

**ANALISA DINAMIK 2D PADA
TEROWONGAN MRT JAKARTA**

TESIS



Oleh:

**Jimmy Prasetyo
2014831031**

Pembimbing:

Prof. Ir. Paulus P. Rahardjo., MSCE, Ph. D

**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK SIPIL
BIDANG KONSENTRASI GEOTEKNIK
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
JULI 2017**



HALAMAN PENGESAHAN

**ANALISA DINAMIK 2D PADA
TEROWONGAN MRT JAKARTA**



Oleh:

**Jimmy Prasetyo
2014831031**

**Disetujui Untuk Diajukan Ujian Sidang pada Hari/Tanggal:
Selasa, 8 Agustus 2017**

Pembimbing:

Prof. Ir. Paulus P. Rahardjo., MSCE, Ph. D

**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK SIPIL
BIDANG KONSENTRASI GEOTEKNIK
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
BANDUNG
JULI 2017**



LEMBAR PERNYATAAN

Yang bertandatangan dibawah ini, saya dengan data diri sebagai berikut :

Nama : Jimmy Prasetyo
Nomor Pokok Mahasiswa : 2014831031
Program Studi : Magister Teknik Sipil,
Bidang Konsentrasi Geoteknik,
Program Pascasarjana,
Universitas Katolik Parahyangan.

Menyatakan bahwa Tesis dengan judul :

Analisa Dinamik 2D Pada Terowongan MRT Jakarta

adalah benar-benar karya tulis saya sendiri di bawah bimbingan Pembimbing, dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika keilmuan yang berlaku dalam masyarakat keilmuan.

Apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran terhadap etika keilmuan dalam karya saya, atau jika ada tuntutan formal atau non formal dari pihak lain berkaitan dengan keaslian karya saya ini, saya siap menanggung segala resiko, akibat dan/ atau sanksi yang dijatuhkan kepada saya, termasuk pembatalan gelar akademik yang saya peroleh dari Universitas Katolik Parahyangan.

Dinyatakan : di Bandung,

Tanggal : 20 Juli 2017



Jimmy Prasetyo

ANALISA DINAMIK 2D PADA TEROWONGAN MRT JAKARTA

Jimmy Prasetyo (NPM: 2014831031)
Pembimbing: Prof. Ir. Paulus P. Rahardjo., MSCE, Ph. D
Magister Teknik Sipil
Bandung
Juli 2017

ABSTRAK

Perkembangan transportasi bawah tanah sekarang sedang marak di Indonesia, khususnya pada pembangunan kereta api MRT yang sedang berlangsung. Dan juga Indonesia merupakan negara rawan terjadi gempa, sumber gempa yang dianggap memiliki potensi untuk menimbulkan kerusakan bagi kota Jakarta adalah wilayah selat Sunda diantara Sumatera dan Jawa. Oleh karena itu analisa bangunan bawah tanah terhadap gempa perlu dikaji lebih lanjut. Penelitian yang dilakukan adalah studi parameter, kemudian dilakukan studi kasus pada terowongan MRT-J. Dimana penelitian ini dilakukan dengan membandingkan analisis empiris dari jurnal yang diterbitkan (oleh Y.M.A. Hashash, J.J. Hook, B. Schmidt, J.I-C.Yao), analisis juga dilakukan dengan menggunakan NERA (*Nonlinear Earthquake site Response Analyses*) dan program PLAXIS. Pada analisis empiris diperoleh besar *racking* pada terowongan persegi panjang dengan menggunakan persamaan dari Wang (1993). Dalam penelitian ini menggunakan akselerasi gempa EL-Centro 18 Mei 1940. Hasilnya dapat diringkas sebagai berikut; (1) Hasil analisa deformasi dari studi empiris mendekati hasil pemodelan PLAXIS, namun pemodelan PLAXIS dapat melihat gerakan deformasi terowongan setiap waktu; (2) Studi empiris terbatas pada dimensi terowongan dan menggunakan satu jenis tanah; (3) Dalam studi kasus analisis NERA ada perbedaan dengan analisis PLAXIS, dimana pada dinding D-Wall terowongan analisa PLAXIS yang terjepit di antara tanah lunak dan keras terdapat deformasi yang cukup besar, sedangkan di NERA hanya di area permukaan D-Wall yang cacat; (4) Kerusakan yang terjadi berkurang dengan bertambahnya kedalaman *overburden*, terowongan dalam tampaknya lebih aman dan kurang rentan terhadap gempa daripada terowongan dangkal; (5) Fasilitas bawah tanah yang dibangun di tanah lunak mengalami lebih banyak kerusakan dibandingkan jika dibangun di tanah atau batu keras.

Kata Kunci: Terowongan, Gempa Bumi, Pseudostatik, Dinamik, NERA, PLAXIS.

DYNAMIC ANALYSIS 2D ON MRT JAKARTA TUNNEL

Jimmy Prasetyo (NPM: 2014831031)
Adviser: Prof. Ir. Paulus P. Rahardjo., MSCE, Ph. D
Magister of Civil Engineering
Bandung
July 2017

ABSTRACT

The development of underground transportation is now emerging in Indonesia, especially in the construction of the existing MRT railway. And also Indonesia is a country prone to earthquakes, the source of an earthquake that has the potential to cause damage to the city of Jakarta is the Sunda Strait region in Sumatra and Java. Therefore, the analysis of underground buildings against the earthquake should be studied further. The study was conducted by study parameters, then conducted a case study on the MRT-J tunnel. Where this study was conducted by comparing the empirical analysis of the published journal (by Y.M.A. Hashash, J.J.J. Hook, B. Schmidt, J.I-C.Yao), the analysis was also conducted using NERA (Non-linear Earthquake Response Analysis) and PLAXIS program. In the empirical analysis yielded large racking on rectangular tunnels using the equation of Wang (1993). In this study using the acceleration of EL-Centro earthquake May 18, 1940. The results can be summarized as follows; (1)The result of deformation analysis from empirical study similar of PLAXIS modeling result, but PLAXIS modeling can see tunnel deformation movement at any time; (2)Empirical studies are limited to tunnel dimensions and use of one type of soil; (3) In the case study of NERA analysis there is a difference with PLAXIS analysis, where on the wall D-Wall tunnel of PLAXIS analysis sandwiched between soft and hard soils there is considerable deformation, whereas in NERA only in the defective D-Wall surface area; (4) The damage that occurs decreases with the depth of overburden, the inner tunnel seems safer and less prone to earthquakes than the shallow tunnel; (5) Underground facilities built on soft soil are more damaged when built on soil or hard rock.

Keywords: Tunnel, Earthquake, Pseudostatic, Dynamic, NERA, PLAXIS.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan kasih karunia-Nya sehingga Tesis ini dapat diselesaikan dengan baik dan tepat pada waktunya. Penulisan tesis merupakan persyaratan kurikulum Program Pascasarjana Magister Teknik Sipil Universitas Katolik Parahyangan ini bertujuan untuk memberikan bekal kepada mahasiswa dan tambahan pengetahuan untuk kalangan yang bekerja di bidang Geoteknik.

Pada kesempatan ini saya ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Prof. Paulus P. Rahardjo., Ph. D, selaku pembimbing tunggal atas bimbingan dan arahnya selama penyusunan dan penulisan tesis ini.
2. Prof. A. Aziz Djajaputra, MSCE, atas saran dan masukan saat seminar judul, seminar isi maupun ujian sidang.
3. Budijanto Widjaja, Ph.D, atas saran dan masukan saat seminar judul, seminar isi maupun ujian sidang.
4. Kedua orang tua saya serta adik saya yang telah membantu dalam memberikan dorongan dan semangat untuk menyelesaikan tesis ini.
5. Keluarga besar Testana Engineering Inc., Ir. Sugeng Setyawan., Ms.C, yang saya hormati, yang telah memberikan kesempatan, kepercayaan dan beasiswa kepada saya selama studi. Tak lupa pula rekan-rekan (Ibu Agustina, Bapak Dimas, Ibu Handayani, Bapak Helix, Bapak Yehezkiel, Bapak Michael, dan Bapak Agiel, dan lainnya) yang telah banyak membantu dan memberikan dorongan dalam penulisan tesis ini.

6. Keluarga besar PT. Geotechnical Engineering Consultant (GEC) yang telah mengizinkan untuk menggunakan data-data Terowongan MRT-J.
7. Rekan mahasiswa geoteknik yang telah banyak membantu dan memberikan dorongan dalam penulisan tesis ini.

Bila ada kesalahan dalam tesis ini, segala kritik dan saran akan diterima untuk menyempurnakan isi tesis.

Bandung, 20 Juli 2017

Penulis

Jimmy Prasetyo

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL

HALAMAN PENGESAHAN

ABSTRAK

KATA PENGANTAR..... i

DAFTAR ISI..... iii

DAFTAR GAMBAR..... vi

DAFTAR TABEL xiii

DAFTAR LAMPIRANxv

BAB 1 PENDAHULUAN1

1.1. Latar Belakang 1

1.2. Maksud dan Tujuan Penelitian.....7

1.3. Lingkup Penelitian8

1.4. Metode Penelitian9

1.5. Sistematika Penulisan10

BAB 2 STUDI LITERATUR11

2.1. Seismologi dan Gempa Bumi 11

2.2. Gelombang Seismik 11

2.3. Pendekatan Teknik Analisa dan Desain Gempa. 13

2.4. Percepatan, Kecepatan, dan Amplitudo Perpindahan 16

2.5. Perambatan Gelombang dan Analisa Site-Specific Response 16

2.6. Deformasi Aksial dan Kurvatur Pada Kondisi Free-Fields. 18

2.7. Free-Field Shear Deformation21

2.8. Pendekatan Interaksi Tanah-Struktur	27
2.9. Perhitungan Gaya Lateral Pada Dinding Terowongan	47
2.10. Parameter Dinamik Tanah.....	50
2.11. Efek Kondisi Tanah Lokal Terhadap Akselerasi Di Permukaan	52
BAB 3 METODE PENELITIAN	55
3.1. Pendahuluan	55
3.2. Alur Penelitian.....	55
3.3. NERA (Nonlinier Earthquake site Response Analysis)	57
3.4. PLAXIS	67
BAB 4 STUDI PARAMETRIK	71
4.1. Pendahuluan	71
4.2. Racking Efek Pada Terowongan Persegi (Power at al., 1996).....	71
4.3. Ovaling Efek Pada Terowongan Melingkar	74
4.4. Analisa NERA (Nonlinier Earthquake site Response Analysis).....	83
4.5. Gaya Pada Dinding Akibat Gempa (Farhang-Ostadan)	86
4.6. Gaya Pada Dinding Akibat Gempa (Westergard & Wood)	87
4.7. PLAXIS 2D - STATIS	88
4.8. PLAXIS 2D - DINAMIK.....	113
4.9. Rangkuman Hasil Analisis Terowongan Persegi	126
4.10. Rangkuman Hasil Analisis Terowongan Lingkaran	130
BAB 5 STUDI KASUS	133
5.1. Pendahuluan	133
5.2. Penyelidikan Geoteknik	133
5.3. Tinjauan Geologi dan Tektonik Regional	134

5.4. Lapisan Tanah.....	139
5.5. Parameter Statik Tanah	141
5.6. Parameter Dinamik Tanah	146
5.7. Percepatan Gempa di Batuan Dasar.....	149
5.8. Geometri Station MRT-J.....	154
5.9. Beban Dinamik Pada Dinding Terowongan Dengan NERA.....	162
5.10. Pemodelan Stasiun Bendungan Hilir Pada PLAXIS 2D.....	163
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN.....	175
6.1. Kesimpulan	175
6.2. Saran	176
DAFTAR PUSTAKA	177
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Lokasi Proyek MRT Jakarta	4
Gambar 2.1. Respon Tanah Akibat Gempa P-Wave dan S-Wave.	12
Gambar 2.2. Respon Tanah Akibat Gempa Love Wave dan Rayleigh Wave.....	13
Gambar 2.3. Deformasi Terowongan Akibat Gelombang Seismik.....	15
Gambar 2.4. Geometri Dari Gelombang Geser Sinusoidal Miring Terhadap Sumbu Terowongan. Wang (1993)	19
Gambar 2.5. Distorsi Geser Pada Bidang Free Field di Permukaan akibat Gelombang Geser	22
Gambar 2.6. Distorsi geser kondisi free-field dari tanah berlubang dan tidak berlubang,	23
Gambar 2.7. Gelombang Seismik yang Menyebabkan longitudinal axial dan bending strain (Power et al. 1996)	24
Gambar 2.8. Tipikal Deformasi Racking Kondisi Free-Field dikenakan pada bidang persegi yang tertanam (after Wang, 1993)	24
Gambar 2.9. Stabilitas Struktur untuk bidang persegi yang tertanam (after Wang, 1993).	26
Gambar 2.10. Induksi gaya dan momen yang disebabkan oleh gelombang seismik (Power et. al., 1996), a) Induksi gaya dan momen yang disebabkan penyebaran sepanjang aksis terowongan, b) induksi keliling gaya dan momen yang disebabkan penyebaran gelombang tegak lurus terhadap aksis terowongan.....	28
Gambar 2.11. Respon koefisien lining vs. rasio fleksibility, full-slip (after Wang, 1993).	34
Gambar 2.12. Koefisien Respon Lapisan (trust) vs. Rasio Kompresibilitas,	36
Gambar 2.13. Normalisasi Defleksi Lining vs. Ratio Fleksibilitas,	37
Gambar 2.14. Perjanjian Tanda Untuk Komponen Gaya Pada Lining Melingkar	39
Gambar 2.15. Kekakuan Relatif Antara Tanah dan Bingkai Persegi Panjang (after Wang, 1993). (a) Distorsi Geser Lentur Dari Media Tanah Free-Field,.....	41

Gambar 2.16. Normalisasi defleksi struktur, terowongan lingkaran vs persegi panjang.....	45
Gambar 2.17. Penyederhanaan Model Analisa (Setelah Wang, 1993):.....	46
Gambar 2.18. Diagram gaya yang terjadi pada dinding basement saat gempa.....	49
Gambar 2.19. Perkiraan Percepatan Puncak di Batuan dan di Permukaan Tanah (Idriss, 1990).....	53
Gambar 3.1. Flowchart Metode Penelitian	56
Gambar 3.2. Skema pemodelan Viscoelastic oleh Kelvin-Voigt.....	58
Gambar 3.3. Model Equivalent-Linier: (a) Hysteresis Stress-Strain curve; dan (b) Variasi Secant Shear Modulus dan Damping Ratio Dengan Shear Strain Amplitude.....	59
Gambar 3.4. Skema Stress-Strain Model Dari Iwan (1967) dan Mroz (1967).	60
Gambar 3.5. Backbone curve (kiri) saat pembebanan dan hysteretic stress-strain loop (kanan) dari IM model saat siklus loading-unloading.	62
Gambar 3.6. A_i , l_i , dan J_i pada hysteretic loop dari model IM saat siklus loading-unloading.	62
Gambar 3.7. Contoh pertama dari perhitungan rasio redaman dari kurva $G / G_{max-\gamma}$, dan dibandingkan dengan rasio redaman yang digunakan oleh model yang setara equivalent.....	65
Gambar 3.8. Contoh kedua dari perhitungan rasio redaman dari kurva $G / G_{max-\gamma}$, dan dibandingkan dengan rasio redaman yang digunakan oleh model yang linier equivalent.....	65
Gambar 4.1. Normalisasi Defleksi Struktur, Terowongan Lingkaran vs Persegi (Wang, 1993)	73
Gambar 4.2. Kerusakan Bangunan Akibat Gempa El-Centro	83
Gambar 4.3. Accelerogram Gempa El-Centro (NS) 14 Mei 1940.....	84
Gambar 4.4. Input Profile Tanah Dalam NERA	84
Gambar 4.5. Ragam Perpindahan Maksimum di Permukaan dengan Variasi Kedalaman Tanah Keras (Bed Rock)	85
Gambar 4.6. Gaya Gempa Yang Bekerja Pada Dinding Terowongan (Farhang Ostadan, 2004).....	86
Gambar 4.7. Gaya Gempa Yang Bekerja Pada Dinding Terowongan (Westergard & Wood)	87

Gambar 4.8. Pemodelan Terowongan Persegi di PLAXIS 2D.....	89
Gambar 4.9. Beban Deformasi (Prescribed Displacement).....	90
Gambar 4.10. Pemodelan Beban Deformasi (Prescribed Displacement).....	91
Gambar 4.11. Deformasi Terowongan Persegi (Prescribed Displacement).....	91
Gambar 4.12. Deformasi Total, Horizontal, dan Vertikal Terowongan Persegi Akibat Beban Deformasi.....	92
Gambar 4.13. Grafik Deformasi Akibat Beban Prescribed Displacement.....	93
Gambar 4.14. Tipikal Gaya Tekan, Geser, dan Momen Akibat Beban Deformasi.....	94
Gambar 4.15. Grafik Gaya Tekan, Geser, dan Momen Akibat Beban Deformasi.....	95
Gambar 4.16. Beban Terpusat Pada Terowongan Persegi (Point Load).....	96
Gambar 4.17. Deformasi Terowongan Persegi Akibat Beban Terpusat.	96
Gambar 4.18. Deformasi Total, Horizontal, dan Vertikal Terowongan Persegi Akibat Beban Terpusat.....	97
Gambar 4.19. a) Grafik Deformasi Akibat Beban Terpusat, b) Rasio Fleksibilitas Struktur Terowongan Terhadap Tanah.....	98
Gambar 4.20. Tipikal Gaya Tekan, Geser, dan Momen Akibat Beban Terpusat.....	99
Gambar 4.21. Beban vs Gaya Tekan, Geser, dan Momen.	100
Gambar 4.22. Beban Metara Pada Dinding Terowongan Akibat Gempa	101
Gambar 4.23. Pemodelan Beban Dinamik (Distributed Load)	102
Gambar 4.24. Deformasi Terowongan Persegi (Distributed Load).....	102
Gambar 4.25. Deformasi Total, Horizontal, dan Vertikal Terowongan Persegi Akibat Beban Merata	103
Gambar 4.26. Grafik Deformasi Akibat Beban Merata.....	104
Gambar 4.27. Tipikal Gaya Tekan, Geser, dan Momen Akibat Beban Merata. .	105
Gambar 4.28. Grafik Gaya Tekan, Geser, dan Momen Akibat Beban Merata ...	106
Gambar 4.29. Model Terowongan Melingkar di PLAXIS 2D	107

Gambar 4.30. Pemodelan Beban Deformasi Tanah Pada Terowongan Lingkaran.....	108
Gambar 4.31. Kontur Deformasi Pada Terowongan Melingkar.....	108
Gambar 4.32. Deformasi Total, Deformasi Arah X dan Arah Y Terowongan Melingkar.....	109
Gambar 4.33. Grafik Deformasi Akibat Beban Deformasi Terowongan Melingkar.....	110
Gambar 4.34. Tipikal Gaya Tekan, Geser, dan Momen Akibat Beban Deformasi Pada Terowongan Melingkar.....	111
Gambar 4.35. Grafik Gaya Tekan, Geser, dan Momen Maksimum vs. Jarak Pada Terowongan Melingkar, Akibat Beban Deformasi (Prescribed Displacement).....	112
Gambar 4.36. Percepatan Gempa El-Centro (NS) Dibatuan Dasar.....	113
Gambar 4.37. Pemodelan Analisa Dinamik Pada Terowongan Persegi.....	114
Gambar 4.38. Generate Mesh Pemodelan Analisa Dinamik Pada Terowongan Persegi.....	114
Gambar 4.39. Deformasi Total, Horizontal, dan Vertikal Pada Terowongan Persegi Akibat Beban Dinamik.....	115
Gambar 4.40. Grafik Deformasi Total, Horizontal dan Vertikal Terowongan Persegi.....	116
Gambar 4.41. Gaya Tekan, Geser, dan Momen Terowongan Persegi Akibat Beban Dinamik.....	118
Gambar 4.42. Grafik Deformasi Total, Horizontal dan Vertikal Terowongan Persegi.....	119
Gambar 4.43. Pemodelan Analisa Dinamik Terowongan Lingkaran Pada PLAXIS.....	120
Gambar 4.44. Generate Mesh Pemodelan Analisa Dinamik Pada Terowongan Lingkaran.....	120
Gambar 4.45. Deformasi Total, Horizontal, dan Vertikal Pada Terowongan Lingkaran Akibat Beban Dinamik.....	121
Gambar 4.46. Grafik Deformasi Total, Horizontal dan Vertikal Terowongan Lingkaran Akibat Beban Dinamik.....	122

Gambar 4.47. Gaya Tekan, Geser, dan Momen Terowongan Lingkaran Akibat Beban Dinamik.....	124
Gambar 4.48. Pola Deformasi Terowongan Persegi Terhadap Kekakuan Tanah.....	127
Gambar 4.49. Pola Fleksibilitas Terowongan Persegi Terhadap Kekakuan Tanah.....	128
Gambar 4.50. Pola Deformasi Terowongan Persegi Terhadap Waktu.....	129
Gambar 4.51. Pola Deformasi Terowongan Lingkaran Terhadap Kekakuan Tanah.....	131
Gambar 4.52. Pola Fleksibilitas Terowongan lingkaran Terhadap Kekakuan Tanah.....	132
Gambar 4.53. Pola Deformasi Terowongan Lingkaran Terhadap Waktu Akibat Beban Dinamis	132
Gambar 5.1. Lokasi Titik Penyelidikan Tanah Stasiun Bendungan Hilir CP105	133
Gambar 5.2. Peta Geologi Jakarta dan Sekitarnya (PPPG, Bandung 1992).....	135
Gambar 5.3. Posisi Proyek Pada Peta Geologi.....	136
Gambar 5.4. Profil Gempa pada Potongan A-A Disekitar Lokasi Studi.....	137
Gambar 5.5. Profil Kegempaan Disekitar Lokasi Studi.	138
Gambar 5.6. Lapisan Tanah Stasiun Bendungan Hilir Section A	139
Gambar 5.7. Lapisan Tanah Stasiun Bendungan Hilir Section B	140
Gambar 5.8. Lapisan Tanah Stasiun Bendungan Hilir Section C	140
Gambar 5.9. Korelasi N_{60} versus s_u (Terzaghi & Peck, 1967 dan Sower, 1979).....	142
Gambar 5.10. Korelasi N_{60} versus c'	143
Gambar 5.11. Korelasi N_{60} versus c' (Bjerrum & Simons, 1960; Kenney, 1959; dan Ladd,1977)	144
Gambar 5.12. Korelasi Nilai Cepat Rambat Gelombang Geser Empirik Lokal..	146
Gambar 5.13. Perbandingan Nilai Vs Berdasarkan Hasil Pengukuran dan Korelasi Empirik	147
Gambar 5.14. Peta Gempa Indonesia. (SNI 1726:2012).....	149

Gambar 5.15. Akselerogram EL CENTRO 1940 SOUTH HORIZONTAL dengan PGA 0.264g.....	150
Gambar 5.16. Pelapisan tanah dan kedalaman batuan dasar Jakarta (Purbo Hadiwidjojo 1972)	151
Gambar 5.17. Respons spektrum gempa Wilayah DKI Jakarta berdasarkan SNI 1726:2012	153
Gambar 5.18. Plan Stasiun Bendungan Hilir CP105	154
Gambar 5.19. Potongan A-A Stasiun Bendungan Hilir CP105	154
Gambar 5.20. Potongan B-B Stasiun Bendungan Hilir CP105.....	155
Gambar 5.21. Potongan C-C Stasiun Bendungan Hilir CP105.....	155
Gambar 5.22. Tahap 1 Stasiun Bendungan Hilir CP105	157
Gambar 5.23. Tahap 2 Stasiun Bendungan Hilir CP105	157
Gambar 5.24. Tahap 3 Stasiun Bendungan Hilir CP105	158
Gambar 5.25. Tahap 4 Stasiun Bendungan Hilir CP105	158
Gambar 5.26. Tahap 5 Stasiun Bendungan Hilir CP105	159
Gambar 5.27. Hasil Perhitungan NERA pada Stasiun Bendungan Hilir.	162
Gambar 5.28. Pemodelan Stasiun Bendungan Hilir Potongan A-A	163
Gambar 5.29. Pemodelan Stasiun Bendungan Hilir Potongan B-B.....	164
Gambar 5.30. Pemodelan Stasiun Bendungan Hilir Potongan C-C.....	165
Gambar 5.31. Detail Pemodelan Stasiun Bendungan Hilir Potongan A-A.....	166
Gambar 5.32. Detail Pemodelan Stasiun Bendungan Hilir Potongan B-B	166
Gambar 5.33. Detail Pemodelan Stasiun Bendungan Hilir Potongan C-C.....	167
Gambar 5.34. Pemodelan Beban Dinamis Dengan Cara Pseudostatik Pada Plaxis.....	167
Gambar 5.35. Deformasi, Geser dan Momen Stasiun Bendungan Hilir Potongan A-A	168
Gambar 5.36. Pemodelan Beban Dinamik (PLAXIS) Stasiun Bendungan Hilir Potongan A-A	169
Gambar 5.37. Deformasi Horizontal Stasiun Bendungan Hilir Potongan A-A ..	170

Gambar 5.38. Pola Racking Deformasi Stasiun Bendungan Hilir Potongan A ..	171
Gambar 5.39. Rangkuman Pola Racking Deformasi.....	172
Gambar 5.40. Deformasi, Geser dan Momen Stasiun Bendungan Hilir Potongan A-A.....	173
Gambar 5.41. Perbandingan Deformasi, Geser dan Momen dengan NERA dan PLAXIS	174

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Rasio Kecepatan Puncak Terhadap Percepatan Puncak Dipermukaan Pada Batuan dan Tanah (after Power et al., 1996).....	17
Tabel 2.2. Rasio Displacement Puncak Terhadap Percepatan Puncak Dipermukaan Pada Batuan dan Tanah (after Power et al., 1996).....	17
Tabel 2.3. Rasio ground motion pada batuan dasar dan ground motion pada permukaan (after Power et al., 1996).....	18
Tabel 2.4. Tegangan Tanah Permukaan Free-Field	20
Tabel 2.5. Korelasi Empirik N-SPT dengan Vs	51
Tabel 2.6. Korelasi Empirik N-SPT dengan Gmax.....	52
Tabel 4.1 Gaya Gempa Yang Bekerja Pada Dinding Terowongan (Farhang Ostadan, 2004)	86
Tabel 4.2 Gaya Gempa Yang Bekerja Pada Dinding Terowongan (Westergard & Wood)	87
Tabel 4.3 Deformasi Yang Bekerja Pada Dinding Terowongan.....	90
Tabel 4.4 Deformasi Akibat Beban Prescribed Displacement.....	93
Tabel 4.5 Gaya Tekan, Geser, dan Momen Akibat Beban Deformasi.....	95
Tabel 4.6 Deformasi Akibat Beban Terpusat (Point Load)	98
Tabel 4.7 Beban Dinamis Pada Dinding Terowongan.....	101
Tabel 4.8 Deformasi Akibat Beban Prescribed Displacement.....	104
Tabel 4.9 Gaya Tekan, Geser, dan Momen Akibat Beban Merata	106
Tabel 4.10 Deformasi Total Terowongan Melingkar Akibat Beban Pergerakan	110
Tabel 4.11 Deformasi Terowongan Melingkar Akibat Beban Pergerakan.....	110
Tabel 4.12 Gaya Tekan, Geser, dan Momen Maksimum vs. Jarak Pada Terowongan Melingkar, Akibat Beban Deformasi (Prescribed Displacement).	112

Tabel 4.13 Deformasi Total, Horizontal, dan Vertikal Pada Terowongan Persegi Akibat Beban Dinamik Yang Divariasi Kedalaman Tanah Kerasnya.....	117
Tabel 4.14 Gaya Tekan, Geser, dan Momen Terowongan Persegi Akibat Beban Dinamik.....	119
Tabel 4.15 Deformasi Total, Horizontal, dan Vertikal Pada Terowongan Lingkaran Akibat Beban Dinamik Yang Divariasi Kedalaman Tanah Kerasnya.....	123
Tabel 4.16 Gaya Tekan, Geser, dan Momen Terowongan Lingkaran Akibat Beban Dinamik.....	125
Tabel 4.17 Rangkuman Hasil Analisa Racking Pada Terowongan Persegi	126
Tabel 4.18 Rangkuman Hasil Analisa Ovaling Pada Terowongan Lingkaran....	130
Tabel 5.1 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Nilai SPT	141
Tabel 5.2 Nilai Berat Isi Tanah Lempung Untuk Setiap Tipe.....	141
Tabel 5.3 Nilai Sudut Geser Efektif	143
Tabel 5.4 Parameter Desain Untuk Bendungan Hilir Stasiun Section A	145
Tabel 5.5 Parameter Desain Untuk Bendungan Hilir Stasiun Section B	145
Tabel 5.6 Parameter Desain Untuk Bendungan Hilir Stasiun Section C	145
Tabel 5.7 Parameter Desain Untuk Bendungan Hilir Stasiun Section A	148
Tabel 5.8 Parameter Desain Untuk Bendungan Hilir Stasiun Section B	148
Tabel 5.9 Parameter Desain Untuk Bendungan Hilir Stasiun Section C	148
Tabel 5.10. Klasifikasi situs (SNI 1726 : 2012)	152
Tabel 5.11. Rata-rata nilai N-SPT pada masing-masing borehole	153
Tabel 5.12. Dimensi Galian Untuk Stasiun Bendungan Hilir CP105	159
Tabel 5.13. Elevasi Strut dan Galian Stasiun Bendungan Hilir	160
Tabel 5.14. Properti Dinding Penahan Tanah.....	160
Tabel 5.15. Properti Strut	161
Tabel 5.16. Properti Struktur Permanen	161

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Racking Efek

Lampiran 2. Ovaling Efek

Lampiran 3. Gaya Lateral Farhang dan Ostadan (2004)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Teknologi terowongan di Indonesia telah cukup lama di kenal semenjak era pemerintahan kolonial Belanda. Terowongan Lembah Anai 1 merupakan terowongan pertama yang dibuat pada tahun 1890 s/d 1891 dengan panjang mencapai sekitar ± 100 m, yang berlokasi di Padangpanjang, Lembah Anai, Sumatera Barat. Proses pembuatan terowongan saat itu dikerjakan secara padat karya menggunakan alat-alat tradisional dan metode pelaksanaan konvensional, tidak sedikit menimbulkan korban dan kendala teknis selama proses pelaksanaan, antara lain korban akibat keruntuhan dinding terowongan, seperti yang terjadi saat pembangunan terowongan Wilhelmina (1902) dengan panjang mencapai ± 1208 m yang merupakan terowongan yang diambil dari nama seorang ratu dari kerajaan Belanda yang memiliki nama lengkap Wilhemina Pauline Maria (1890 - 1948). Pada awalnya terowongan dibangun sebagai prasarana transportasi perkeretaapian untuk pengangkutan hasil bumi.

Selain alasan kepentingan ekonomi, terowongan juga pernah ditujukan sebagai sistem drainase untuk mengalirkan kelebihan daerah aliran sungai (DAS) sungai Brantas yang mengalir di Tulungagung (Jawa Timur) ke Samudera Hindia, dimana pada tahun 1955 daerah Tulungagung pernah mengalami banjir bandang, yang banyak menelan korban jiwa serta tak sedikit harta benda. Terowongan yang

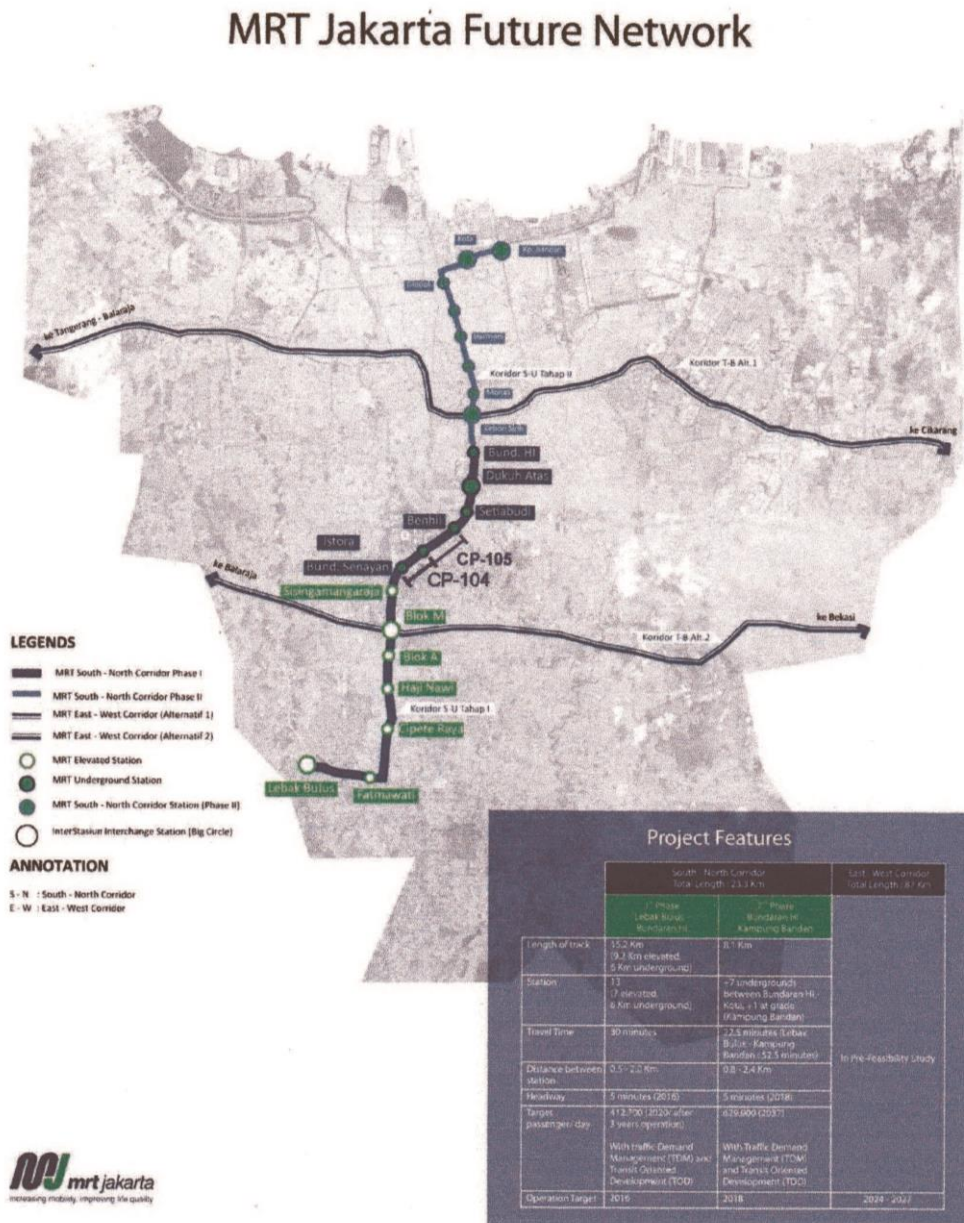
berada di Tulungagung tersebut dinamakan Niyama yang pertama kali digagas oleh Jepang saat menjajah Indonesia (1942 - 1945), kemudian dilanjutkan oleh Dinas Pengairan Provinsi Jawa Timur pada tahun 1955 - 1961. Tak hanya sampai disitu saja, terowongan Niyama (1978) dikembangkan pula untuk memanfaatkan kelebihan sumber air sungai Ngrowo yang berhilir di saluran Parit Agung yang cukup melimpah untuk kepentingan pembangkit tenaga listrik tenaga air (PLTA), tepatnya berlokasi di dusun Sidem, Desa Besole, Kecamatan Besuki, Kabupaten Tulungagung.

Dewasa ini pembangunan infrastruktur berkembang dengan sangat cepat dan merata diberbagai daerah di Indonesia. Kereta api merupakan sarana transportasi darat antar daerah yang didalam pengoperasiannya membutuhkan daerah yang cukup luas dan panjang, sehingga dibeberapa tempat tidak bisa dihindari akan adanya pekerjaan terowongan maupun jembatan didalam perjalanannya. Didukung dengan teknologi konstruksi yang telah tersedia saat ini, membuat konstruksi terowongan cukup aman dan berhasil dengan baik sebagaimana konstruksi struktur sipil besar lainnya, seperti halnya konstruksi terowongan bawah tanah yang saat ini masih sedang berlangsung untuk jalur akses kereta api cepat di Jakarta yang merupakan bagian dari angkutan cepat terpadu (*Mass Rapid Transit, MRT*) Jakarta yang dilakukan dengan menggunakan mesin bor terowongan (*Tunnel Boring Machine, TBM*) yang sering juga disebut *MOLE* (sejenis tikus pembuat lubang terowongan) yang memiliki diameter ± 6.7 m dengan panjang mesin diukur dari bagian kepala (*cutterhead*) hingga bagian akhir (*backup cars*) sekitar ± 43.0 m dengan bobot yang mencapai 323 ton (Sumber : Kompas 23 Desember 2015).

Jalur MRT Jakarta rencananya akan membentang lebih kurang ± 110.8 km, yang meliputi 2 koridor (Sumber : Wikipedia) :

- Koridor Selatan – Utara (Koridor Lebak Bulus - Kampung Bandan) sepanjang ± 23.8 km. Dikelompokkan menjadi 2 tahap konstruksi. Tahap 1 menghubungkan Lebak Bulus sampai dengan Bundaran HI sepanjang ± 15.7 km dengan 13 stasiun (7 stasiun layang dan 6 stasiun bawah tanah). Proses pembangunannya telah dimulai sejak 10 Oktober 2013 dan direncanakan akan dapat dioperasikan pada tahun 2018. Tahap berikutnya melanjutkan jalur Selatan – Utara, dimulai dari area Bundaran Hotel Indonesia (HI) sampai dengan Kampung Bandan, sepanjang ± 8.1 km. Tahap ini merupakan tahap 2 yang akan dimulai dibangun setelah tahap 1 beroperasi dan dijadwalkan beroperasi pada tahun 2020.
- Koridor Timur – Barat yang direncanakan memiliki panjang ± 87.0 km. Untuk jalur ini masih belum dikerjakan, masih dalam tahapan studi kelayakan, ditargetkan paling lambat dapat beroperasi pada 2024 - 2027.

Konstruksi terowongan yang dilaksanakan dengan menggunakan mesin bor terowongan (TBM) merupakan alternatif konstruksi terowongan lainnya selain metode konvensional yang dilakukan dengan pemboran yang disertai peledakan. *Tunnel Boring Machine* memiliki beberapa keunggulan seperti mengantisipasi gangguan ataupun longsor tanah disekitar dinding terowongan, sehingga akan menghasilkan dinding terowongan yang relatif halus. Tentunya berdampak pada finansial, yang akan mengurangi ekstra biaya pelapisan dinding terowongan, dan tipe mesin ini cukup bersesuaian untuk digunakan di daerah-daerah urbanisasi seperti di Jakarta yang dihuni lebih dari 9 Juta jiwa (Sumber : Wikipedia).



Gambar 1.1. Lokasi Proyek MRT Jakarta

Sementara itu pencegahan kerusakan infrastruktur dalam hal ini terowongan akibat gerakan tanah misalnya saja akibat gempa bumi perlu dilakukan kajian tersendiri. Indonesia merupakan daerah rawan bencana alam gempa bumi, mengingat berada didaerah tektonik yang sangat aktif. Jalur pertemuan tiga lempeng tektonik, yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia, dan lempeng

Pasifik. Lempeng Indo-Australia bergerak relatif ke arah utara dan menyusup kedalam lempeng Eurasia, sementara lempeng Pasifik bergerak relatif ke arah barat. Oleh karena itu perlu dilakukan tinjauan kegempaan untuk keperluan desain guna memastikan stabilitas terowongan beton seperti yang masih berlangsung di Jakarta dengan menggunakan sistem melayang bukannya berlabuh atau menempel pada batuan dasar.

Tujuan dari desain seismik seperti desain teknik sipil lainnya adalah untuk memberikan kapasitas struktural untuk menahan beban ataupun perpindahan yang terjadi. Pendekatan yang digunakan dalam desain seismik berbeda dengan desain teknik sipil lainnya, mengingat alasan berikut ini.

- Beban gempa tidak dapat dihitung secara akurat (hanya perkiraan saja). beban gempa yang berasal dengan tingginya tingkat ketidakpastian, tidak seperti beban mati, beban hidup, atau efek lain seperti perubahan suhu. pengaruh seismik lebih ditentukan oleh risiko (probabilitas terlampaui) yang terkait dengan itu.
- Pada umumnya beban seismik hanya bersifat sementara ataupun siklik. Frekuensi atau tingkat tindakan-tindakan siklik cukupnya bervariasi mulai dari kurang dari 1 Hz ataupun lebih besar dari 10 Hz .
- Beban gempa terkadang tumpang-tindih dengan beban permanen lainnya. Meskipun pengaruh seismik hanya bersifat sementara, desain seismik harus mempertimbangkan efek gempa mengingat adanya beban berkelanjutan lainnya.

Untuk memperoleh nilai percepatan gelombang geser dipermukaan tanah dari batuan dasar, dilakukan dengan pendekatan linier maupun non-linier.

Pendekatan linier dapat dilakukan dengan menggunakan program SHAKE yang diperkenalkan oleh Schnabel et. Al., (1972) ataupun *Equivalent-linear Earthquake site Response Analysis* (EERA) yang disampaikan oleh Bardet et. Al., (2000). Sementara itu, pendekatan analisa dengan non-linier untuk perambatan gelombang geser satu dimensi dipermukaan dapat pula dilakukan dengan menggunakan bantuan program *Nonlinear Earthquake site Response Analysis* (NERA) yang disampaikan oleh Bardet & Tobita (2001). Kramer (1966) menyampaikan beberapa keunggulan pendekatan nonlinier bilamana dibandingkan dengan metode linier ekivalen, sebagai berikut :

- Kekakuan dari kondisi tanah yang aktual berubah sepanjang kejadian gempa, sehingga kondisi amplifikasi yang sangat tinggi yang terjadi jika digunakan pendekatan linier ekivalen tidak akan terjadi dalam kondisi sesungguhnya di lapangan.
- Metoda nonlinier dapat digunakan untuk memodelkan redistribusi atau dissipasi eksese tegangan air tanah selama dan sesudah kejadian gempa.

Selanjutnya, untuk melakukan kajian perambatan gelombang geser diperlukan parameter dinamik tanah yang dapat diperoleh dari hasil pengujian dilapangan (*In-stu Test*) seperti *seismic cross hole test* dan *seismic down-hole (up-hole test)* ataupun dari hasil pengujian dilaboratorium seperti halnya *resonant column test*, *cyclic triaxial test*, dan *cyclic direct simple shear test*. Selain itu dapat juga dilakukan pendekatan empiris yang pernah terpublikasi untuk mendapatkan parameter dinamik, misalnya yang diperoleh dari hasil pengujian penetrasi standard (SPT), sondir mekanis (CPT) ataupun pengujian tanah statis secara konvensional dilaboratorium.

Klasifikasi tanah berdasarkan variasi kekakuan tanah juga ikut berperan didalam menentukan perambatan gelombang geser dipermukaan. Sesuai dengan Standard Nasional Indonesia (SNI) 03-1726-2002 terdapat beberapa klasifikasi jenis tanah, antara lain : tanah keras, tanah sedang, tanah lunak maupun tanah khusus. Penentuan ini dilakukan dari nilai rata-rata dari kecepatan gelombang geser (V_s , m/s), nilai N hasil pengujian penetrasi standard (N-SPT, bpf) ataupun kuat geser tanah tak terdrainase (S_u , kPa) sampai dengan mencapai kedalaman ± 30 m dibawah permukaan tanah lokasi tinjauan.

Hasil kajian perambatan gelombang geser satu dimensi dari batuan dasar ke permukaan nantinya akan dijadikan input dalam program geoteknik dengan metode finite elemen (PLAXIS), sehingga diharapkan akan diperoleh perilaku konstruksi terowongan dengan adanya kegempaan untuk lokasi tinjauan. Penelitian menggunakan data proyek MRT di Jakarta yang sudah dilaksanakan. Penelitian ini masih belum banyak dilaksanakan di Indonesia, hal ini menjadikan salah satu faktor tersendiri yang menjadi latar belakang dari penelitian ini.

1.2. Maksud dan Tujuan Penelitian

Adapun maksud dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Melakukan kajian dan analisa kegempaan terhadap terowongan MRT di Jakarta dengan menggunakan referensi dari Parsons Brinckerhoff (*Seismic Desain of Tunnels – A Simple State of the Art Design Approach*),
- Melakukan analisa rambatan gelombang dengan bantuan program NERA yang disampaikan oleh Bardet & Tobita (2001),

- Melakukan 2 pemodelan analisa terowongan akibat beban gempa dengan cara asumsi beban statis dan beban dinamis dengan bantuan program finite elemen PLAXIS,
- Membandingkan hasil perhitungan dari analisa dengan metode yang diusulkan Parsons Brinckerhoff, dengan hasil analisa program PLAXIS yang dimodelkan dengan 2 cara statis dan dinamis.
- Melakukan analisa studi kasus terhadap terowongan MRT yang ada di Jakarta .

Sementara itu, tujuan dari penelitian ini untuk memperoleh pemahaman lebih lanjut mengenai perilaku bangunan dibawah tanah dalam hal ini terowongan akibat beban dinamis (gempa), mengingat adanya potensi kegempaan di Indonesia yang sangat tinggi. Sehingga dari penelitian ini didapat pendekatan desain yang efisien dan ekonomis sesuai dengan keadaan dilapangan dan dapat menjadikan penelitian-penelitian lebih lanjut.

1.3. Lingkup Penelitian

Kajian dan analisa kegempaan terhadap terowongan MRT di Jakarta dengan menggunakan referensi dari Parsons Brinckerhoff, analisis perambatan gelombang geser satu dimensi nantinya dilakukan dengan menggunakan pendekatan non-linier dengan bantuan program NERA yang disampaikan oleh Bardet & Tobita (2001). Pemodelan dan studi kegempaan dilakukan dengan metode elemen hingga dan menggunakan bantuan program geoteknik PLAXIS. Pemodelan dilakukan dengan 2 cara pembebanan yaitu dengan cara statis dan dinamis. Studi dilakukan

pada terowongan MRT Jakarta yang sedang dikonstruksi. Studi kasus tersebut menggunakan data tanah dan parameter tanah yang sudah ada dan dilakukan oleh jasa penyelidikan tanah lokal. Penelitian ini dilakukan pada 2 bentuk terowongan, yaitu persegi dan lingkaran.

1.4. Metode Penelitian

1.4.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian mengambil area stasiun CP 105 yang berada pada jalur (koridor), yang tentunya akan dilalui oleh jalur angkutan cepat terpadu (*Mass Rapid Transit, MRT*) Jakarta, dimana konstruksi terowongan beton bawah tanah dilakukan dengan menggunakan mesin bor terowongan (*Tunnel Bore Machine, TBM*) dengan diameter terowongan sekitar ± 6.7 m.

1.4.2. Studi Literatur

Penelitian diawali dengan pengumpulan data seperti dengan mengumpulkan literature, data penyelidikan tanah ataupun data pendukung lainnya, as built drawing terowongan, yang berhubungan dengan penelitian ini.

1.4.3. Metode Analisis

Analisa awalnya dengan menggunakan referensi dari Parsons Brinckerhoff (*Seismic Desain of Tunnels – A Simple State of the Art Design Approach*).

Referensi ini menggunakan 2 jenis bidang struktur yaitu persegi dan lingkaran. Bangunan bawah tanah dengan bentuk persegi pada umumnya akan mengalami *racking deformation* sedangkan bangunan lingkaran akan mengalami *ovaling deformation* bila terkena beban dinamis (gempa).

Melakukan analisa rambatan gelombang gempa dengan pendekatan non-linier dengan bantuan program *Nonlinier Earthquake site Response Analysis* (NERA) yang disampaikan oleh Bardet & Tobita (2001). Analisa ini untuk mendapatkan percepatan, kecepatan, tegangan, rengangan, dan deformasi di permukaan tanah.

Kemudian melakukan 2 pemodelan analisa terowongan akibat beban gempa dengan cara asumsi beban statis dan beban dinamis dengan bantuan program finite elemen PLAXIS. Membandingkan hasil perhitungan dari analisa dengan metode yang diusulkan Parsons Brinckerhoff, dengan hasil analisa program PLAXIS yang dimodelkan dengan 2 cara statis dan dinamis. Melakukan analisa studi kasus terhadap terowongan MRT yang ada di Jakarta

1.5. Sistematika Penulisan

Tesis ini ditulis dalam 5 bab, secara garis besar adalah sebagai berikut, BAB 1 berisikan pendahuluan, latar belakang, maksud dan tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, metoda penelitian, sistematika penulisan; BAB 2 studi literatur; BAB 3 metode penelitian; BAB 4 studi parametrik; BAB 5 studi kasus proyek MRT Jakarta; dan BAB 6 berisikan kesimpulan dan saran.