Plaxis v.20. Program *software* Plaxis v.20 yang digunakan dapat untuk membuat pemodelan terowongan. *Output* yang akan didapatkan dari pemodelan tersebut adalah mengetahui area yang mudah terjadi keruntuhan dengan ditandai dari spektrum warna. Plaxis v.20 juga dapat menganalisis seberapa besar deformasi terowongan yang terjadi dan mengetahui angka keamanan terowongan.

5.2 Analisis Terowongan Tanpa Perkuatan

Analisis terowongan pada STA DIK3+420 proyek kereta cepat Jakarta-Bandung dalam plaxis v.20 menggunakan 2 dimensi dalam pemodelannya. Dalam membuat pemodelan terowongan dalam plaxis v.20 perlu data tanah, data terowongan, dan data gempa. Setelah pemodelan telah dibuat, akan dilakukan analisis terowongan dengan melihat nilai deformasi dan faktor keamanan dan menggunakan beban gempa yang terjadi di wilayah tersebut.

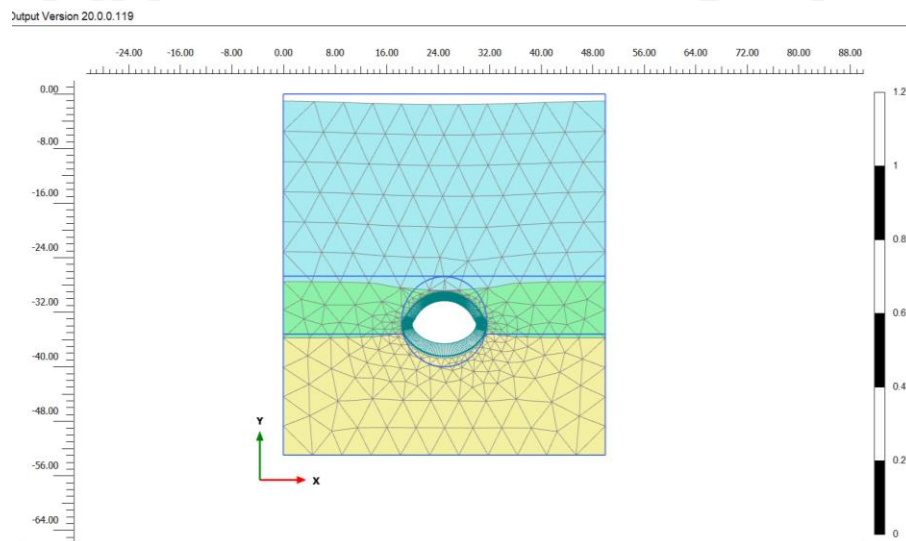
Analisis dapat menilai kekuatan terowongan terhadap keruntuhan yang terjadi dan jika nilai deformasi terowongan besar serta faktor keamanan yang tidak sesuai standar maka, perlu solusi untuk menghindari terowongan mengalami keruntuhan. Hal yang perlu dilakukan untuk mendapatkan nilai deformasi dan faktor keamanan yaitu dengan membuat pemodelan terowongan dengan kondisi asli di lapangan dalam plaxis v.20. Berikut merupakan pemodelan terowongan pada STA DIK3+420.

5.2.1 Pemodelan Terowongan Tanpa Perkuatan

Pemodelan dibuat dengan kondisi asli terowongan, dimana bagian terowongan terdalam berada 40 meter dibawah permukaan tanah dan diameter terowongan sebesar 13.23 meter. Untuk membuat pemodelan juga diperlukan data tanah untuk mengetahui

ada berapa lapisan tanah dan ketebalan tanah tiap lapisan disekitar permukaan terowongan.

Lapisan tanah disekitar terowongan terdapat 3 lapisan yang berbeda ketebalannya. Lapisan atas memiliki ketebalan 26.70 meter dan lapisan kedua memiliki ketebalan 8.5 meter sedangkan, lapisan bawah memiliki ketebalan 17.75 meter. Pemodelan dapat dilihat pada Gambar 5.2 berikut ini.



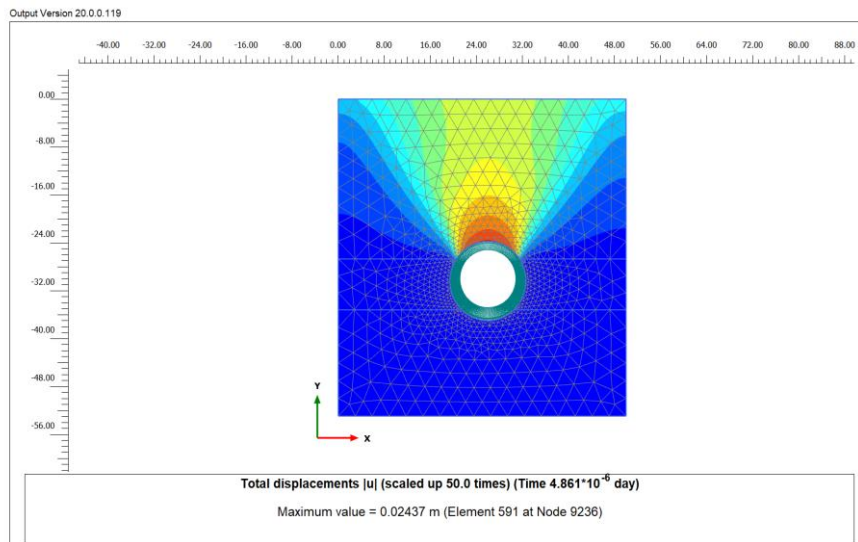
Gambar 5.2 Pemodelan Terowongan pada STA DIK 3+420

5.2.2 Analisis Deformasi dan *Safety Factor* Terowongan Tanpa Perkuatan

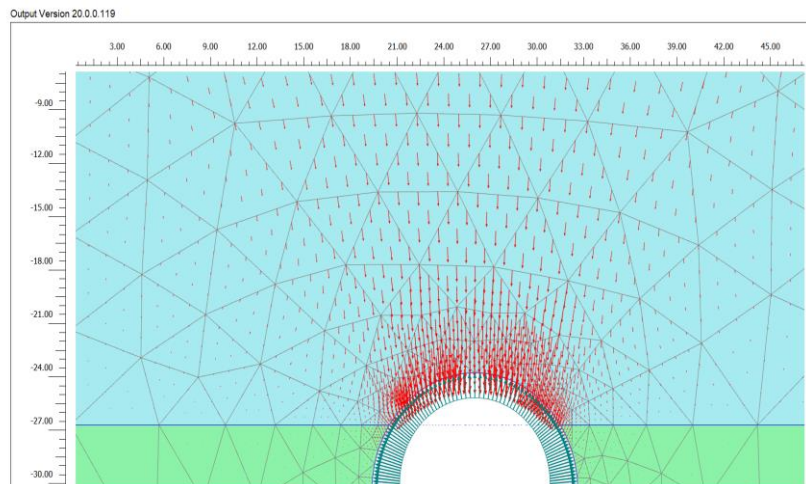
Pada analisis ini menggunakan beban sendiri dan beban gempa untuk mengetahui besar nilai deformasi dan faktor keamanan dari terowongan saat proses pengeboran. Pada saat pengeboran terowongan perlu dilakukan analisis apakah dapat menahan beban dari keruntuhan yang terjadi.

Setelah dilakukan analisis dengan program Plaxis v.20, terowongan tanpa perkuatan dengan beban sendiri mengalami *displacement* secara vertical, horizontal dan *displacement* terbesar atau *total displacement*.

Nilai *total displacement* pada terowongan tanpa perkuatan dengan beban sendiri sebesar 0,02437meter. Hasil nilai *total displacement* dengan program Plaxis v.20 dapat dilihat pada Gambar 5.3 dan untuk arah pergerakan tanah pada Gambar 5.4 dibawah ini.

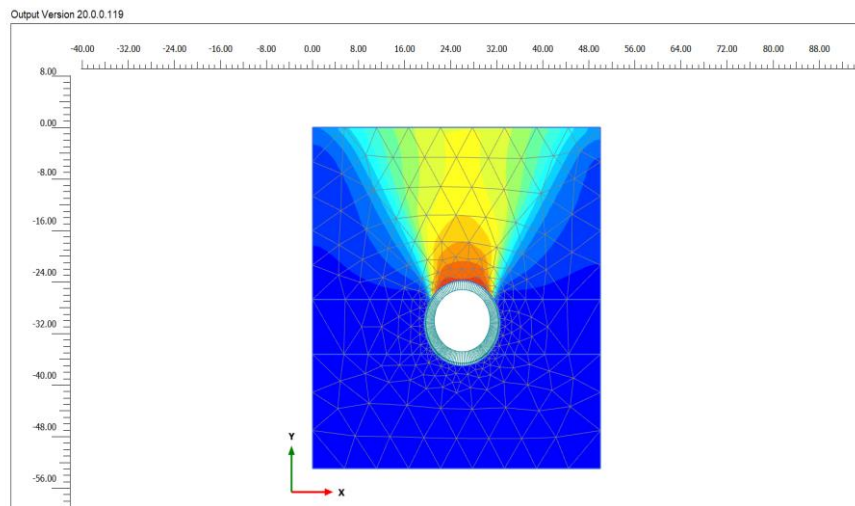


Gambar 5.3 Total displacement Terowongan Tanpa Perkuatan



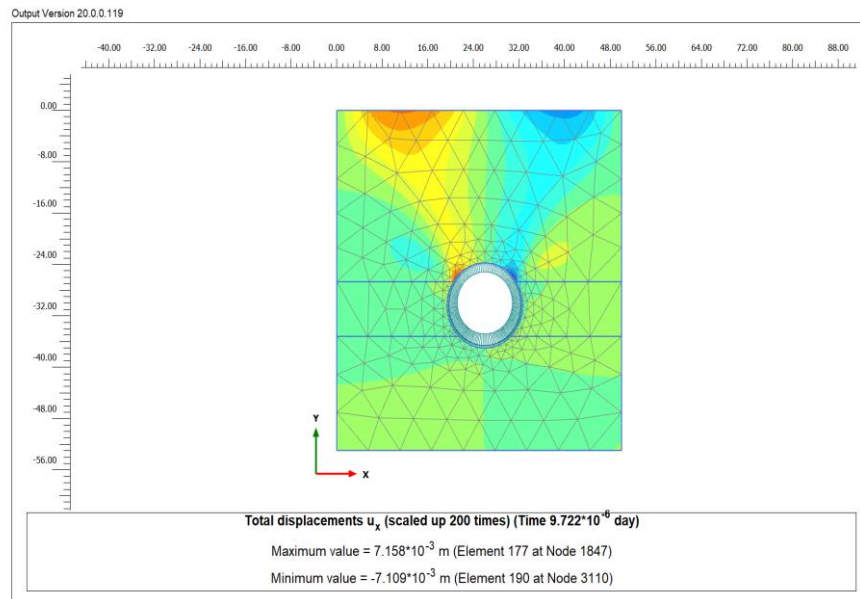
Gambar 5.4 Arah Pergerakan Tanah Terowongan Tanpa Perkuatan

Untuk hasil *safety factor* dengan beban sendiri menunjukkan nilai sebesar 0,507. Hal ini terowongan mengalami keruntuhan pada proses pengeboran. Pola keruntuhan terowongan saat pengeboran dapat dilihat pada Gambar 5.5 dibawah ini.

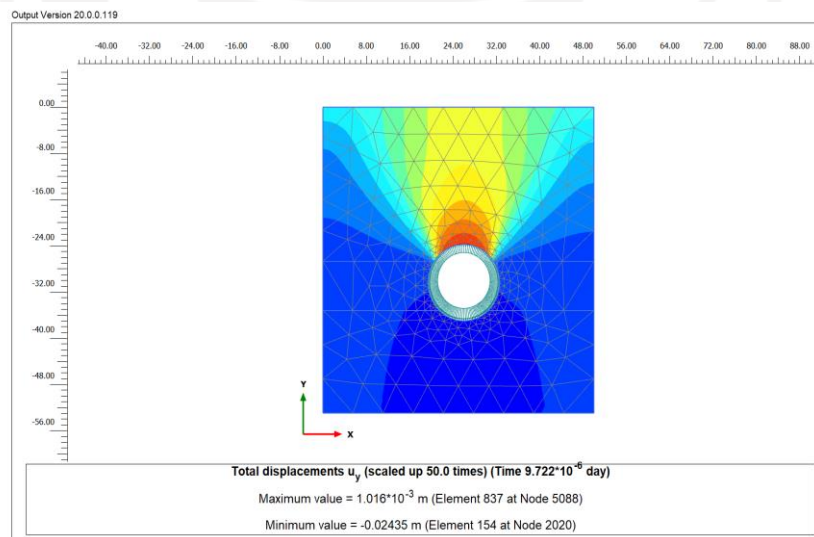


Gambar 5.5 Daerah Potensi Keruntuhan Saat Pengeboran

Untuk hasil analisis dari *horizontal displacement* terowongan tanpa perkuatan dengan beban sendiri diperoleh sebesar 0,007158meter. Adapun untuk hasil *vertical displacement* terowongan tanpa perkuatan dengan beban sendiri diperoleh sebesar 0,001016meter. Hasil *horizontal displacement* dapat dilihat pada Gambar 5.6 dan *vertical displacement* pada Gambar 5.7 dibawah ini.



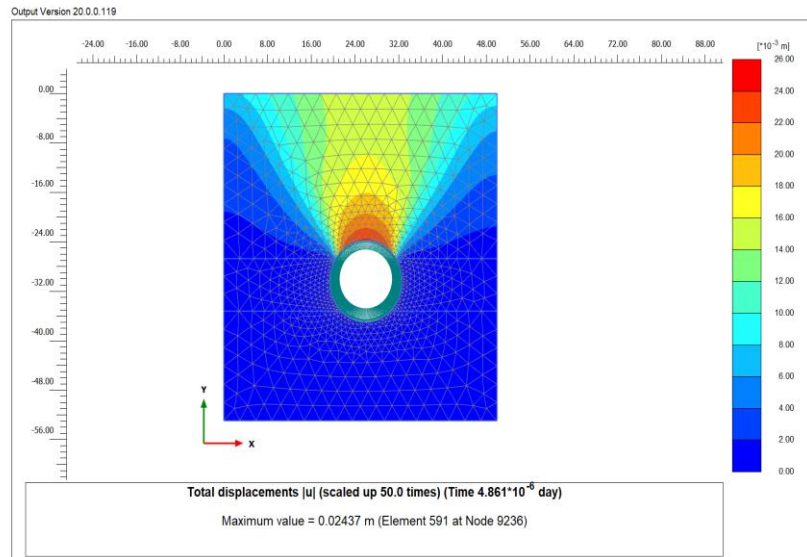
Gambar 5.6 *Horizontal Displacement* Terowongan Tanpa Perkuatan



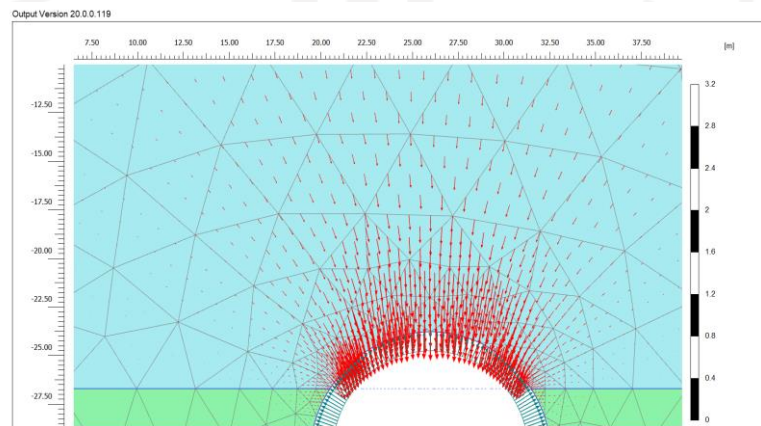
Gambar 5.7 *vertical Displacement* Terowongan Tanpa Perkuatan

Untuk hasil analisis terowongan tanpa perkuatan dengan beban gempa mendapatkan nilai *total displacement* sebesar 0,02934 meter. Nilai *displacement* terbesar terowongan dengan beban gempa mengalami perbedaan nilai yang besar dengan *displacement* menggunakan beban sendiri. Untuk melihat hasil total

displacement terowongan tanpa perkuatan dengan beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.8 dan arah pergerakannya pada Gambar 5.9 dibawah ini.



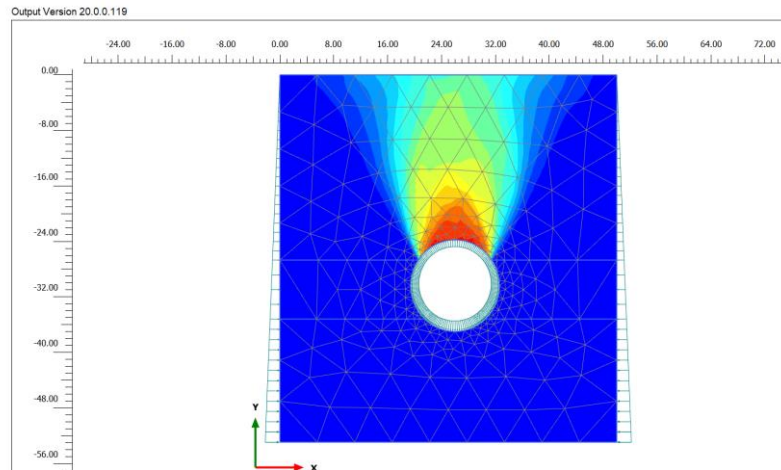
Gambar 5.8 Total displacement Terowongan Tanpa Perkuatan dengan beban gempa



Gambar 5.9 Arah Pergerakan Tanah Terowongan Tanpa Perkuatan dengan beban gempa

Untuk nilai *safety factor* sebesar 0,498, hal ini menyebabkan terowongan tanpa perkuatan dengan ditambahkan beban gempa mengalami keruntuhan saat pengeboran.

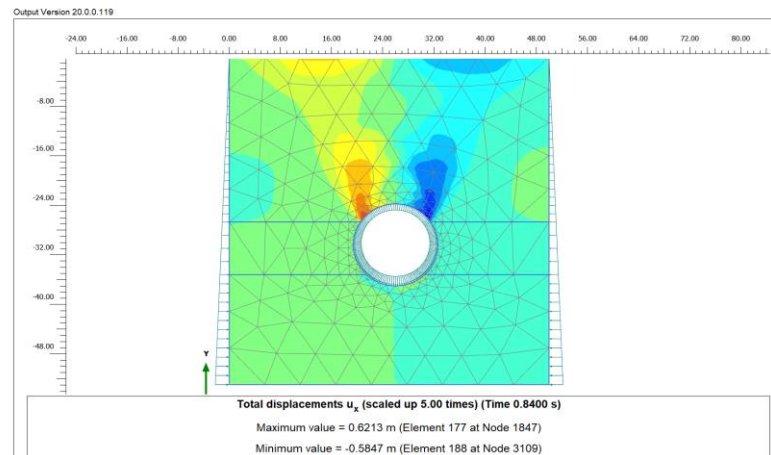
Untuk melihat pola keruntuhan saat pengeboran dengan adanya beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.10 dibawah ini.



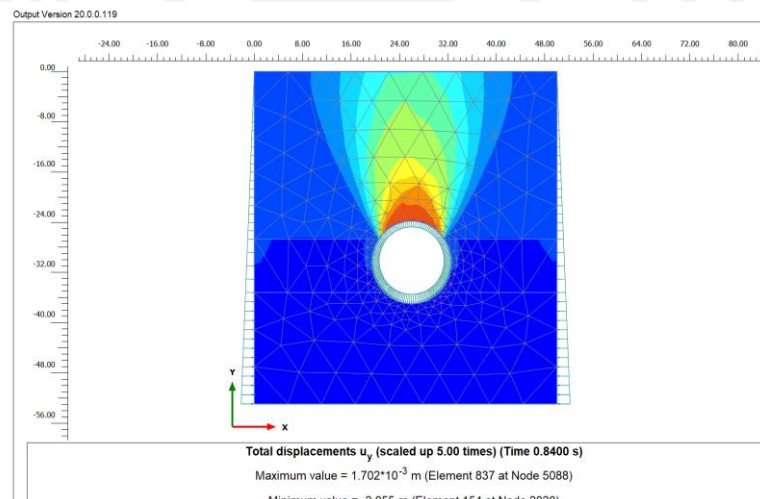
Gambar 5.10 Daerah Potensi Keruntuhan Saat Pengeboran dengan Beban Gempa

Jadi, dari nilai *safety factor* untuk beban sendiri dan beban gempa bahwa terowongan tanpa perkuatan masih belum aman dari keruntuhan yang bisa terjadi. Karena, *safety factor* dari proses pengeboran baik dengan beban sendiri maupun beban gempa masih dibawah nilai aman yaitu, $>1,25$ (Bowles, 1984).

Untuk hasil dari *horizontal displacement* terowongan tanpa perkuatan dengan adanya beban gempa diperoleh sebesar 0,006213meter. Adapun *vertical displacement* diperoleh sebesar 0,001702meter. Untuk melihat penyebaran *Horizontal displacement* terowongan tanpa perkuatan dengan beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.11 dan *vertical displacement* pada Gambar 5.12 dibawah ini.



Gambar 5.11 *Horizontal Displacement* Terowongan Tanpa Perkuatan dengan beban gempa



Gambar 5.12 *vertical displacement* Terowongan Tanpa Perkuatan dengan beban gempa

5.3 Analisis Terowongan Dengan Perkuatan

Dari hasil analisis terowongan saat pengeboran yang belum aman dari keruntuhan maka, terowongan perlu adanya bahan perkuatan untuk memperkecil tingkat resiko keruntuhan. Banyak jenis perkuatan untuk terowongan yang biasa digunakan. Untuk penelitian kali ini perkuatan yang digunakan dalam analisis adalah

shotcrete dan *rockbolt*. Pengaturan jumlah perkuatan dapat diatur dengan menilai keamanan dan efisiensi. Desain terowongan dengan perkuatan akan dimodelkan terlebih dahulu dalam program *plaxis v.20*. Analisis terowongan ditambahkan perkuatan akan meninjau dengan dua beban, yaitu beban sendiri dan beban gempa. Beban gempa digunakan untuk mengantisipasi pergerakan tektonik yang dapat menimpa konstruksi terowongan.

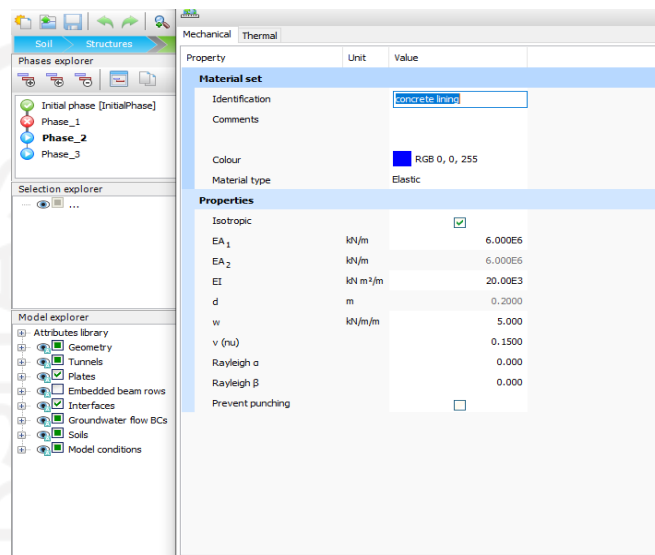
Pada penelitian ini penulis melakukan analisis terowongan dengan mengatur jumlah bahan perkuatan sebagai hasil akhir penelitian. Bahan perkuatan yang digunakan ada 2 jenis yaitu, *shotcrete* dan *rockbolt*. Penggunaan *shotcrete* dan *rockbolt* divariasikan menjadi 5 jenis pemodelan untuk dilakukan analisis menggunakan program *Plaxis v.20*. Karena keterbatasan penulis dalam menganalisis penelitian ini dan meninjau dari efisiensi penggunaan dari bahan perkuatan maka, variasi bahan perkuatan yang dipakai yaitu, *shotcrete*, *shotcrete + 2 rockbolt*, *shotcrete + 4 rockbolt*, *shotcrete + 6 rockbolt*, *shotcrete + 8 rockbolt*. Berikut hasil analisis terowongan menggunakan perkuatan yang diuraikan dibawah ini.

5.3.1 Analisis Terowongan Dengan Perkuatan *Shotcrete*

Sebelumnya hasil analisis terowongan tanpa perkuatan masih belum aman dari keruntuhan yang bisa saja terjadi, maka perlu ditambahkan perkuatan untuk terowongan menahan beban keruntuhan dan beban gempa yang terjadi disekitar terowongan. Bahan perkuatan *shotcrete* dinilai mampu memperkecil nilai *displacement* dan meningkatkan nilai faktor keamanan terowongan dengan lapisan beton yang disemprotkan pada bagian *lining* terowongan.

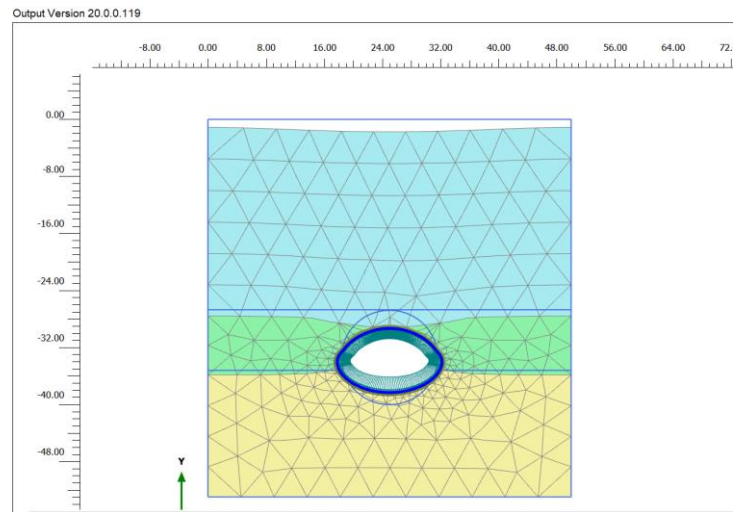
Sebelum melakukan analisis dengan program *Plaxis v.20*, dalam mendesain terowongan dengan bahan perkuatan *shotcrete* perlu ditambahkan kedalam menu “*New Material*” pada *toolbar* atau dengan menekan tombol CTRL+M. Setelah itu, ganti menu pada *set type* dengan *plates* dan set material dengan menekan menu *New*. Maka

akan muncul jendela set material untuk menambahkan jenis perkuatan *shotcrete*. Kemudian masukan data yang dibutuhkan untuk material *shotcrete* dapat dilihat pada Gambar 5.13 berikut ini.



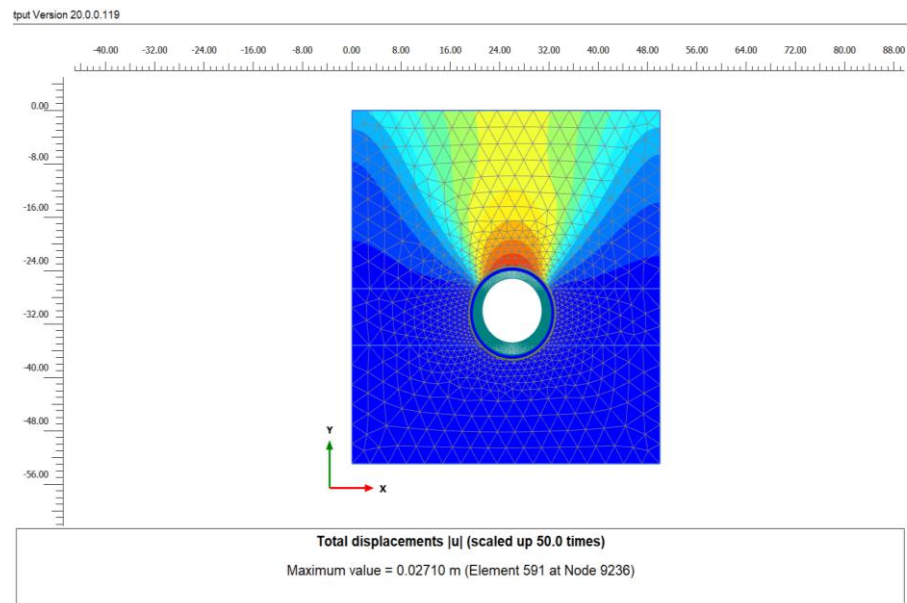
Gambar 5.13 Jendela *Material set*

Setelah menambahkan material perkuatan, maka dapat mendesain terowongan menggunakan perkuatan *shotcrete*. Berikut pemodelan terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dapat dilihat pada Gambar 5.14 dibawah ini.

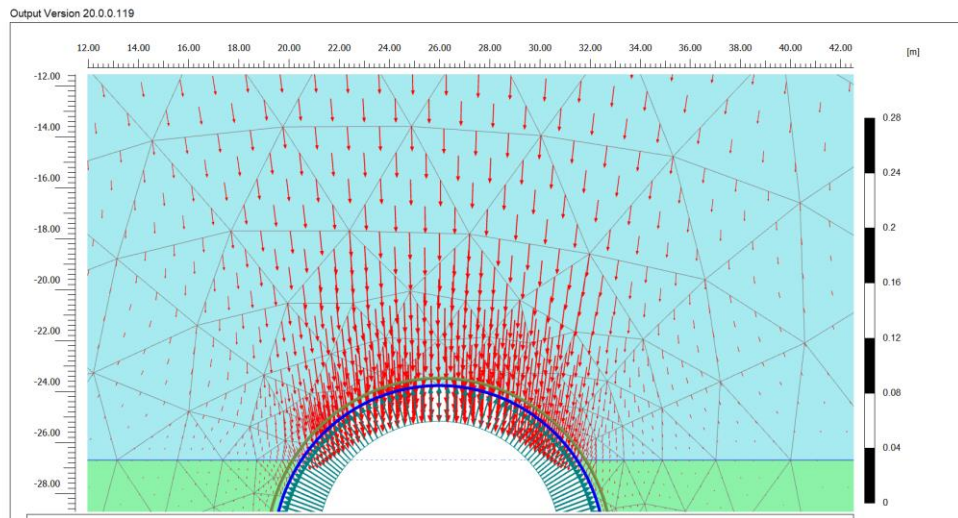


Gambar 5.14 Pemodelan *Meshing* Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete*

Untuk nilai *total displacement* pada terowongan menggunakan perkuatan *shotcrete* dengan beban sendiri sebesar 0,0271 meter dapat dilihat pada Gambar 5.15 dan arah pergerakannya pada Gambar 5.16 berikut ini.

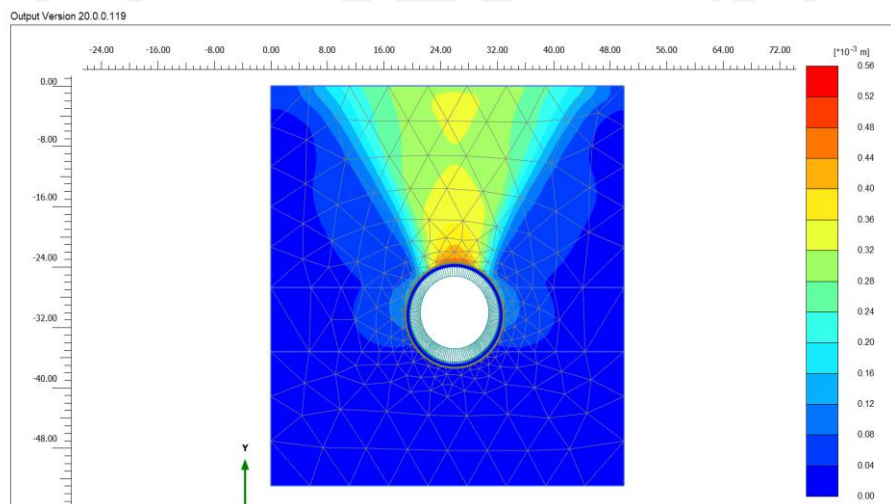


Gambar 5.15 *Total Displacement* Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete*



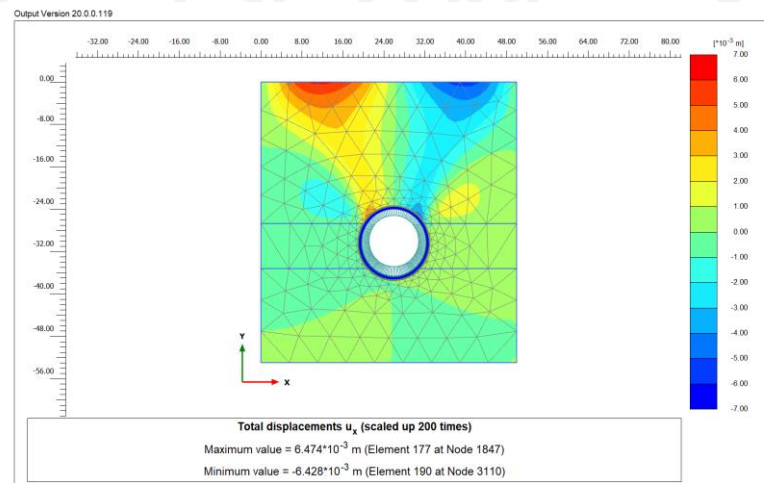
Gambar 5.16 Arah Pergerakan Tanah Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete*

Dari analisis yang sudah dilakukan dengan menggunakan beban sendiri menunjukkan bahwa, penggunaan *shotcrete* pada *lining* terowongan berpengaruh terhadap *safety factor* yang terjadi. Penggunaan *shotcrete* pada pola keruntuhan terowongan juga berpengaruh dengan semakin kecilnya pola keruntuhan dengan ditandai memudarnya warna merah pada bagian atas terowongan. Hal ini juga ditandai dengan nilai *safety factor* sebesar 1,985 yang sudah mencapai $>1,25$ (Bowles,1984). Daerah keruntuhan dapat dilihat pada Gambar 5.17 berikut ini.

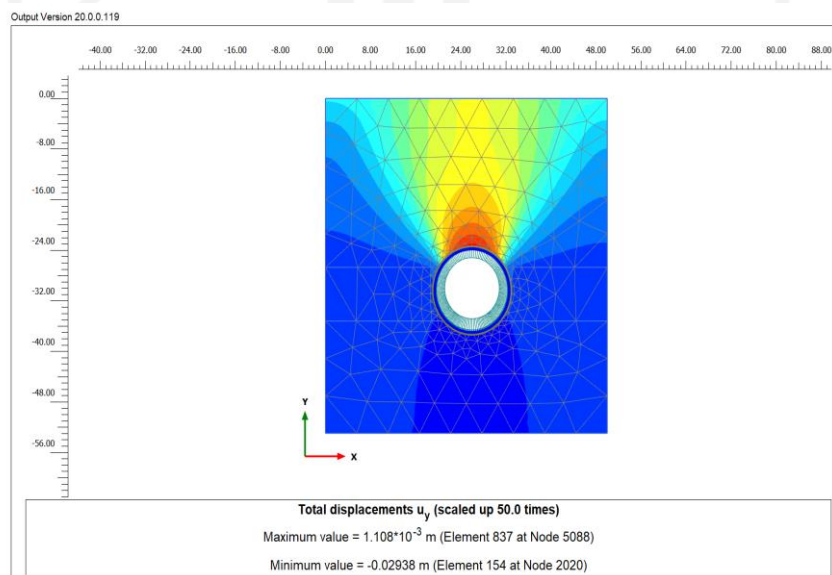


Gambar 5.17 Daerah Potensi Keruntuhan dengan Perkuatan *shotcrete*

Analisis juga dilakukan dengan mencari besar *horizontal displacement* yang didapatkan nilai sebesar 0,006474meter. Sedangkan, *vertical displacement* didapatkan nilai sebesar 0,001108meter. Adapun penyebaran *horizontal displacement* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dapat dilihat pada Gambar 5.18 dan untuk *vertical displacement* pada Gambar 5.19 berikut ini.

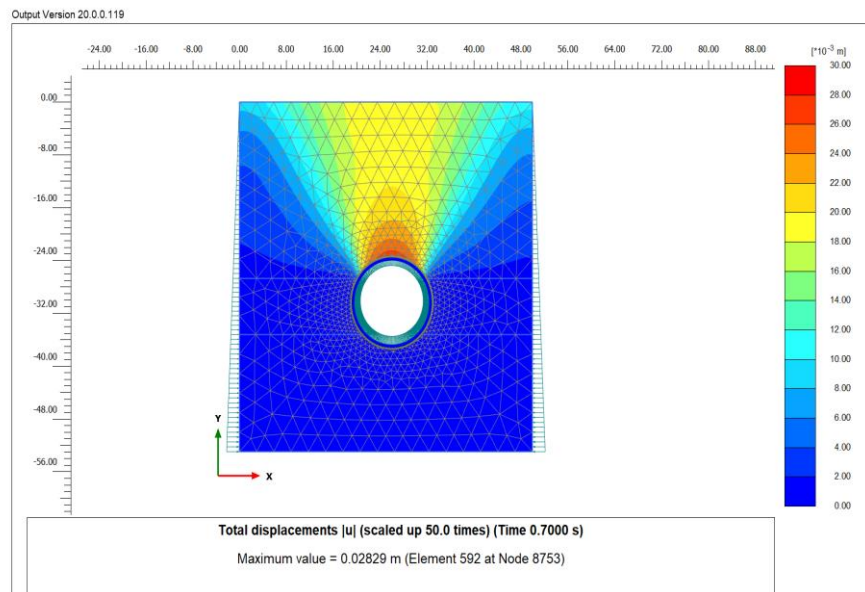


Gambar 5.18 *horizontal Displacement* Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete*

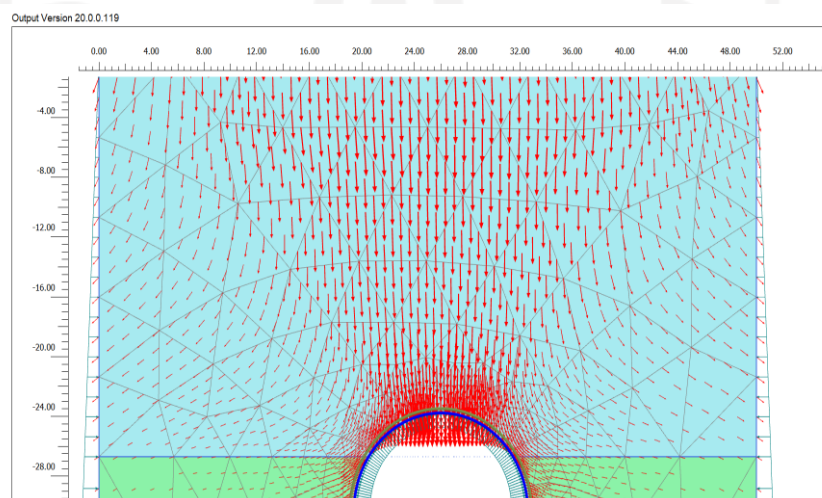


Gambar 5.19 *vertical Displacement* Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete*

Untuk analisis terowongan menggunakan perkuatan *shotcrete* dengan beban gempa didapatkan hasil *total displacement* sebesar 0.02829 meter. Hasil *total displacement* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dengan beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.20 dan arah pergerakannya pada Gambar 5.21 berikut ini.

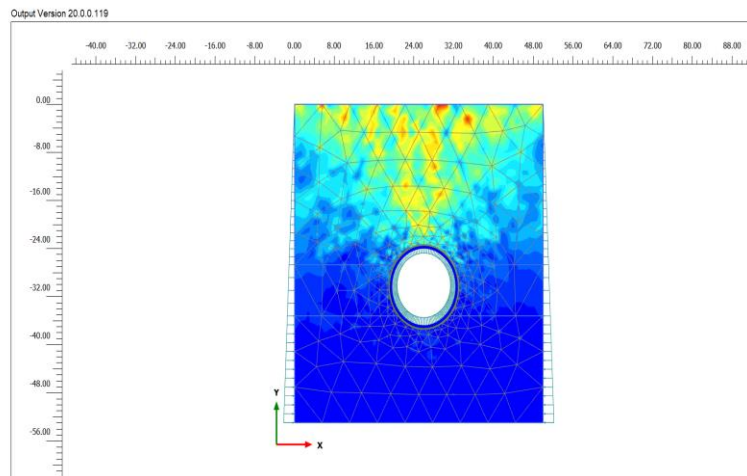


Gambar 5.20 Total Displacement Terowongan Dengan Perkuatan Shotcrete Setelah Adanya Beban Gempa



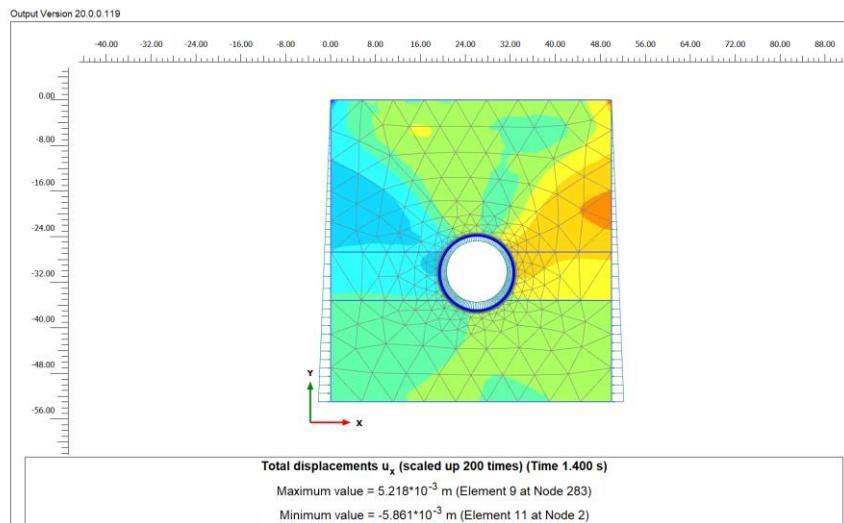
Gambar 5.21 Arah Pergerakan Tanah Terowongan Dengan Perkuatan Shotcrete Setelah Adanya Beban Gempa

Untuk nilai *safety factor* terowongan dengan perkuatan shotcrete setelah adanya beban gempa didapatkan hasil sebesar 1,573. Pola keruntuhan terowongan dengan *shotcrete* setelah adanya beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.22 dibawah ini.

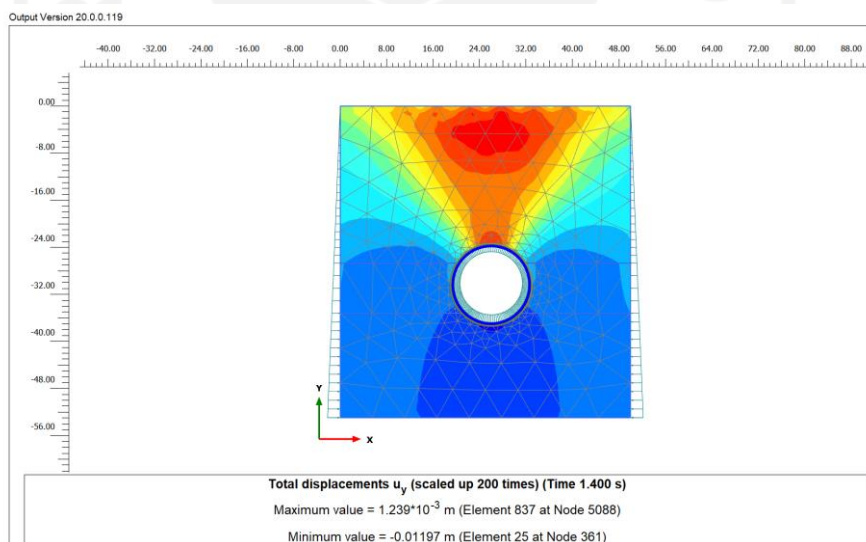


Gambar 5.22 Daerah Potensi Keruntuhan Dengan Beban Gempa Setelah Adanya Perkuatan *Shotcrete*

Untuk hasil dari *horizontal displacement* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* setelah adanya beban gempa diperoleh sebesar 0,005218meter. Adapun *vertical displacement* diperoleh sebesar 0,001239meter. Untuk melihat penyebaran *Horizontal displacement* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* setelah adanya beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.23 dan *vertical displacement* pada Gambar 5.24 dibawah ini.



Gambar 5.23 Horizontal Displacement Terowongan Dengan Perkuatan Shotcrete Setelah Adanya Beban Gempa

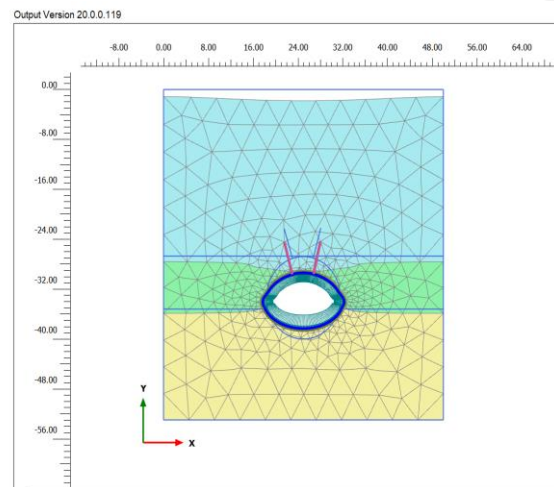


Gambar 5.24 Vertical Displacement Terowongan Dengan Perkuatan Shotcrete Setelah Adanya Beban Gempa

5.3.2 Analisis Terowongan Dengan Perkuatan Shotcrete dan 2 Rockbolt

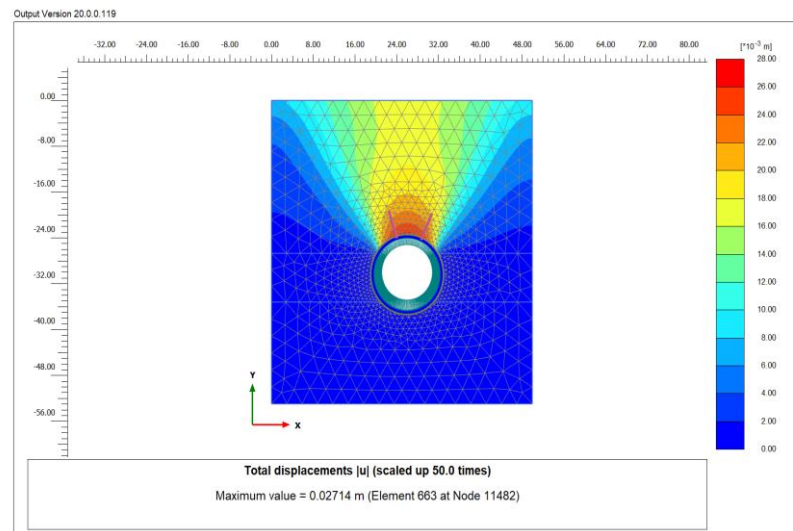
Untuk melakukan analisis terowongan menggunakan perkuatan *shotcrete* dan 2 *rockbolt* dengan beban sendiri dan beban gempa, perlu dibuat terlebih dahulu pemodelan terowongan dengan menambahkan material bahan perkuatan kedalam

desain terowongan. Sebelum mendesain terowongan, perlu untuk menambahkan material bahan perkuatannya ke menu “*material set*” pada program Plaxis v.20. Jika bahan perkuatan sudah ditambahkan pada menu “*material set*” maka, desain terowongan dengan bahan perkuatan *shotcrete* dan 2 *rockbolt* sudah bisa digunakan untuk selanjutnya proses analisis. Untuk melihat hasil pemodelan terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 2 *rockbolt* dapat dilihat pada Gambar 5.25 berikut ini.

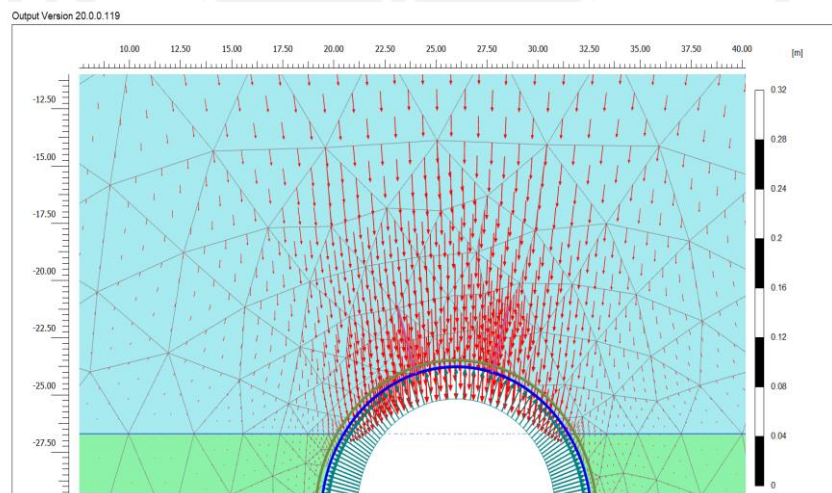


Gambar 5.25 Pemodelan Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 2 *Rockbolt*

Hasil *output* dari program Plaxis v.20 untuk analisis terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 2 *rockbolt* menggunakan beban sendiri berupa *total displacement* sebesar 0,02714 meter dapat dilihat pada Gambar 5.26 dan arah pergerakannya pada Gambar 5.27 berikut ini.

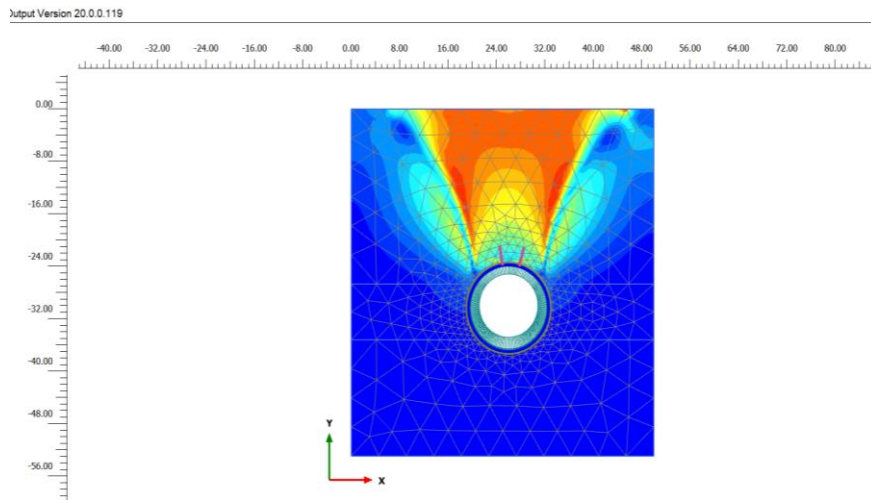


Gambar 5.26 Total Displacement Terowongan dengan Perkuatan Shotcrete dan 2 Rockbolt



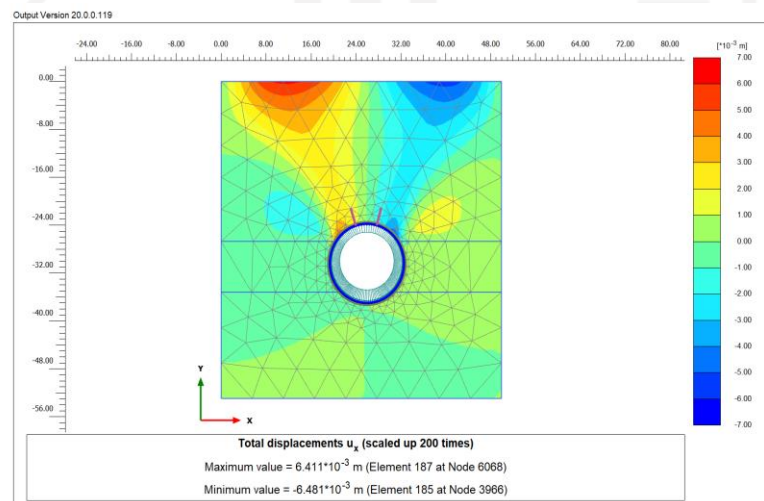
Gambar 5.27 Arah Pergerakan Tanah Terowongan dengan Perkuatan Shotcrete dan 2 Rockbolt

Untuk nilai *safety factor* terowongan dengan perkuatan shotcrete dan 2 rockbolt diperoleh sebesar 3,058. Pola keruntuhan terowongan yang terjadi setelah adanya perkuatan *shotcrete* dan 2 *rockbolt* dapat dilihat pada Gambar 5.28 berikut ini.

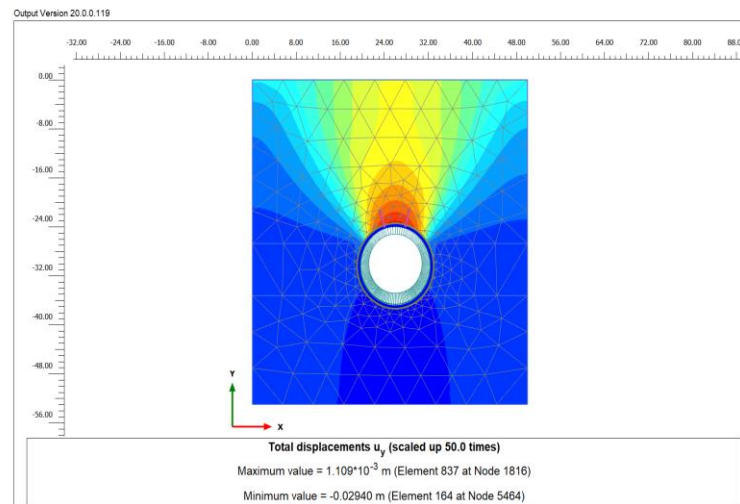


Gambar 5.28 Daerah Potensi Keruntuhan dengan Perkuatan Shotcrete dan 2 Rockbolt

Analisis juga dilakukan dengan mencari besar *horizontal displacement* yang didapatkan nilai sebesar 0,006411meter. Sedangkan, *vertical displacement* didapatkan nilai sebesar 0,001109meter. Adapun penyebaran *horizontal displacement* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 2 *rockbolt* dapat dilihat pada Gambar 5.29 dan untuk *vertical displacement* pada Gambar 5.30 berikut ini.

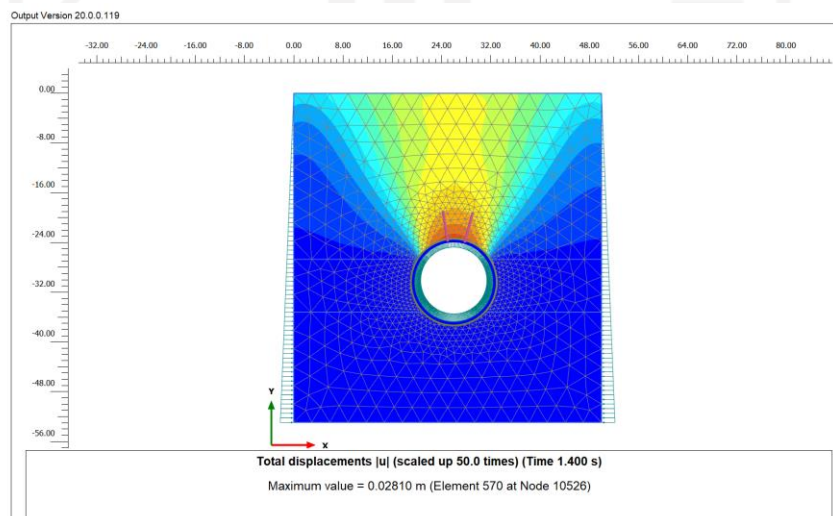


Gambar 5.29 Horizontal Displacement Terowongan dengan Perkuatan Shotcrete dan 2 Rockbolt

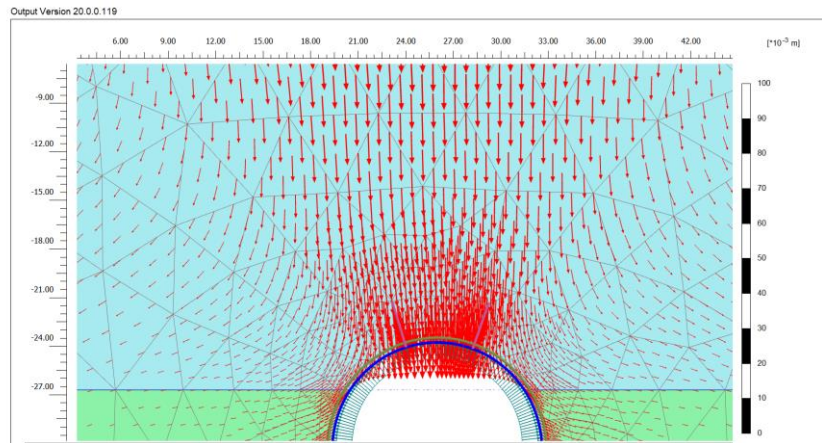


Gambar 5.30 Vertical Displacement Terowongan dengan Perkuatan Shotcrete dan 2 Rockbolt

Untuk analisis terowongan menggunakan perkuatan *shotcrete* dan 2 *rockbolt* dengan beban gempa didapatkan hasil total *displacement* sebesar 0,02810 meter. Adapun Penyebaran *total displacement* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 2 *rockbolt* setelah adanya beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.31 dan arah pergerakannya dapat dilihat pada Gambar 5.32 dibawah ini.

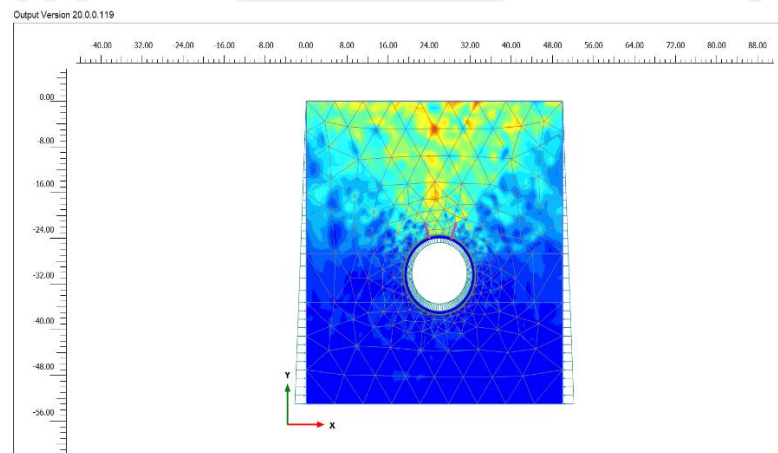


Gambar 5.31 Total Displacement Terowongan dengan Perkuatan Shotcrete dan 2 Rockbolt Setelah Adanya Beban Gempa



Gambar 5.32 Arah Pergerakan Tanah Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 2 *Rockbolt* Setelah Adanya Beban Gempa

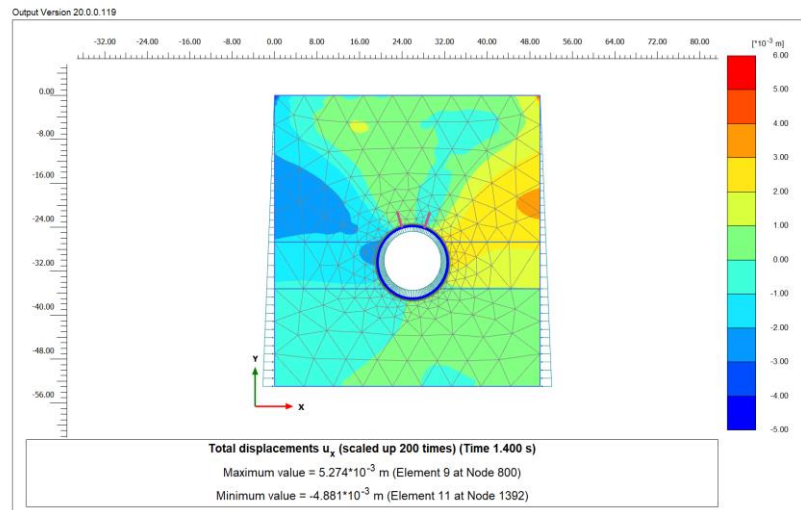
Untuk nilai *safety factor* sebesar 2,786 dan pola keruntuhan terowongan dengan *shotcrete* dan 2 *Rockbolt* setelah adanya beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.33 dibawah ini.



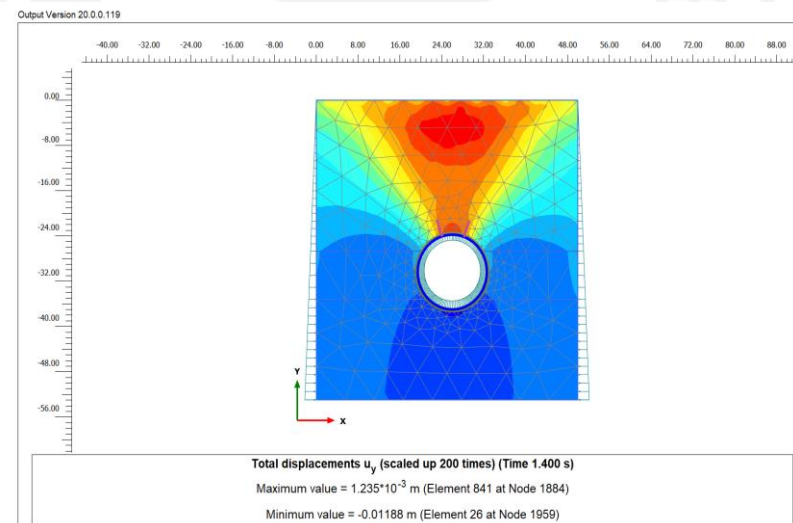
Gambar 5.33 Daerah Potensi Keruntuhan Dengan Beban Gempa Setelah Adanya Perkuatan *Shotcrete* dan 2 *Rockbolt*

Untuk hasil dari *horizontal displacement* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 2 *rockbolt* setelah adanya beban gempa diperoleh sebesar 0,005274meter. Adapun *vertical displacement* diperoleh sebesar 0,001235meter. Untuk melihat penyebaran *Horizontal displacement* terowongan dengan perkuatan

shotcrete setelah adanya beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.34 dan *vertical displacement* pada Gambar 5.35 dibawah ini.



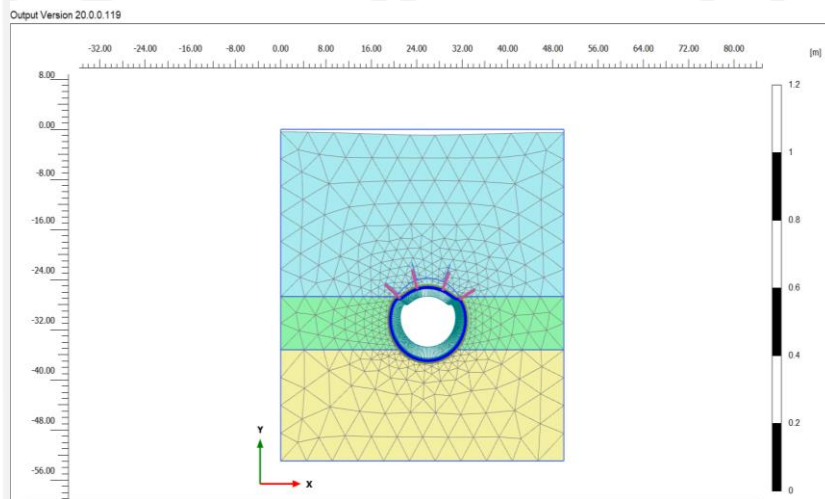
Gambar 5.34 Horizontal Displacement Terowongan dengan Perkuatan Shotcrete dan 2 Rockbolt Setelah Adanya Beban Gempa



Gambar 5.35 Vertical Displacement Terowongan dengan Perkuatan Shotcrete dan 2 Rockbolt Setelah Adanya Beban Gempa

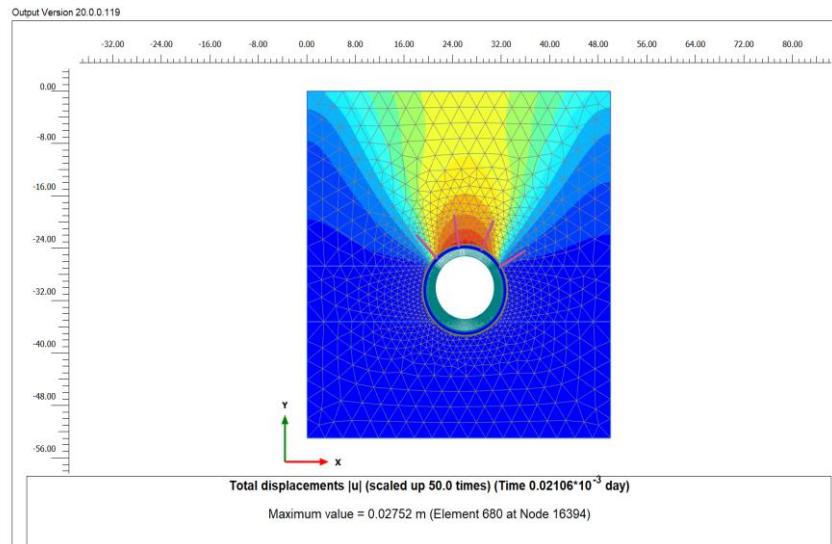
5.3.3 Analisis Terowongan Dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 4 *Rockbolt*

Untuk melakukan analisis terowongan dengan perkuatan perlu dibuat pemodelan terowongan pada program Plaxis v.20 terlebih dahulu. Pemodelan dilakukan untuk menambahkan material bahan perkuatan pada struktur terowongan. Kombinasi kali ini menggunakan bahan perkuatan *shotcrete* dan 4 *rockbolt*. Berikut permodelan terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 4 *rockbolt* pada Gambar 5.36 dibawah ini.

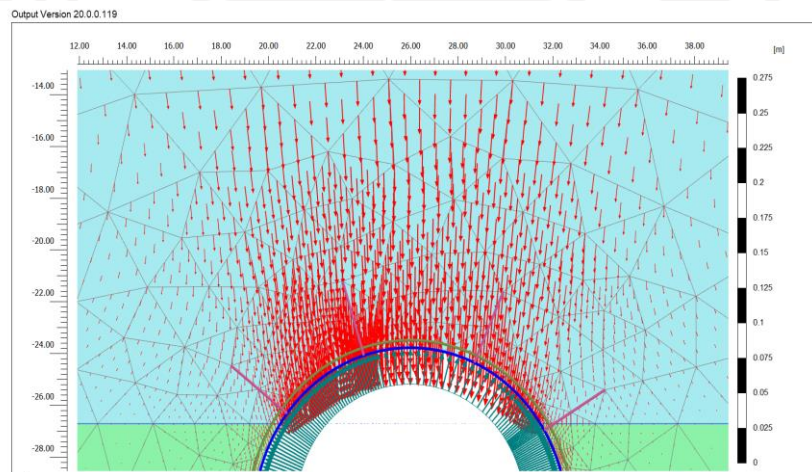


Gambar 5.36 Pemodelan Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 4 *Rockbolt*

Setelah pemodelan terowongan dibuat baru dilakukan analisis pada program Plaxis v.20. *Output* dari analisis terowongan dengan program Plaxis v.20 berupa besar-besarnya gaya yang terjadi pada struktur terowongan. Untuk analisis terowongan dengan beban sendiri menggunakan kombinasi perkuatan *shotcrete* dan 4 *rockbolt* nilai *total displacement* sebesar 0,02752 meter. Berikut penyebaran *total displacement* ada pada Gambar 5.37 dan arah pergerakannya pada Gambar 5.38 dibawah ini.

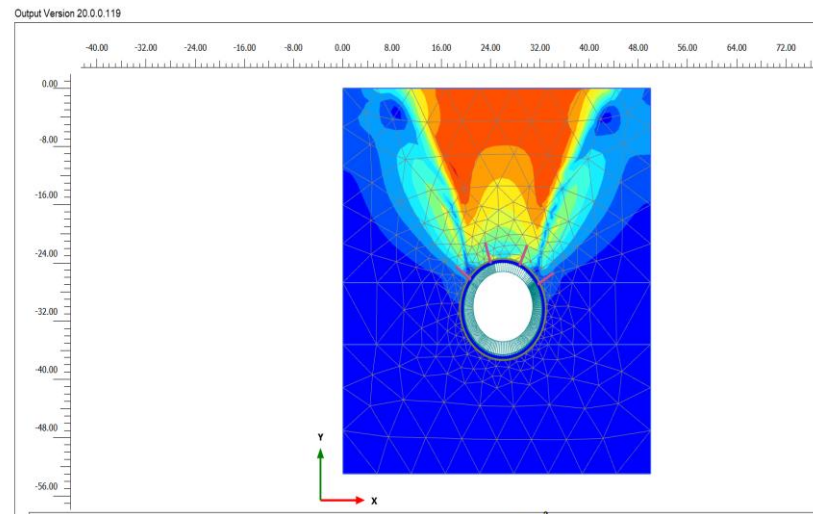


Gambar 5.37 Total Displacement Terowongan dengan Perkuatan Shotcrete dan 4 Rockbolt



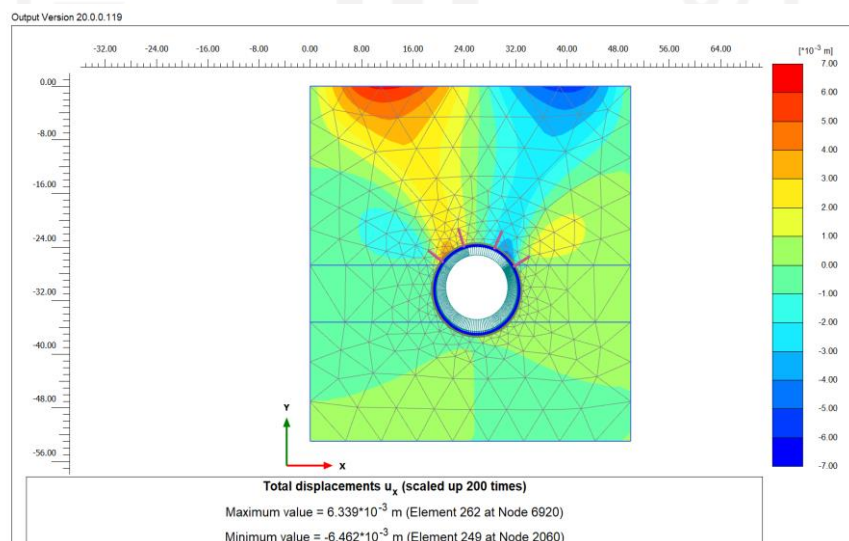
Gambar 5.38 Arah Pergerakan Tanah Terowongan dengan Perkuatan Shotcrete dan 4 Rockbolt

Pada nilai *safety factor* juga terjadi peningkatan karena penambahan jumlah *rockbolt*, besar *safety factor* tersebut adalah 3,239 . Untuk pola potensi keruntuhan terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 4 *rockbolt* dapat dilihat pada Gambar 5.39 berikut ini.

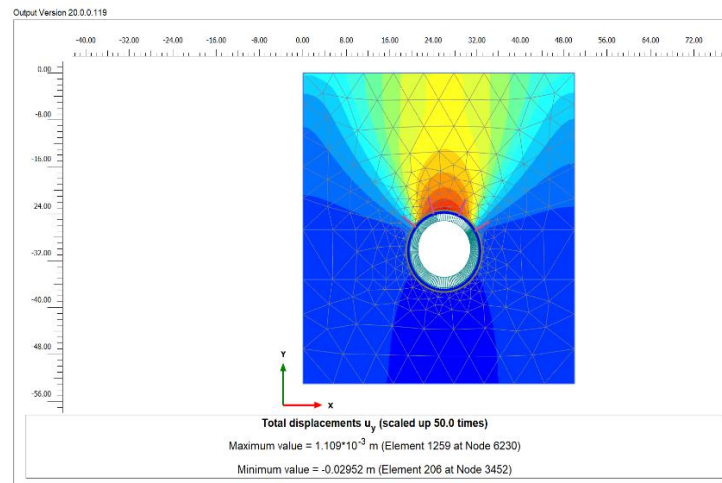


Gambar 5.39 Daerah Potensi Keruntuhan dengan *Shotcrete* dan 4 *Rockbolt*

Analisis juga dilakukan dengan mencari besar *horizontal displacement* yang didapatkan nilai sebesar 0,006339meter. Sedangkan, *vertical displacement* didapatkan nilai sebesar 0,001109meter. Adapun penyebaran *horizontal displacement* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 4 *rockbolt* dapat dilihat pada Gambar 5.40 dan untuk *vertical displacement* pada Gambar 5.41 berikut ini.

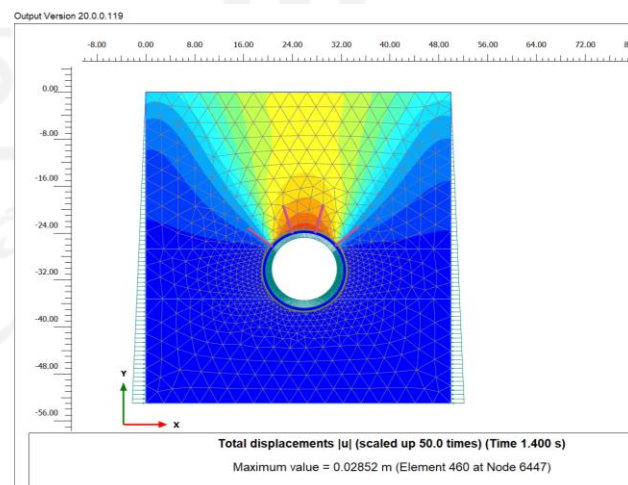


Gambar 5.40 *Horizontal Displacement* Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 4 *Rockbolt*

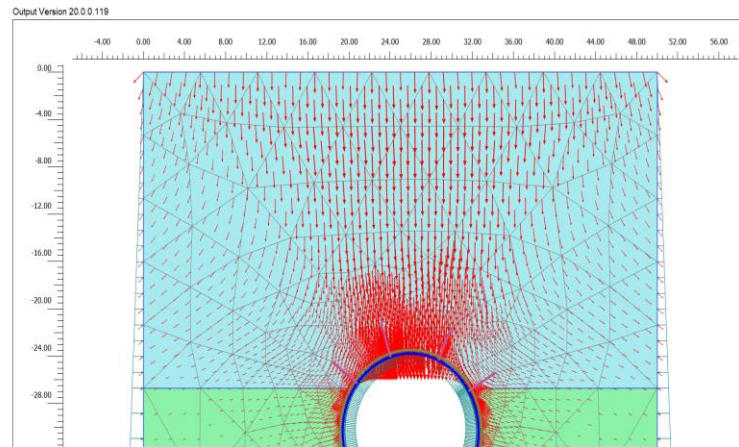


Gambar 5.41 Vertical Displacement Terowongan dengan Perkuatan Shotcrete dan 4 Rockbolt

Untuk analisis terowongan menggunakan perkuatan *shotcrete* dan 4 *rockbolt* dengan beban gempa didapatkan hasil *displacement* terbesar 0,02852 meter. Untuk Penyebaran *total displacement* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 4 *rockbolt* setelah adanya beban gempa pada Gambar 5.42 dan arah pergerakannya pada Gambar 5.43 berikut ini.

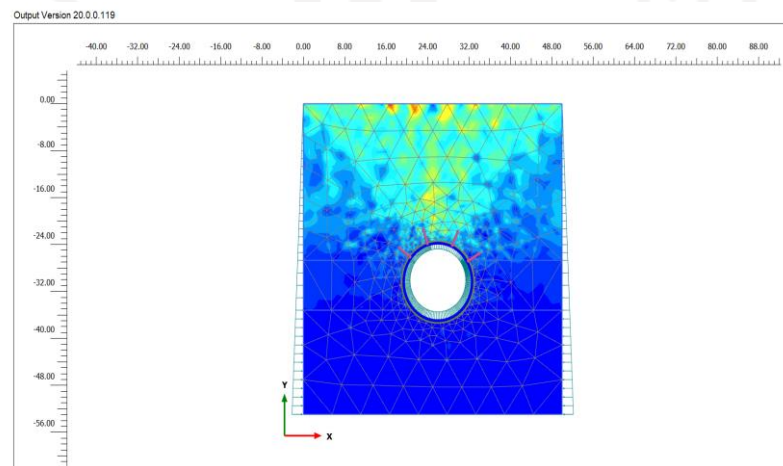


Gambar 5.42 Total Displacement Terowongan dengan Perkuatan Shotcrete dan 4 Rockbolt Setelah Adanya Beban Gempa



Gambar 5.43 Arah Pergerakan Tanah Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 4 *Rockbolt* Setelah Adanya Beban Gempa

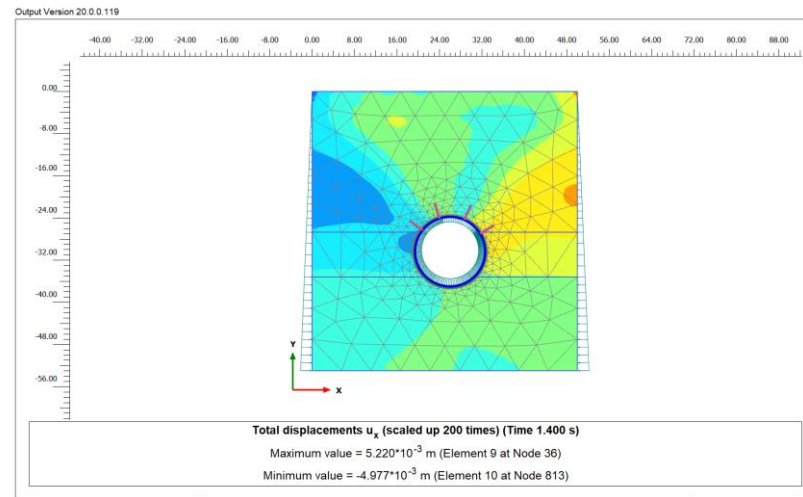
Untuk hasil dari *safety factor* pada terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 4 *rockbolt* setelah adanya beban gempa adalah sebesar 3,051 Untuk pola keruntuhan terowongan dengan *shotcrete* dan 4 *Rockbolt* setelah adanya beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.44 dibawah ini.



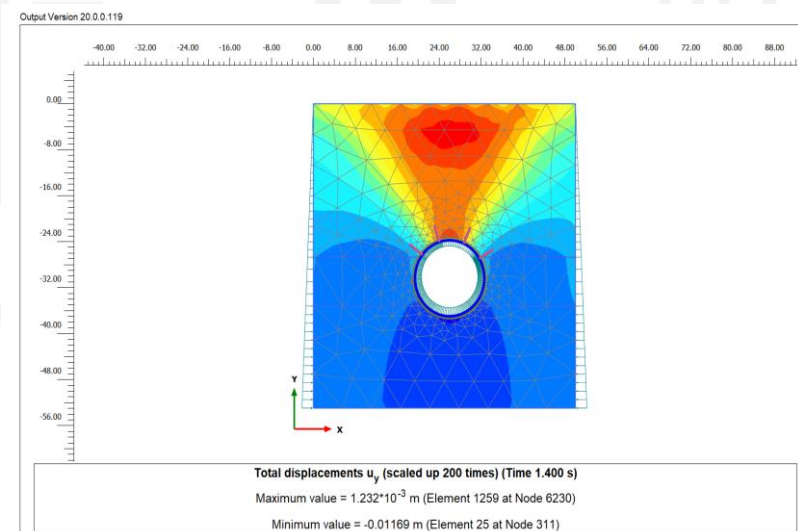
Gambar 5.44 Daerah Potensi keruntuhan Dengan Beban Gempa Setelah Adanya Perkuatan *Shotcrete* dan 4 *Rockbolt*

Untuk hasil dari *horizontal displacement* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 4 *rockbolt* setelah adanya beban gempa diperoleh sebesar

0,005220meter. Adapun *vertical displacement* diperoleh sebesar 0,001232meter. Untuk melihat penyebaran *Horizontal displacement* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* setelah adanya beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.45 dan *vertical displacement* pada Gambar 5.46 dibawah ini.



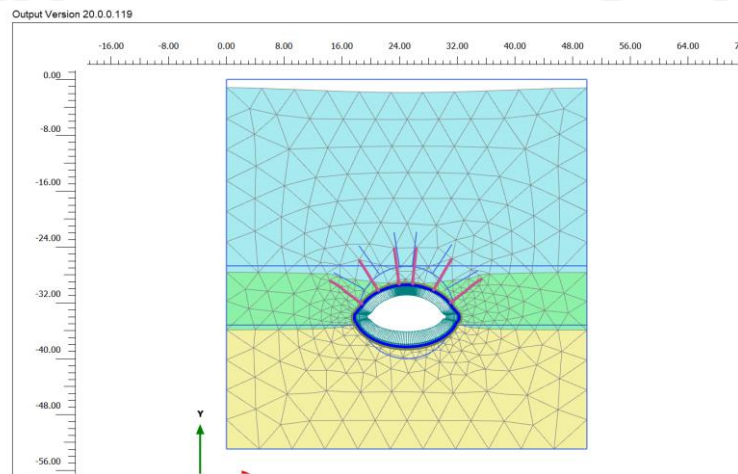
Gambar 5.45 *Horizontal Displacement* Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 4 *Rockbolt* Setelah Adanya Beban Gempa



Gambar 5.46 *Vertical Displacement* Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 4 *Rockbolt* Setelah Adanya Beban Gempa

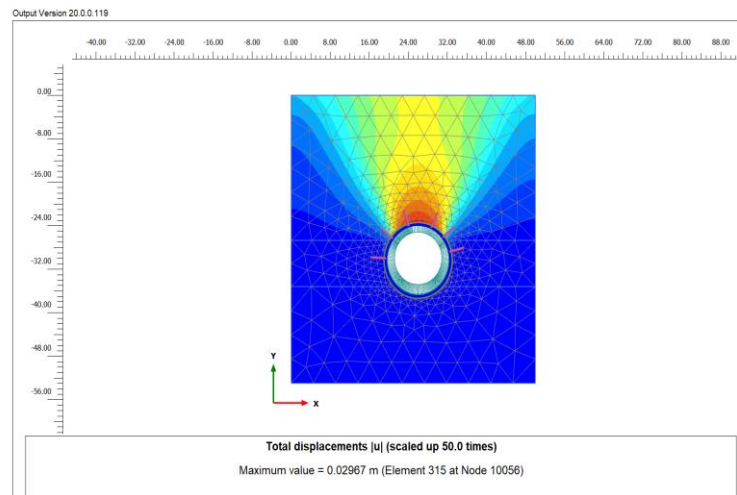
5.3.4 Analisis Terowongan Dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 6 *Rockbolt*

Terowongan dengan Perkuatan *shotcrete* dan 6 *Rockbolt* merupakan kombinasi selanjutnya yang akan dianalisis pada program Plaxis v.20. Sebelum melakukan analisis, desain terowongan dibuat terlebih dahulu dalam pemodelan Plaxis v.20 dengan dua dimensi. Bentuk pemodelan Terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 6 *rockbolt* dapat dilihat pada Gambar 5.47 berikut ini.

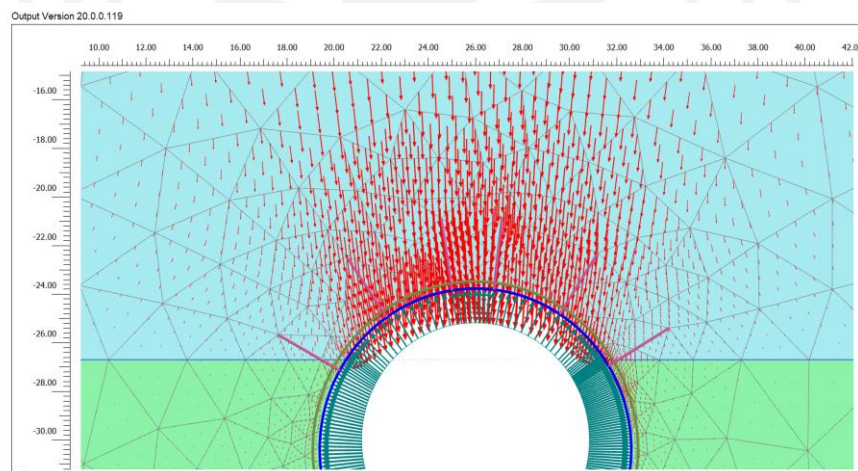


Gamabar 5.47 Pemodelan Terowongan dengan Perkuatan *shotcrete* dan 6 *Rokbolt*

Hasil analisis yang dilakukan dengan program Plaxis v.20 didapatkan nilai *total displacement* sebesar 0,02748 meter. Untuk *total displacement* dapat dilihat pada Gambar 5.48 dan arah pergerakannya pada Gambar 5.49 dibawah ini.

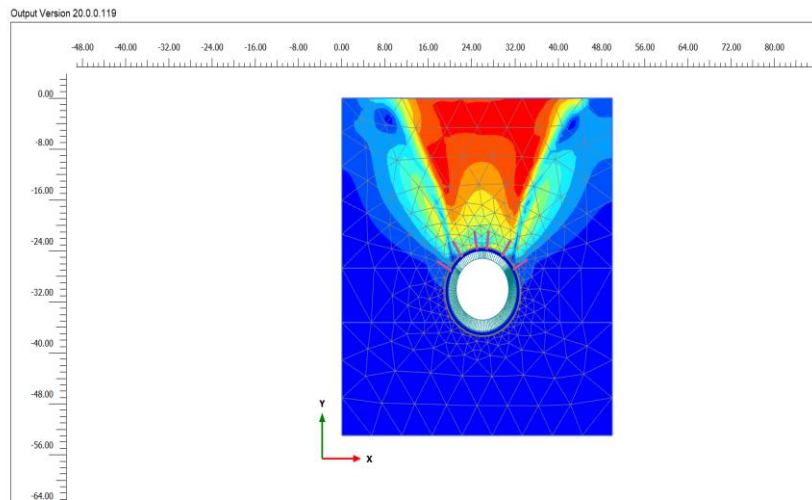


Gambar 5.48 Total Displacement Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 6 *Rockbolt*



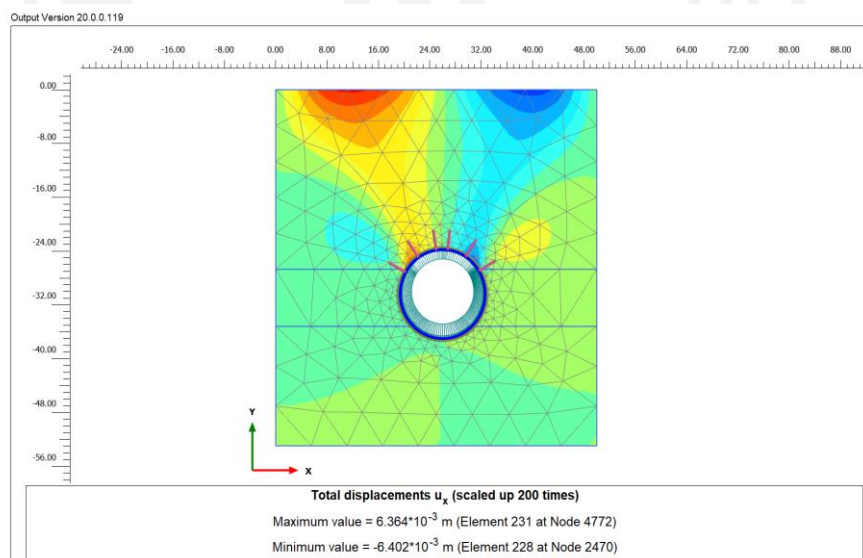
Gambar 5.49 Arah Pergerakan Tanah Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 6 *Rockbolt*

Untuk hasil *safety factor* sebesar 4,113 mengalami kenaikan dari yang menggunakan perkuatan *shotcrete* dan 4 *rockbolt*. Hal itu menunjukkan bahwa penambahan perkuatan dengan variasi *shotcrete* dan 6 *rockbolt* mampu menambah besar nilai faktor keamanan. Berikut daerah potensi keruntuhan dengan beban sendiri setelah adanya *shotcrete* dan 6 *rockbolt* dapat dilihat pada Gambar 5.50.

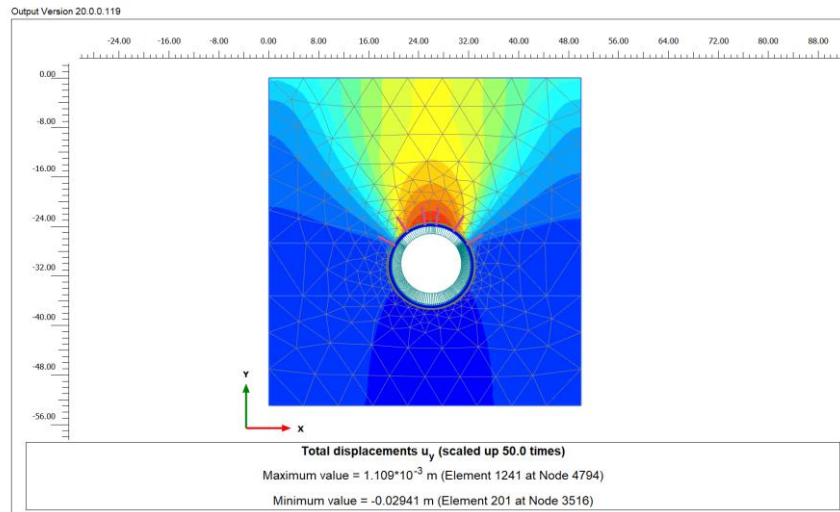


Gambar 5.50 Daerah Potensi Keruntuhan dengan *Shotcrete* dan 6 *Rockbolt*

Analisis juga dilakukan dengan mencari besar *horizontal displacement* yang didapatkan nilai sebesar 0,006364meter. Sedangkan, *vertical displacement* didapatkan nilai sebesar 0,001109meter. Adapun penyebaran *horizontal displacement* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 6 *rockbolt* dapat dilihat pada Gambar 5.51 dan untuk *vertical displacement* pada Gambar 5.52 berikut ini.

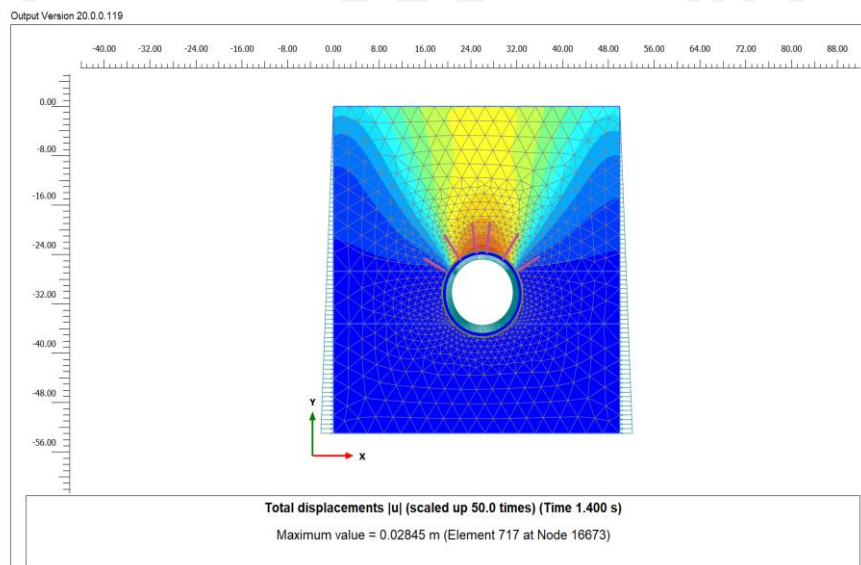


Gambar 5.51 *Horizontal Displacement* Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 6 *Rockbolt*

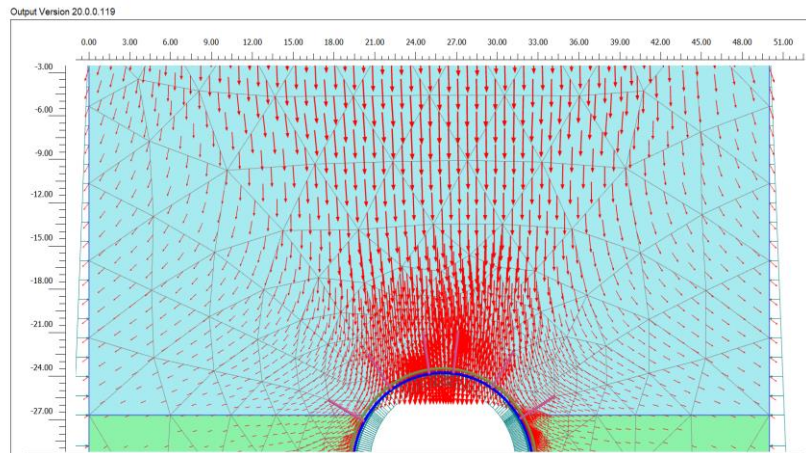


Gambar 5.52 Vertical Displacement Terowongan dengan Perkuatan Shotcrete dan 6 Rockbolt

Untuk analisis terowongan menggunakan perkuatan *shotcrete* dan 6 *rockbolt* dengan beban gempa didapatkan hasil *displacement* terbesar 0,02845 meter. Untuk melihat total displacement ada pada Gambar 5.53 dan arah pergerakannya 5.54 dibawah ini.

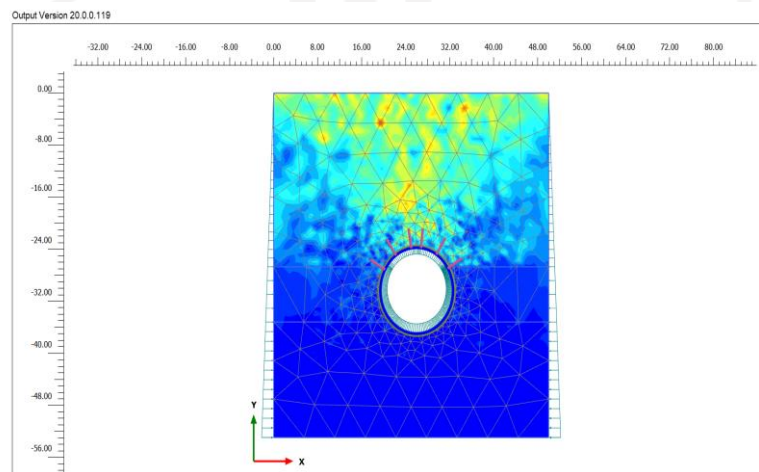


Gambar 5.53 Total Displacement Terowongan dengan Perkuatan Shotcrete dan 6 Rockbolt Setelah Adanya Beban Gempa



Gambar 5.54 Arah Pergerakan Tanah Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 6 *Rockbolt* Setelah Adanya Beban Gempa

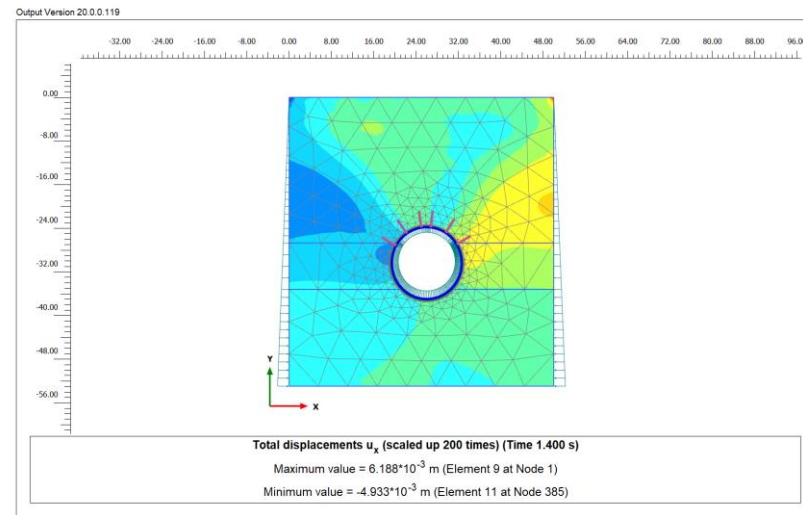
Untuk nilai *safety factor* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 6 *rockbolt* setelah adanya beban gempa adalah sebesar 3,889 Untuk pola keruntuhan terowongan dengan *shotcrete* dan 6 *Rockbolt* setelah adanya beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.55 dibawah ini.



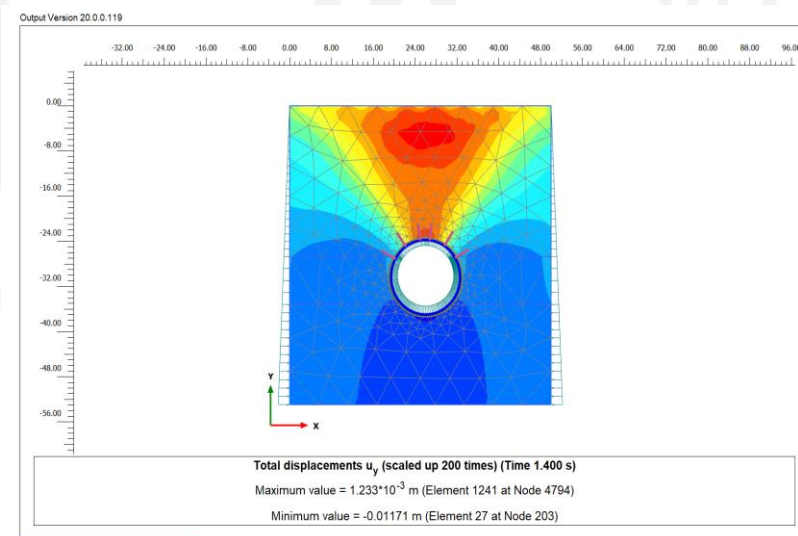
Gambar 5.55 Daerah Potensi Keruntuhan Dengan Beban Gempa Setelah Adanya Perkuatan *Shotcrete* dan 6 *Rockbolt*

Untuk hasil dari *horizontal displacement* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 6 *rockbolt* setelah adanya beban gempa diperoleh sebesar

0,006188meter. Adapun *vertical displacement* diperoleh sebesar 0,00123meter. Untuk melihat penyebaran *Horizontal displacement* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* setelah adanya beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.56 dan *vertical displacement* pada Gambar 5.57 dibawah ini.



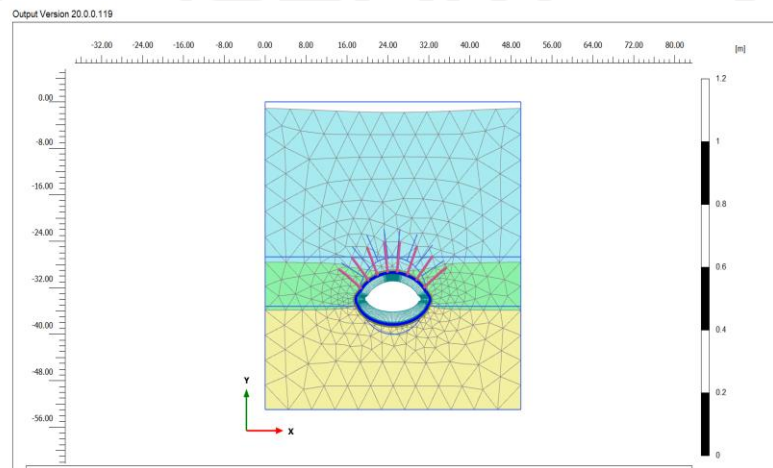
Gambar 5.56 *Horizontal Displacement* Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 6 *Rockbolt* Setelah Adanya Beban Gempa



Gambar 5.57 *Vertical Displacement* Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 6 *Rockbolt* Setelah Adanya Beban Gempa

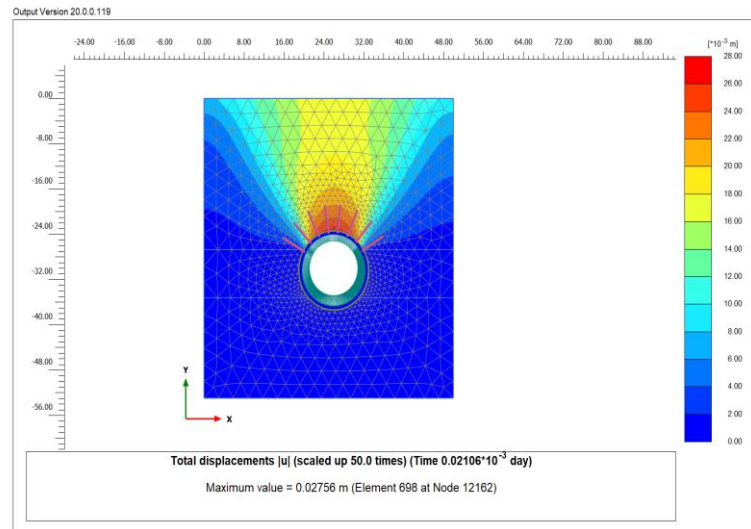
5.3.5 Analisis Terowongan Dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 8 *Rockbolt*

Analisis terowongan ini menggunakan beban sendiri dan beban gempa. Perkuatan yang digunakan adalah *shotcrete* dan 8 *rockbolt* dengan dibuat pemodelan pada program Plaxis v.20. Pemodelan terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 8 *rockbolt* dapat dilihat pada Gambar 5.58 berikut ini.

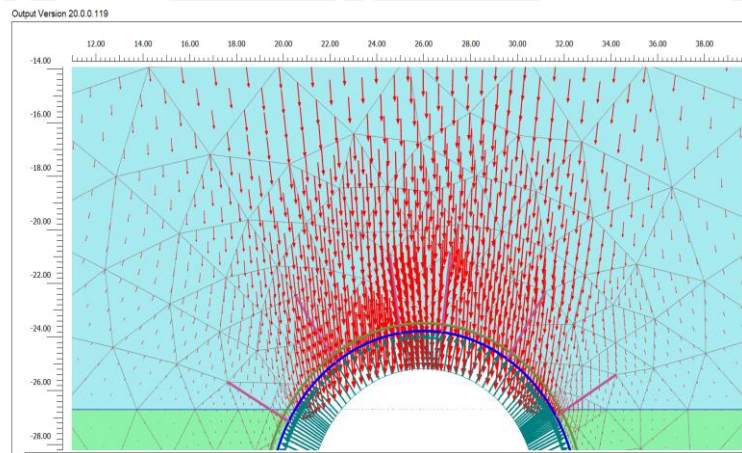


Gambar 5.58 Pemodelan Terowongan dengan *Shotcrete* dan 8 *Rockbolt*

Hasil analisis terowongan dengan beban sendiri setelah ditambahkan perkuatan *shotcrete* dan 8 *rockbolt* besar *total displacement* adalah 0,02756 meter. Untuk melihat *total displacement* pada Gambar 5.59 dan arah pergerakannya pada Gambar 5.60 dibawah ini.

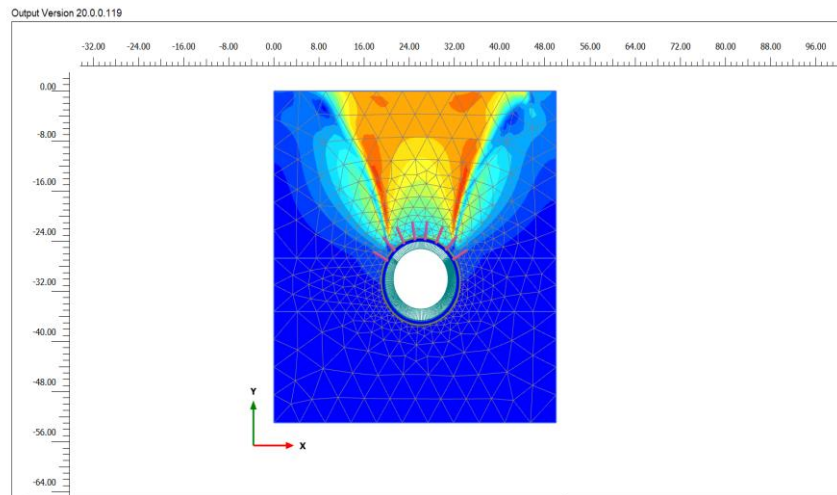


Gambar 5.59 Total Displacement Terowongan dengan Perkuatan Shotcrete dan 8 Rockbolt



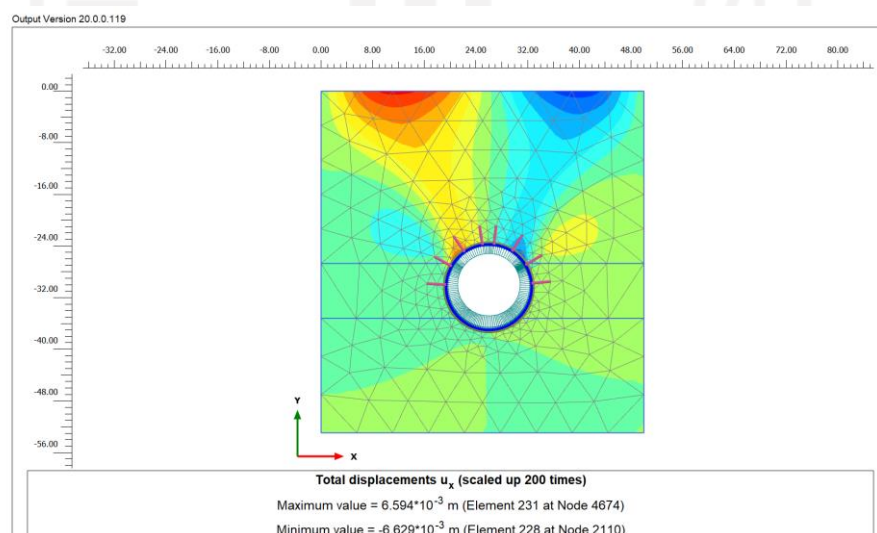
Gambar 5.60 Arah Pergerakan Tanah Terowongan dengan Perkuatan Shotcrete dan 8 Rockbolt

Untuk nilai *safety factor* dari terowongan dengan perkuatan shotcrete dan 8 rockbolt sebesar 5,748. Untuk melihat daerah potensi keruntuhan terowongan dapat dilihat pada Gambar 5.61 dibawah ini.

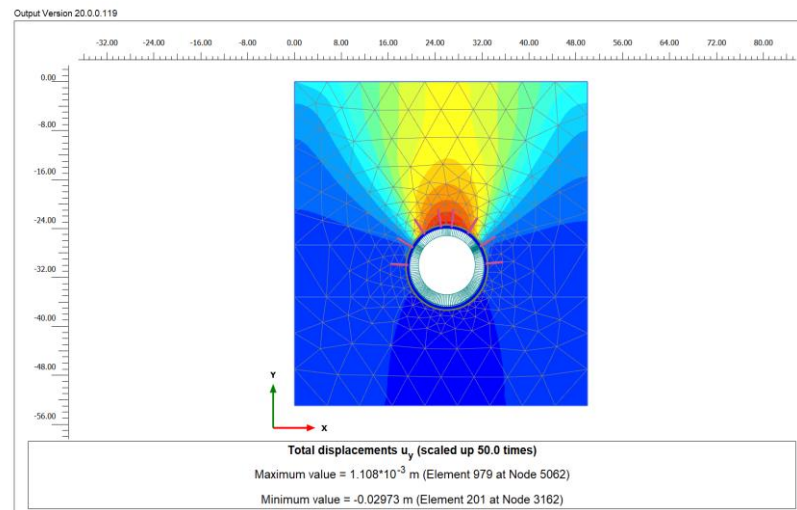


Gambar 5.61 Daerah Potensi Keruntuhan dengan *shotcrete* dan 8 *Rockbolt*

Analisis juga dilakukan dengan mencari besar *horizontal displacement* yang didapatkan nilai sebesar 0,006594meter. Sedangkan, *vertical displacement* didapatkan nilai sebesar 0,001108meter. Adapun penyebaran *horizontal displacement* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 8 *rockbolt* dapat dilihat pada Gambar 5.62 dan untuk *vertical displacement* pada Gambar 5.63 berikut ini.

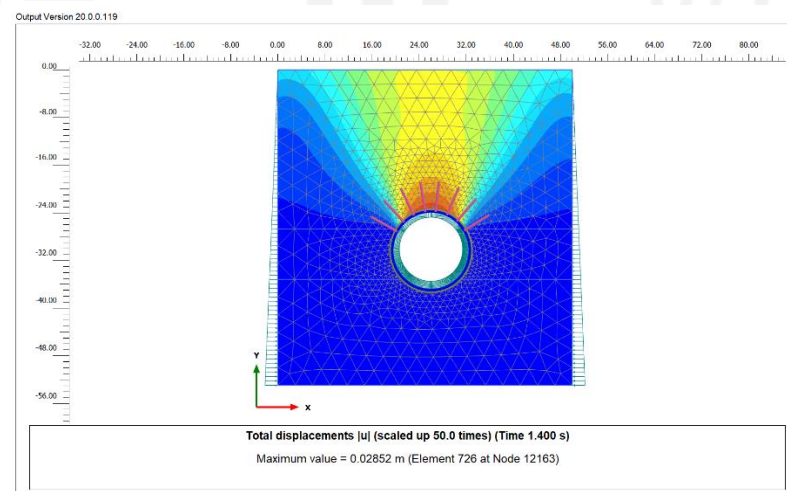


Gambar 5.62 *Horizontal Displacement* Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 8 *Rockbolt*

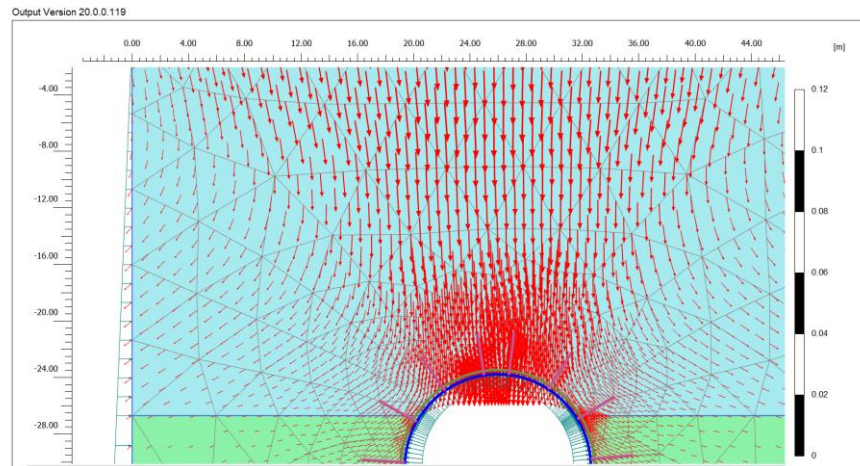


Gambar 5.63 Vertical Displacement Terowongan dengan Perkuatan Shotcrete dan 8 Rockbolt

Hasil analisis terowongan menggunakan perkuatan *shotcrete* dan 8 *rockbolt* dengan beban gempa didapatkan hasil *displacement* terbesar 0,02852 meter. Untuk melihat total displacement dapat dilihat pada Gambar 5.64 dan arah pergerakannya pada Gambar 5.65 berikut ini.

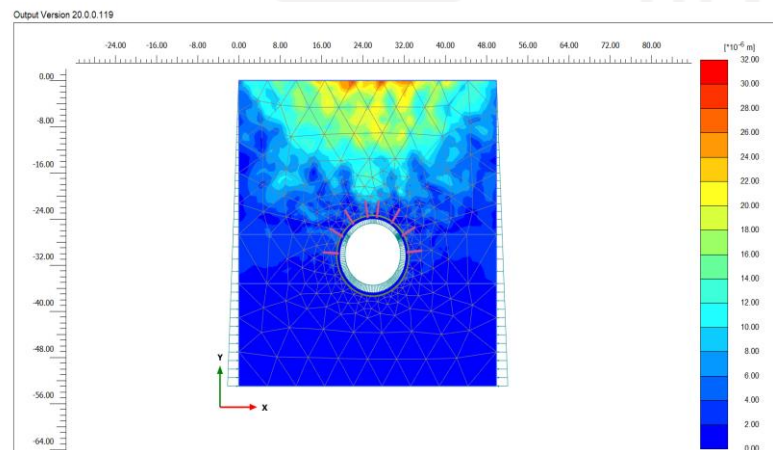


Gambar 5.64 Total Displacement Terowongan dengan Perkuatan Shotcrete dan 8 Rockbolt Setelah Adanya Beban Gempa



Gambar 5.65 Arah Pergerakan Tanah Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 8 *Rockbolt* Setelah Adanya Beban Gempa

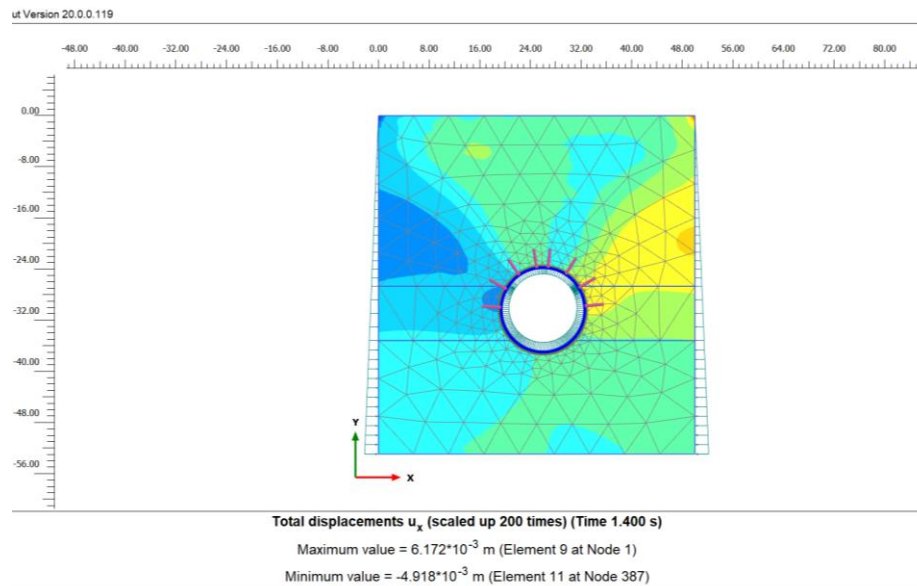
Untuk nilai *safety factor* adalah sebesar 5,146. Pola keruntuhan terowongan dengan *shotcrete* dan 8 *Rockbolt* setelah adanya beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.66 dibawah ini.



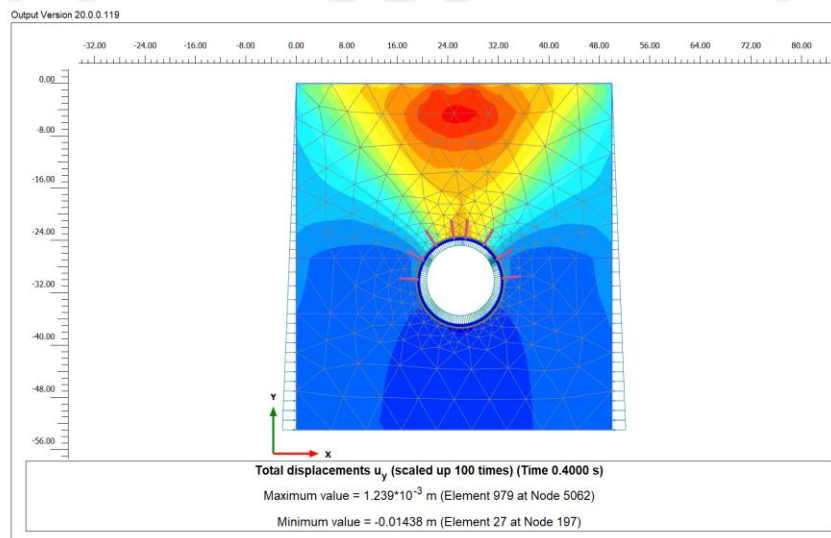
Gambar 5.66 Daerah Potensi Keruntuhan Dengan Beban Gempa Setelah Adanya Perkuatan *Shotcrete* dan 8 *Rockbolt*

Untuk hasil dari *horizontal displacement* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 8 *rockbolt* setelah adanya beban gempa diperoleh sebesar 0,006172meter. Adapun *vertical displacement* diperoleh sebesar 0,001239meter.

Untuk melihat penyebaran *Horizontal displacement* terowongan dengan perkuatan *shotcrete* setelah adanya beban gempa dapat dilihat pada Gambar 5.67 dan *vertical displacement* pada Gambar 5.68 dibawah ini.



Gambar 5.67 *Horizontal Displacement* Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 8 *Rockbolt* Setelah Adanya Beban Gempa



Gambar 5.68 *Vertical Displacement* Terowongan dengan Perkuatan *Shotcrete* dan 8 *Rockbolt* Setelah Adanya Beban Gempa

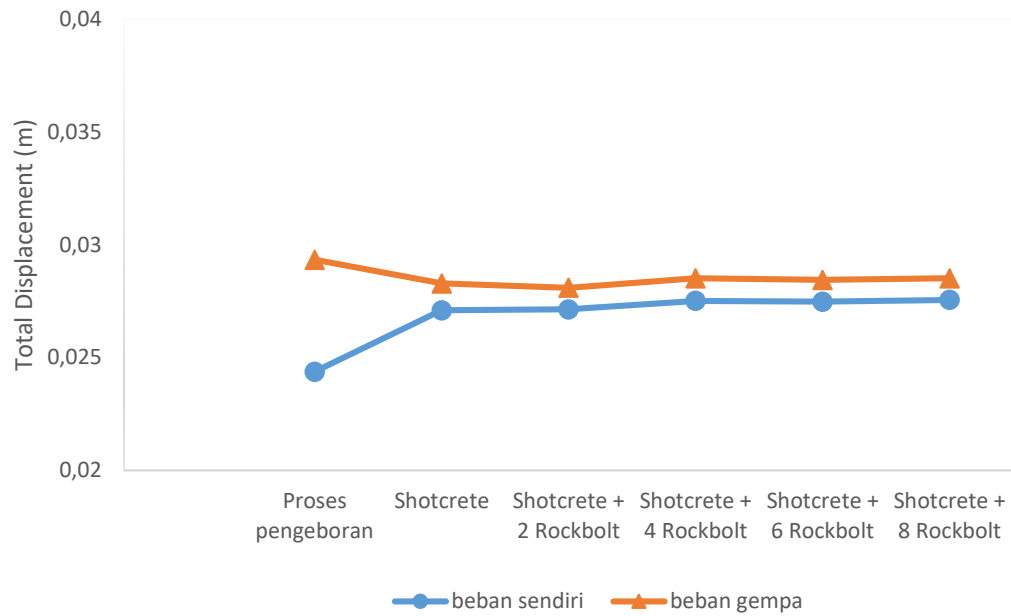
5.4 Rekapitulasi Hasil analisis Terowongan dengan Plaxis v.20

Pada analisis menggunakan Plaxis v.20 didapatkan hasil *total displacement* dan *safety factor* dari terowongan tanpa perkuatan dan dengan perkuatan menggunakan beban sendiri dan beban gempa. Untuk rekapitulasi hasil dari analisis terowongan menggunakan Plaxis v.20 dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut ini.

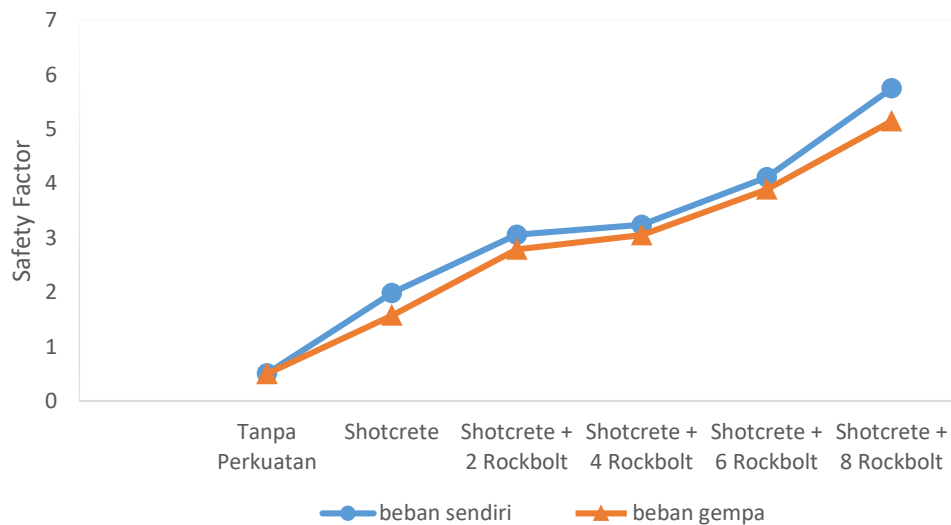
Tabel 5.1 Rekapitulasi Hasil Analisis Terowongan dengan Plaxis v.20

STEP	HORIZONTAL DISPLACEMENT (m)		VERTICAL DISPLACEMENT (m)		TOTAL DISPLACEMENT (M)		SAFETY FACTOR	
	BEBAN SENDIRI	BEBAN GEMPA	BEBAN SENDIRI	BEBAN GEMPA	BEBAN SENDIRI	BEBAN GEMPA	BEBAN SENDIRI	BEBAN GEMPA
Proses pengeboran	0,007158	0,006213	0,001016	0,001702	0,02437	0,02437	0,507	0,498
Shotcrete	0,006474	0,005218	0,001108	0,001239	0,0271	0,02829	1,985	1,573
Shotcrete + 2 Rockbolt	0,006411	0,005274	0,001109	0,001235	0,02714	0,02810	3,058	2,786
Shotcrete + 4 Rockbolt	0,006339	0,005220	0,001109	0,001232	0,02752	0,02852	3,239	3,051
Shotcrete + 6 Rockbolt	0,006364	0,006188	0,001109	0,001233	0,02748	0,02845	4,113	3,889
Shotcrete + 8 Rockbolt	0,006594	0,006172	0,001108	0,001239	0,02756	0,02852	5,748	5,146

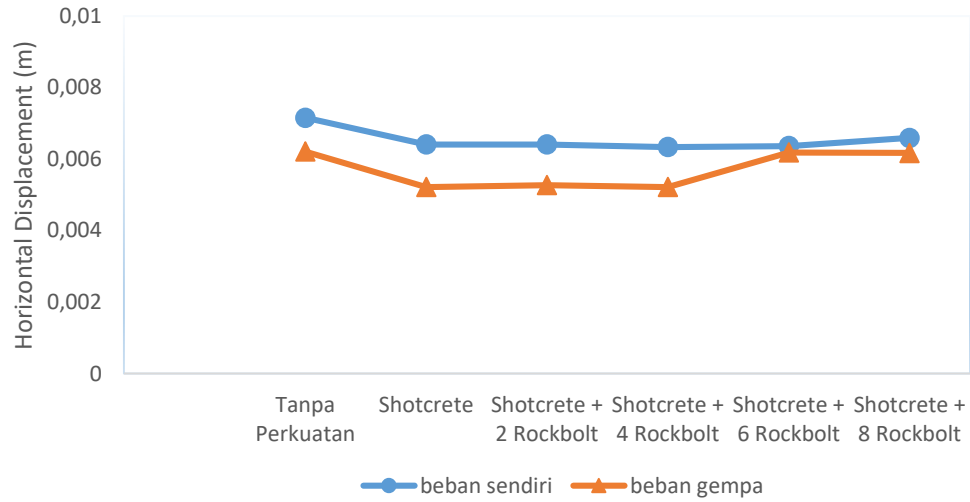
Untuk melihat perbandingan hasil analisis dengan menggunakan beban sendiri dan beban gempa maka, dibuat grafik yang menggambarkan nilai dari *total displacement*, *safety factor*, *horizontal displacement*, dan *vertical displacement* dengan program Plaxis v.20. Untuk grafik rekapitulasi hasil analisis dapat dilihat pada Gambar 5.69, Gambar 5.70, Gambar 5.71, dan Gambar 5.72 dibawah ini.



Gambar 5.69 Grafik Nilai *Total Displacement* Pada *Beban Sendiri* dan *Beban Gempa*



Gambar 5.70 Grafik Nilai *Safety Factor* Pada *Beban Sendiri* dan *Beban Gempa*



Gambar 5.71 Garfik Nilai *Horizontal Displacement* Pada **Beban Sendiri dan Beban Gempa**



Gambar 5.72 Garfik Nilai *vertical Displacement* Pada **Beban Sendiri dan Beban Gempa**

5.5 Pembahasan

Penelitian yang dilakukan penulis untuk melakukan analisis terowongan saat proses pengeboran dengan program Plaxis v.20 mengalami kelongsoran (*soil body collapse*). Ini dikarenakan didapatkan nilai faktor keamanan pada terowongan saat proses pengeboran dengan beban sendiri sebesar 0,507 dan nilai faktor keamanan dengan beban gempa sebesar 0,498. Hal ini menunjukkan bahwa saat dilakukan pengeboran lubang terowongan tidak aman dari terjadi kelongsoran.

Hal selanjutnya adalah dilakukan analisis terowongan dengan diberi perkuatan. Perkuatan yang digunakan adalah *shotcrete* dan *rockbolt*. Penulis menggunakan kombinasi dalam menambahkan dua jenis perkuatan tersebut. Pertama, dilakukan analisis terowongan setelah adanya perkuatan *shotcrete* didapatkan nilai *horizontal displacement* dengan beban sendiri sebesar 0,006474meter dan dengan beban gempa sebesar 0,005218meter. Nilai *vertical displacement* dengan beban sendiri sebesar 0,001018meter dan dengan beban gempa sebesar 0,001239meter. Nilai *total displacement* dengan beban sendiri sebesar 0,0271meter dan untuk nilai *total displacement* dengan beban gempa sebesar 0,02829meter. Nilai *safety factor* terowongan setelah adanya perkuatan *shotcrete* dengan beban sendiri adalah sebesar 1,985 dan dengan beban gempa sebesar 1,573. Kedua, dilakukan analisis terowongan setelah adanya perkuatan *shotcrete* dan 2 *rockbolt* didapatkan nilai *horizontal displacement* dengan beban sendiri sebesar 0,006411meter dan untuk *horizontal displacement* dengan beban gempa sebesar 0,005274meter. Nilai *vertical displacement* dengan beban sendiri sebesar 0,001019meter dan dengan beban gempa sebesar 0,001235meter. Nilai *total displacement* dengan beban sendiri sebesar 0,02714 meter dan dengan beban gempa sebesar 0,02810 meter. Nilai *safety factor* terowongan setelah adanya perkuatan *shotcrete* dan 2 *rockbolt* dengan beban gempa adalah sebesar 3,058 dan dengan beban gempa sebesar 2,786. Hasil analisis terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 4 *rockbolt* didapatkan nilai *horizontal displacement* dengan beban sendiri sebesar 0,006339meter dan untuk *horizontal displacement* dengan beban gempa

sebesar 0,0052204meter. Nilai *vertical displacement* dengan beban sendiri sebesar 0,001019meter dan dengan beban gempa sebesar 0,001232meter. Nilai *total displacement* dengan beban sendiri sebesar 0,02752 meter dan dengan beban gempa sebesar 0,02852 meter. Nilai *safety factor* yang didapatkan untuk beban sendiri sebesar 3,239 dan dengan beban gempa adalah sebesar 3,051. Hasil analisis terowongan dengan perkuatan *shotcrete* dan 6 *rockbolt* didapatkan nilai *horizontal displacement* dengan beban sendiri sebesar 0,006364meter dan untuk *horizontal displacement* dengan beban gempa sebesar 0,006188meter. Nilai *vertical displacement* dengan beban sendiri sebesar 0,001019meter dan dengan beban gempa sebesar 0,001233meter. Nilai *total displacement* dengan beban sendiri sebesar 0,02748 meter dan dengan beban gempa adalah sebesar 0,02845 meter. Nilai *safety factor* untuk beban sendiri didapatkan hasil sebesar 4,113 dan dengan beban gempa adalah sebesar 3,889. Kemudian, hasil analisis terakhir yang diteliti dengan menggunakan perkuatan *shotcrete* dan 8 *rockbolt* didapatkan nilai *horizontal displacement* dengan beban sendiri sebesar 0,006594meter dan untuk *horizontal displacement* dengan beban gempa sebesar 0,006172meter. Nilai *vertical displacement* dengan beban sendiri sebesar 0,001018meter dan dengan beban gempa sebesar 0,001239meter. Nilai *total displacement* dengan beban sendiri sebesar 0,02756 meter dan dengan beban gempa sebesar 0,02852 meter. Nilai *safety factor* dengan beban sendiri adalah sebesar 5,748 dan dengan beban gempa adalah sebesar 5,146.

Dari analisis diatas, nilai *total displacement* dengan beban sendiri semakin meningkat seiring penambahan perkuatan yang dipakai. Hal ini disebabkan oleh berat sendiri dari perkuatan *rockbolt* yang mempengaruhi besar *displacement*. Untuk nilai *total displacement* dengan beban gempa dinilai cenderung naik dan turun. Hal ini disebabkan oleh persebaran beban gempa yang terjadi pada lereng bukit yang ada diatas terowongan membuat kondisi tanah tidak stabil. Untuk hasil analisis dengan beban sendiri maupun beban gempa terjadi peningkatan nilai *safety factor* seiring bertambah jumlah perkuatan *rockbolt* yang dipakai. Tetapi, besar nilai *safety factor* dengan beban

sendiri lebih besar daripada dengan beban gempa. Penggunaan perkuatan untuk konstruksi terowongan proyek kereta api cepat dinilai dapat meningkatkan faktor keamanan mengurangi resiko dari kondisi keruntuhan. Dapat dilihat dari hasil *safety factor* saat terowongan diberi` perkuatan *shotcrete* dengan besar $>1,25$ (Bowles,1984)



BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari studi kasus dan analisis yang telah dilakukan untuk terowongan STA DIK3+420 proyek kereta api cepat Jakarta-Bandung. Dapat diuraikan beberapa kesimpulan sebagai berikut ini.

1. Terjadi kelongsoran pada terowongan tanpa perkuatan akibat beban sendiri. Dalam analisis dengan program Plaxis v.20 terowongan mengalami *soil body collapse* karena nilai faktor keamanan $0,507 < 1,25$ (Bowles,1984).
2. Pengaruh stabilitas terowongan terhadap nilai deformasi tanpa perkuatan dengan beban sendiri sebesar 0,02437 dan dengan beban gempa sebesar 0,02934 sehingga terjadi selisih nilai deformasi yang besar. Dalam analisis dengan program Plaxis v.20 terowongan mengalami *soil body collapse* karena nilai faktor keamanan $0,498 < 1,25$ (Bowles,1984).
3. Terowongan yang diberikan perkuatan, semakin bertambah jumlah perkuatannya nilai deformasi mengalami peningkatan dan nilai faktor keamanannya meningkat diatas syarat yang ditentukan.
4. Terowongan yang diberikan perkuatan akibat beban gempa, nilai faktor keamanan mengalami peningkatan dan terjadi penurunan nilai deformasi setiap penambahan jumlah perkuatan.
5. Penulis mempertimbangkan untuk menggunakan perkuatan *shotcrete* dan 2 *rockbolt* dalam desain perkuatan dengan mempertimbangkan selisih nilai deformasi dan faktor keamanan pada penambahan 2 *rockbolt* dan 4 *rockbolt* yang sangat sedikit. Penggunaan desain perkuatan *shotcrete* dan 2 *rockbolt* dapat sangat mengurangi waktu dan biaya sehingga pekerjaan akan lebih efektif dan efisien.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil analisis dan kesimpulan diatas maka, penulis dapat memberi saran pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Penggunaan perkuatan *shotcrete* dan *rockbolt* dapat menjadi alternatif dalam membuat desain perkuatan terowongan pada proyek kereta api cepat Jakarta-Bandung STA DIK3+420.
2. Analisis stabilitas terowongan sebaiknya ditinjau dari semua titik bor terowongan untuk mendapatkan variasi hasil yang dapat dipertimbangkan.
3. Untuk penelitian selanjutnya, penulis menyarankan untuk menambahkan pengaruh muka air dalam analisis stabilitas terowongan, agar mendapatkan hasil yang lebih spesifik.

DAFTAR PUSTAKA

- Alamsyah, Rinaldi, 2020, *Analisis Stabilitas dan Deformasi Terowongan Kereta Cepat Indonesia dengan Pendekatan Numerik Tiga Dimensi*, Institut Teknologi Nasional, Bandung.
- Apriyono, Arwan, 2010, *Tinjauan Kekuatan Sistem Penyangga Terowongan Menggunakan Metode Elemen Hingga*, Universitas Jendral Soedirman, Purwokerto.
- Bowles, J.E, 1984, *Physcal and Geotechnical Properties of Soils*, Erlangga, Jakarta.
- Darmawan, Angga, 2018, *Analisis Perilaku Terowongan Sirkular Akibat Beban Gempa Dengan Permodelan Elemen Hingga*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Das, Braja M. 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Erlangga. Jakarta.
- Dhanti, Putri Nova, 2019, *Analisis Stabilitas Terowongan Dangkal pada Tanah Lunak*, Universitas Pembangunan Nasional Veteran, Yogyakarta.
- Fadhillah, Ryan Achmad, 2016, *Analisis Geoteknik Terowongan Batuan Geurutee Aceh Menggunakan Metode Elemen Hingga*, Institut Teknologi Nasional, Bandung.
- Hatmoko, Dias Dwi, 2018, *Analisis Stabilitas Terowongan dengan Perkuatan Wiremesh dan Rockbolt Menggunakan Metode Elemen Hingga*, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Hermawan, Dody, 2019, *Analisis Geoteknik Terowongan Kereta Api Kebasen Menggunakan Metode Elemen Hingga*, Institut Teknologi Nasional, Bandung.
- Hoek, E. 2002. *Hoek-Brown Failure Criterion 2002 Edition*.
<http://www.rocsience.com>.
- Hoek, E. 2006. *Practical Rock Engineering*. Evert Hoek Consulting Engineer Inc, Columbia.

- Jufrizal, 2017, *Analisis Pengaruh Penguatan Rockbolt Terhadap Kekuatan Pilar Persegi Di Tambang Bawah Tanah Dengan Pengujian Skala Laboratorium*, Universitas Negeri Padang, Padang.
- KEMENPUPR, 2011, *Metode Perencanaan Penggalian dan Sistem Perkuatan Terowongan Jalan Pada Media Campuran Tanah-Batuan*, Jakarta.
- Kolymbas, D. 2005. *Tunneling and Tunnel Mechanic*. Springer. Berlin.
- Mohr, Coloumb, 2002, *Mohr-Coulomb Failure Criterion 2002 Edition*, <http://www.rockscience.com>.
- PT. KCIC, Jakarta, 2020
- Saptono, Singgih, 2017, *Analisis Pengaruh Penyanggaan pada Deformasi Terowongan Batuan Lemah pada Pembangunan Double Terowongan Jalur Tol Cisandawu*, Universitas Pembangunan Nasional Veteran, Yogyakarta.
- Shalaan, Heyam H, 2018, *Numerical Analysis of TBM Tunnel Lining Behavior using Shotcrete Constitutive Mode*, Universiti Sains Malaysia, Pulau Pinang, Malaysia.
- Singh dan Rajnish, 2006. *Tunneling in Weak Rock*. Elsevier Ltd. London.
- Szechy, K. 1967. *The Art of Tunnelling*. Akademiai Kiado, Budapest.
- Tibri, Tengku, 2017, *Analisis Kestabilan Terowongan Jalan Menggunakan Metode Empirik dan Analitik*, Medan.
- Van Gosliga, Rinske, 2014, *Deformation Analysis of a Bored Tunnel by Means of Terrestrial Laser Scanning*, Delf University of Technology, Netherlands.
- Yogaswara, Dendi, 2019, *Analisis Terowongan Jalan Raya Dengan Proteksi Umbrella Grouting Menggunakan Metode Elemen Hingga 2D*, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung

