

DAFTAR ISI

| | |
|--|-------|
| HALAMAN JUDUL..... | i |
| HALAMAN PENGESAHAN..... | ii |
| PERNYATAAN..... | iii |
| PERSEMBAHAN..... | iv |
| KATA PENGANTAR..... | v |
| DAFTAR ISI..... | vi |
| DAFTAR TABEL..... | x |
| DAFTAR GAMBAR..... | xii |
| DAFTAR NOTASI..... | xv |
| INTISARI..... | xvii |
| ABSTRACT..... | xviii |
| BAB 1 PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah..... | 2 |
| 1.3 Tujuan Penelitian..... | 2 |
| 1.4 Batasan Masalah..... | 2 |
| 1.5 Manfaat..... | 3 |
| 1.6 Keaslian Penelitian..... | 3 |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA..... | 5 |
| 2.1 Definisi Terowongan..... | 5 |
| 2.2 Klasifikasi Terowongan..... | 6 |
| 2.2.1 Fungsi terowongan..... | 6 |
| 2.2.2 Metode pembuatan terowongan..... | 7 |
| 2.3 <i>Lining</i> Terowongan..... | 8 |
| 2.4 Gempa Bumi..... | 9 |
| 2.5 Pengaruh Gempa Bumi Terhadap Struktur Bawah Tanah..... | 9 |
| 2.5.1 Getaran tanah..... | 10 |
| 2.5.2 Keruntuhan tanah..... | 10 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.6 | Parameter Pergerakan Tanah untuk Perencanaan | 10 |
| 2.7 | <i>Seismic Hazard Analysis</i> | 12 |
| 2.7.1 | Metode DSHA (<i>Deterministic Seismic Hazard Analysis</i>)... | 12 |
| 2.7.2 | Metode PSHA (<i>Probabilistic Seismic Hazard Analysis</i>)..... | 13 |
| 2.8 | Perbedaan Desain Beban Gempa pada Struktur Bawah Tanah dan Struktur di atas Permukaan Tanah. | 13 |
| 2.8.1 | <i>Force method</i> untuk struktur di atas permukaan tanah..... | 14 |
| 2.8.2 | Metode deformasi struktur di bawah permukaan tanah..... | 14 |
| 2.9 | Prosedur Analisis dan Desain Beban Gempa | 14 |
| BAB 3 | LANDASAN TEORI..... | 15 |
| 3.1 | Nilai Parameter Tanah..... | 15 |
| 3.2 | Regangan Lepas Tanah (<i>Free field strain</i>)..... | 16 |
| 3.2.1 | Regangan aksial tanah (<i>Free field axial strain</i>)..... | 17 |
| 3.2.2 | Regangan lentur tanah (<i>Free field bending curvature</i>)..... | 17 |
| 3.3 | Pembebanan Pada <i>Lining</i> Terowongan..... | 18 |
| 3.3.1 | Terowongan lingkaran | 18 |
| 3.3.2 | Terowongan persegi..... | 22 |
| 3.4 | Kriteria Beban Gempa..... | 23 |
| 3.4.1 | <i>Operating Design Earthquake</i> (ODE)..... | 23 |
| 3.4.2 | <i>Maximum Design Earthquake</i> (MDE)..... | 24 |
| 3.5 | Perambatan Gelombang Geser (<i>S-wave</i>)..... | 25 |
| 3.5.1 | Kecepatan gelombang..... | 25 |
| 3.5.2 | Sudut datang gelombang..... | 26 |
| 3.6 | Respons Struktur Bawah Tanah Terhadap Gempa | 26 |
| 3.6.1 | Tekanan aksial | 26 |
| 3.6.2 | Pembengkokan arah memanjang (<i>Longitudinal bending</i>)... .. | 27 |
| 3.6.3 | <i>Ovaling</i> atau <i>racking</i> | 28 |

| | |
|---|-----------|
| 3.7 Pendekatan Interaksi Struktur Tanah (<i>Soil structure interaction</i>) | 28 |
| 3.7.1 Metode <i>closed form</i> untuk terowongan lingkaran | 28 |
| 3.7.2 Deformasi oval pada terowongan lingkaran | 30 |
| 3.7.3 <i>Racking deformations</i> pada terowongan persegi | 34 |
| 3.8 Deformasi Horizontal Tanah | 36 |
| 3.9 Reduksi Momen Inersia Penampang | 38 |
| 3.10 Tekanan Tanah Lateral Dinamik | 39 |
| BAB 4 METODE PENELITIAN | 40 |
| 4.1 Umum | 40 |
| 4.2 Tahapan Penelitian | 40 |
| 4.2.1 Studi literatur | 40 |
| 4.2.2 Pengumpulan data | 40 |
| 4.2.3 Prosedur analisis data | 40 |
| 4.3 Bagan Alir Penelitian | 42 |
| 4.3.1 Terowongan lingkaran | 43 |
| 4.3.2 Terowongan persegi | 44 |
| BAB 5 HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN | 45 |
| 5.1 Kondisi Lapangan | 45 |
| 5.2 Kondisi Tanah | 46 |
| 5.3 Lingkungan Gempa | 49 |
| 5.4 Terowongan Lingkaran | 50 |
| 5.4.1 Geometri terowongan | 50 |
| 5.4.2 Perhitungan beban statis | 51 |
| 5.4.3 Pendekatan potongan melintang (<i>Cross sectional approach</i>) | 53 |
| 5.4.4 Pendekatan memanjang (<i>Longitudinal approach</i>) | 56 |
| 5.5 Terowongan Persegi | 61 |
| 5.5.1 Geometri terowongan | 61 |
| 5.5.2 Perhitungan beban statis | 62 |

| | |
|---|----|
| 5.5.3 Analisis beban gempa pada terowongan gali tutup (<i>cut and cover tunnel</i>) | 66 |
| 5.6 Pembahasan..... | 71 |
| 5.6.1 Terowongan lingkaran | 71 |
| 5.6.2 Terowongan persegi..... | 72 |
| BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN..... | 76 |
| 6.1 Kesimpulan..... | 76 |
| 6.2 Saran..... | 77 |
| DAFTAR PUSTAKA | 78 |
| LAMPIRAN | 82 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|------------|--|----|
| Tabel 2.1 | Rasio pergerakan tanah pada kedalaman terowongan dan pergerakan tanah pada permukaan tanah (Power dkk. 2004) | 11 |
| Tabel 3.1 | Perkiraan rasio Poisson (Bowles, 1977)..... | 16 |
| Tabel 3.2 | Persamaan elastik untuk menghitung gaya pada segmen (ITA, 2000) | 21 |
| Tabel 3.3 | Kecepatan gelombang geser berdasarkan jenis tanah (Das & Ramana, 2011) | 25 |
| Tabel 3.5 | Nilai periode natural gelombang menurut kondisi tanah (Railway Technical Research Institute, 1999)..... | 36 |
| Tabel 5.1 | Data tanah (Mott Mc Donald, 2013)..... | 48 |
| Tabel 5.2 | Kondisi tanah pada titik bor 104-3..... | 48 |
| Tabel 5.3 | Kondisi tanah pada titik bor 104-5..... | 48 |
| Tabel 5.4 | Geometri terowongan..... | 50 |
| Tabel 5.5 | Nilai gaya dalam maksimum pada segmen <i>lining</i> akibat beban statis | 53 |
| Tabel 5.6 | Parameter desain metode pendekatan potongan melintang | 54 |
| Tabel 5.7 | Hasil perhitungan metode pendekatan potongan melintang | 56 |
| Tabel 5.8 | Parameter desain metode pendekatan memanjang..... | 57 |
| Tabel 5.9 | Hasil perhitungan pada level pembebanan ODE | 60 |
| Tabel 5.10 | Hasil perhitungan pada level pembebanan MDE..... | 61 |
| Tabel 5.11 | Hasil perhitungan metode pendekatan memanjang..... | 61 |
| Tabel 5.12 | Deformasi horizontal tanah..... | 67 |
| Tabel 5.13 | Gaya yang terjadi pada <i>lining</i> terowongan lingkaran | 71 |
| Tabel 5.14 | Gaya dalam yang terjadi pada <i>roof</i> (atap terowongan persegi)..... | 73 |
| Tabel 5.15 | Gaya dalam yang terjadi pada <i>left wall</i> (dinding kiri terowongan) | 74 |
| Tabel 5.16 | Gaya dalam yang terjadi pada <i>right wall</i> (dinding kanan terowongan)..... | 74 |
| Tabel 5.17 | Gaya dalam yang terjadi pada <i>center wall</i> (dinding dalam terowongan)..... | 74 |

Tabel 5.18 Gaya dalam yang terjadi pada *slab* (lantai terowongan)..... 75

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 2.1 | Penampang melintang terowongan | 5 |
| Gambar 2.2 | Penampang melintang terowongan persegi..... | 6 |
| Gambar 2.3 | Tampak samping TBM (<i>Sumber : Kloymbas 2005</i>) | 7 |
| Gambar 2.4 | Konfigurasi segmen pada <i>lining</i> terowongan..... | 9 |
| Gambar 2.5 | Ilustrasi hubungan lokasi gempa dengan pusat gempa | 9 |
| Gambar 2.6 | A. Gelombang primer; B. Gelombang sekunder; C. Gelombang Love; D. Gelombang Rayleigh (<i>Sumber : Bolt, 1978</i>)..... | 10 |
| Gambar 3.1 | A Regangan pada tanah tidak terganggu; B. Regangan pada tanah terganggu (terdapat rongga) (<i>Sumber : Wang, 1993</i>)..... | 17 |
| Gambar 3.2 | Kondisi aman pada kombinasi pembebanan <i>lining</i> terowongan (<i>Sumber: Blom, 2002</i>) | 18 |
| Gambar 3.3 | Beban mati pada terowongan (<i>Sumber : ITA, 2000</i>)..... | 19 |
| Gambar 3.4 | Gaya dalam yang terjadi pada <i>lining</i> terowongan..... | 21 |
| Gambar 3.5 | Posisi sudut terhadap puncak terowongan (<i>crow</i> n)..... | 21 |
| Gambar 3.6 | Pembebanan pada terowongan persegi (<i>Sumber: FHWA, 2009</i>).. | 23 |
| Gambar 3.7 | Perambatan gelombang gempa (<i>Sumber : Wang, 1993</i>)..... | 26 |
| Gambar 3.8 | (a) Pemampatan dan pemanjangan; (b) Tekanan pada terowongan (<i>Sumber : Owen dan Schol, 1981</i>) | 27 |
| Gambar 3.9 | Pembengkokan arah memanjang dan perambatan gelombang arah diagonal (<i>Sumber : Owen dan Scholl, 1981</i>) | 27 |
| Gambar 3.10 | <i>Ovaling</i> dan <i>Racking</i> (<i>Sumber : Owen dan Scholl, 1981</i>) | 28 |
| Gambar 3.11 | Nilai K_1 berdasarkan nilai rasio fleksibilitas dan rasio Poisson (<i>Sumber: Wang, 1993</i>) | 32 |
| Gambar 3.12 | Nilai K_2 berdasarkan nilai rasio kompresibilitas dan rasio Poisson (<i>Sumber: Wang, 1993</i>) | 33 |
| Gambar 3.13 | Deformasi <i>racking</i> pada terowongan persegi (<i>Sumber : Power dkk., 2004</i>) | 35 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Gambar 3.14 | Diagram distribusi vertikal dari desain deformasi horizontal dari bedrock hingga permukaan tanah, A: Pada kondisi satu lapis tanah; B: Pada kondisi dua lapisan tanah; C: Tanah heterogen (lebih dari 2 lapis tanah) (<i>Sumber : Railway Technical Research Institute, 1999</i>)..... | 37 |
| Gambar 3.15 | Deformasi horizontal pada tanah di sekitar terowongan persegi (<i>Sumber : Wang, 1993</i>) | 37 |
| Gambar 3.16 | Tekanan tanah lateral dinamik (<i>Sumber : Power dkk., 2004</i>) | 39 |
| Gambar 4.1 | Bagan alir penelitian | 42 |
| Gambar 4.2 | Bagan alir penelitian pada terowongan lingkaran | 43 |
| Gambar 4.3 | Bagan alir penelitian pada terowongan persegi | 44 |
| Gambar 5.1 | Peta Proyek MRT Jakarta (<i>Sumber: PT SOWJ-JV, 2013</i>) | 46 |
| Gambar 5.2 | Tampak atas titik bor sebagai referensi..... | 47 |
| Gambar 5.3 | Interpretasi lapisan tanah pada titik bor referensi | 47 |
| Gambar 5.4 | Identifikasi sumber gempa pada radius 500 km (<i>Sumber : PT SOWJ-JV, 2014</i>)..... | 49 |
| Gambar 5.5 | Kondisi lapisan tanah pada terowongan lingkaran 104-1 | 51 |
| Gambar 5.6 | Beban statis yang bekerja pada terowongan | 53 |
| Gambar 5.7 | Tinjauan pendekatan potongan melintang (<i>Sumber : Power dkk., 2004</i>)..... | 54 |
| Gambar 5.8 | Tinjauan pendekatan memanjang (<i>Sumber : Power dkk., 1996</i>) .. | 57 |
| Gambar 5.9 | Dimensi terowongan persegi tipe <i>box 2</i> | 62 |
| Gambar 5.10 | Beban yang bekerja pada terowongan persegi | 64 |
| Gambar 5.11 | Pemodelan dua dimensi terowongan persegi pada SAP2000 | 65 |
| Gambar 5.12 | Tampak tiga dimensi pemodelan terowongan persegi pada SAP2000 | 65 |
| Gambar 5.13 | Titik pembebanan pada terowongan persegi..... | 66 |
| Gambar 5.14 | Deformasi horizontal tanah pada kondisi: a. ODE; b. MDE..... | 67 |
| Gambar 5.15 | Beban titik P | 69 |
| Gambar 5.16 | Deformasi horizontal struktur yang terjadi akibat beban P..... | 69 |
| Gambar 5.17 | Gaya normal pada kondisi tinjauan ODE..... | 72 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Gambar 5.18 | Gaya geser pada kondisi tinjauan ODE | 72 |
| Gambar 5.19 | Momen pada tinjauan kondisi ODE | 73 |