

## ANALISIS PERILAKU TEROWONGAN SIRKULAR AKIBAT BEBAN GEMPA DENGAN PEMODELAN ELEMEN HINGGA

Angga Darmawan <sup>1)</sup>, Teuku Faisal Fathani <sup>2)</sup>, Iman Satyarno <sup>3)</sup>

<sup>1),2),3)</sup>Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada  
Jalan Grafika No.2, Yogyakarta, Indonesia  
Email : [anggadarmawan93@gmail.com](mailto:anggadarmawan93@gmail.com)

**Abstrak.** Salah satu permasalahan yang dimiliki oleh kota-kota besar adalah masalah transportasi. DKI Jakarta menjadi contoh kota besar di negara berkembang yang memiliki masalah di bidang transportasi. Salah satu solusi adalah pembangunan sistem transportasi angkut masal berupa MRT (*Mass Rapid Transit*). Dilakukan penelitian tentang pemodelan perilaku terowongan terhadap pengaruh beban gempa serta dampak terhadap bangunan di sekitarnya. Metode yang digunakan dalam analisis perilaku terowongan yaitu metode numeris dengan bantuan software PLAXIS v.8.6 dan ABAQUS v.6.11 dan perhitungan empiris dengan metode Wang (1993). Untuk analisis stabilitas terowongan dan penurunan tanah menggunakan metode Muir Wood (1975), Carranza-Torres (2013) dan Schmidt (1974). Beban gempa yang diterapkan pada konstruksi terowongan proyek MRT Jakarta dimulai dari 250 cm/detik<sup>2</sup> sampai 550 cm/detik<sup>2</sup>. Hasil rata-rata kenaikan deformasi lining terowongan sebesar 3,03 mm (17,68 %), gaya aksial sebesar 207,97 kN (9,24 %), momen lentur sebesar 22,95 kNm (18,57%) dan penurunan permukaan tanah sebesar 3,95 mm (25,32%). Untuk penurunan pada permukaan tanah ditinjau secara horisontal. Nilai angka aman rata-rata dari analisis stabilitas terowongan sebesar 4,6. Dari seluruh hasil yang didapatkan, disimpulkan bahwa kekuatan batas struktur terowongan yang dapat diterima akibat beban gempa yaitu pada PGA 550 cm/detik<sup>2</sup> dan masih dalam keadaan stabil. Semakin dalam air tanah dari permukaan tanah, semakin besar dampak yang dihasilkan terhadap struktur terowongan tersebut.

**Kata kunci :** terowongan, gempa, deformasi, gaya dalam, stabilitas

### 1. Pendahuluan

#### 1.1 Latar Belakang

Kota-kota besar di negara berkembang sering kali dihadapi dengan banyak permasalahan transportasi. DKI Jakarta yang merupakan Ibu Kota dari Negara Indonesia menjadi contoh kota besar di negara berkembang yang memiliki masalah di bidang transportasi. Pemerintah DKI Jakarta tentunya memiliki beberapa solusi untuk mengatasi permasalahan transportasi yang ada, salah satunya adalah pembangunan sistem transportasi angkut masal berupa MRT (*Mass Rapid Transit*). Sebagian besar proyek MRT (*Mass Rapid Transit*) Jakarta khususnya struktur terowongan berada di Jakarta bagian utara. Secara garis besar dasar tanah di Jakarta merupakan endapan lempung vulkanik yang berusia kurang lebih 2500 tahun. Untuk permukaan tanah di Jakarta bagian utara sebagian besar terdiri dari lempung lunak. Bila terjadi gempa kuat, wilayah Jakarta utara paling rawan mengalami proses penurunan pada permukaan tanah. Di samping itu gempa berkekuatan besar juga akan merambatkan getaran gempa sehingga mengalami amplifikasi atau perbesaran guncangan terhadap struktur atas maupun bawah. Menurut peta gempa Indonesia yang dipublikasikan oleh USGS (2012), kota Jakarta berada pada zona percepatan puncak dasar (*Peak Ground Acceleration*) antara 0,245 g – 0,326 g. Melihat pentingnya perencanaan dalam pembuatan konstruksi terowongan tahan gempa di Jakarta, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut. Terkait dengan hal tersebut maka dilakukan penelitian tentang pemodelan perilaku terowongan terhadap pengaruh beban gempa serta dampak terhadap bangunan di sekitarnya.

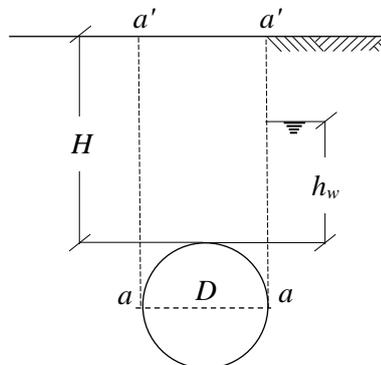
## 1.2 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memodelkan terowongan dengan metode berbasis elemen hingga (MEH) menggunakan *software* PLAXIS v.8.6 dan ABAQUS v.6.11 akibat beban gempa.
2. Mengetahui deformasi yang terjadi pada terowongan akibat beban gempa.
3. Mengetahui gaya aksial dan momen pada *lining* terowongan yang disebabkan oleh beban gempa.
4. Mengetahui batas besar beban gempa maksimum yang diterima oleh struktur terowongan.
5. Mengetahui seberapa besar pengaruh penurunan permukaan tanah akibat beban gempa dan stabilitas pada konstruksi terowongan.

## 1.3 Landasan Teori

Konstruksi terowongan dapat melalui tanah ataupun batuan. Khususnya di sini akan dibahas terowongan melalui tanah. 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. Dalam mendesain *lining* terowongan, ada berbagai macam metode perhitungan untuk mengetahui stabilitas dan deformasi tanah akibat penggalian terowongan. Metode analisis stabilitas terowongan pada lapisan tanah lunak oleh Muir Wood (1975) memperhitungkan interaksi antara *lining* terowongan dengan tanah. Untuk terowongan yang relatif dangkal, harus diperiksa kemungkinan terjadinya gaya angkat (*flotation*) akibat tekanan air (Gambar 1).



Gambar 1. Model stabilitas muka terowongan (Muir Wood, 1975)

$$FS = \frac{R}{U} = \frac{\gamma' D \left( h_w + \frac{D}{8} - \frac{\pi D}{8} \right) + \gamma_b D (H - h_w) + 2S \left( H + \frac{D}{2} \right)}{\frac{\gamma_w \pi D^2}{4} - W} \geq 1,2 \dots \dots \dots (1)$$

dengan,

- $\gamma_w$  = berat jenis air (kN/m<sup>3</sup>)
- $W$  = berat terowongan (kN)
- $D$  = diameter luar *lining* (m)
- $\gamma'$  = berat jenis tanah terendam air (kN/m<sup>3</sup>)
- $\gamma_b$  = berat jenis tanah (kN/m<sup>3</sup>)
- $S$  = tahanan geser rata-rata disepanjang  $a - a'$  (kN/m<sup>2</sup>)
- =  $c_u$  untuk tanah kohesif
- =  $0,5.k_0.\gamma'(H + 0,5D)$  untuk tanah non kohesif

Metode analisis stabilitas dan deformasi Carranza-Torres (2013) dapat dilihat pada Gambar 2. Model ini mempertimbangkan kondisi kesetimbangan untuk keruntuhan material diatas terowongan berbentuk lingkaran atau bola. Material memiliki berat volume  $\gamma$  dan parameter geser tanah Mohr-

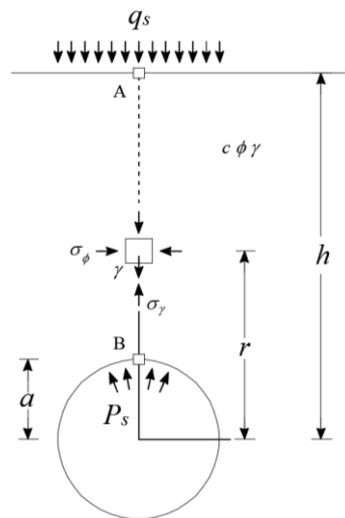
Coulomb, kohesi dan sudut gesek internal tanah,  $c$  dan  $\phi$ . Tekanan dukung  $P_s$  diberikan dari dalam terowongan, dimana beban  $q_s$  bekerja di permukaan tanah.

$$N_\phi^{FS} = N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{P_s}{\gamma h} = \left[ \frac{q_s}{\gamma h} + 2 \frac{c \sqrt{N_\phi}}{\gamma h (N_\phi - 1)} \right] \left( \frac{h}{a} \right)^{-k(N_\phi^{FS} - 1)} - \frac{1}{k(N_\phi^{FS} - 1) - 1} \left[ \left( \frac{h}{a} \right)^{-k(N_\phi^{FS} - 1)} - \left( \frac{h}{a} \right)^{-1} \right] - 2 \frac{c \sqrt{N_\phi}}{\gamma h (N_\phi - 1)} \dots \dots (3)$$

dengan,

- $q_s$  = beban di permukaan tanah (kN/m<sup>2</sup>)
- $\sigma_T = P_s$  = tekanan dukung muka terowongan (kN/m<sup>2</sup>)
- $c$  = kohesi (kN/m<sup>2</sup>)
- $h$  = kedalaman *crow*n terowongan (m)
- $a$  = jari-jari terowongan (m)
- $\gamma$  = berat volume basah (kN/m<sup>3</sup>)
- $k$  = faktor bentuk keruntuhan = 1



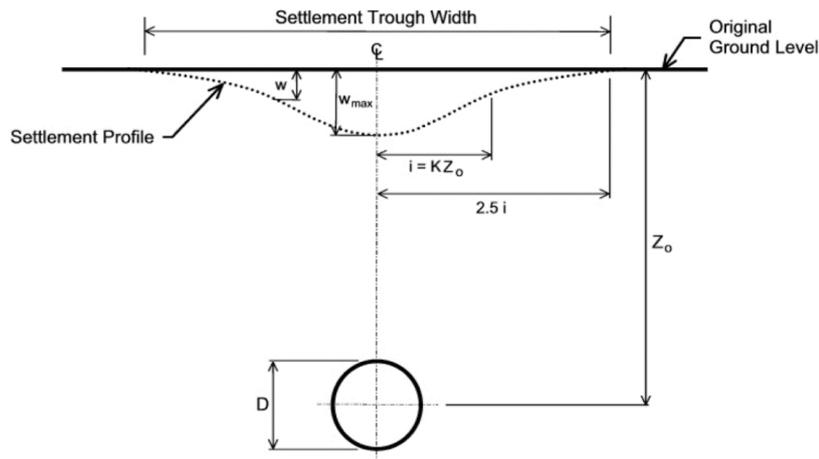
Gambar 2. Model stabilitas muka terowongan (Carranza-Torres, 2013)

Untuk sebuah terowongan tunggal dalam kondisi tanah lunak, biasanya volume penurunan tanah pada bagian permukaan tanah diasumsikan sama dengan volume galian terowongan. Bentuk dan besarnya penurunan terlihat pada Gambar 3 merupakan fungsi dari teknik penggalian terowongan, kedalaman dan diameter terowongan dan kondisi tanah. Bentuk kurva dan rumus matematik dapat diutarakan berikut (Schmidt, 1974).

$$w_{max} = \frac{V_L \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2}{2,5 i} \dots \dots \dots (4)$$

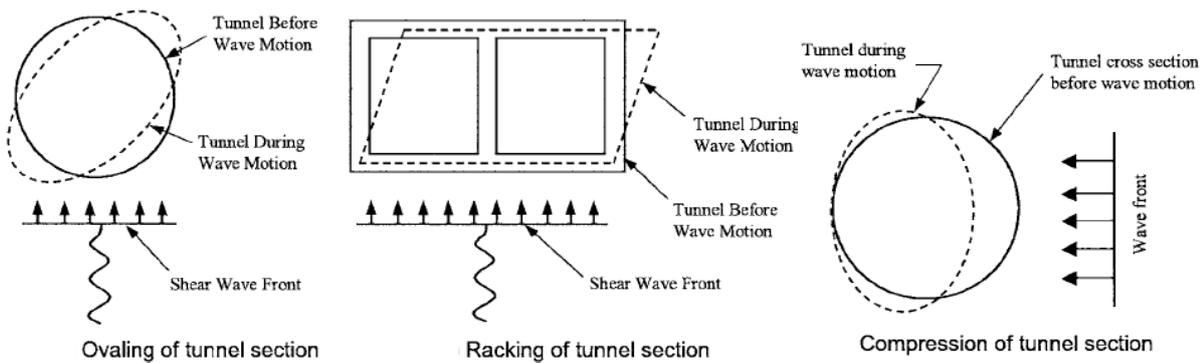
dimana,

- $w$  = penurunan,  $x$  adalah jarak dari terowongan atau *pipeline centerline*
- $i$  = jarak ke titik belok pada penurunan
- $K$  = parameter penurunan (fungsi dari tipe tanah)
- $Z_o$  = kedalaman dari dasar ke *tunnel springline*
- $V_L$  = volume kehilangan tanah selama penggalian
- $D$  = diameter terowongan



Gambar 3. Tipikal profil penurunan untuk terowongan di tanah lunak (Schmidt, 1974)

Efek gempa pada struktur bawah tanah dapat dikelompokkan menjadi dua kategori yaitu getaran tanah dan kegagalan tanah. Getaran tanah mengacu pada deformasi dari tanah yang dihasilkan oleh gelombang seismik yang merambat melalui kerak bumi. Faktor utama yang mempengaruhi getaran tanah yaitu bentuk tanah, dimensi dan kedalaman struktur, sifat dari tanah atau batuan sekitarnya, sifat dari struktur, dan berat dari tanah yang ditinjau (Zahrah, 1987). Pendekatan perilaku terowongan mengacu dengan model balok elastis untuk deformasi yang disebabkan oleh tanah disekitarnya. Tiga jenis deformasi respons seismik pada struktur bawah tanah yaitu kompresi dan ekstensi aksial, *longitudinal moment*, dan *ovaling*. Deformasi aksial pada terowongan yang dihasilkan dari gelombang seismik menghasilkan gerakan sejajar dengan sumbu terowongan dan menyebabkan kompresi dan tegangan. Untuk mode deformasi terowongan akibat gelombang seismik dapat dilihat pada Gambar 4. (Wang, 1993).



Gambar 4. Mode deformasi dari terowongan akibat gelombang seismik (Owen dan Scholl, 1981)

Efek yang diberikan beban gempa pada penampang melintang terowongan akan mengalami aksial lentur dan regangan geser. Berikut persamaan untuk regangan geser aksial maksimum yang diakibatkan oleh gelombang geser sebesar 45°.

$$\epsilon^a_{max} = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)A}{2 + \frac{E_t A_c}{K_a} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2} \leq \frac{fL}{4E_t A_c} \dots\dots\dots (5)$$

$$K_t = K_a = \frac{16\pi G_m (1 - \nu_m) d}{(3 - 4\nu_m) L} \dots\dots\dots (6)$$

dimana,

- $K_a$  = koefisien *longitudinal spring*
- $A$  = garis respons perpindahan gelombang geser *sinusoidal*
- $A_c$  = penampang melintang dari *lining* terowongan
- $E_l$  = modulus elastis dari *lining* terowongan
- $f$  = gaya gesek ultimit (tiap unit panjang) antara terowongan dan tanah

Gaya dan momen pada terowongan yang disebabkan oleh gelombang seismik bekerja pada sumbu terowongan. Gaya gesek maksimum antara dinding terowongan dengan tanah sekitar mengakibatkan regangan aksial pada dinding terowongan. Gaya gesek maksimum  $(Q_{max})_f$  dapat diasumsikan sebagai gaya gesek ultimit per seperempat satuan panjang gelombang (Sakurai dan Takahashi, 1969). Persamaan regangan lentur maksimum yang disebabkan oleh gelombang geser sebesar  $0^\circ$  sebagai berikut.

$$e^{\beta}_{max} = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 A}{1 + \frac{E_l I_c}{K_t} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4} r \dots\dots\dots (7)$$

dimana,

- $I_c$  = momen inersia terowongan
- $K_t$  = koefisien *transverse spring*
- $r$  = radius lingkaran terowongan atau setengah tinggi dari terowongan persegi panjang

Untuk persamaan gaya aksial, momen dan geser maksimum pada penampang melintang terowongan sebagai fungsi dari regangan lentur maksimum sebagai berikut.

$$N_{max} = \frac{2\pi \cdot E_l \cdot I_c \cdot e^{\beta}_{max}}{r \cdot L} \dots\dots\dots (8)$$

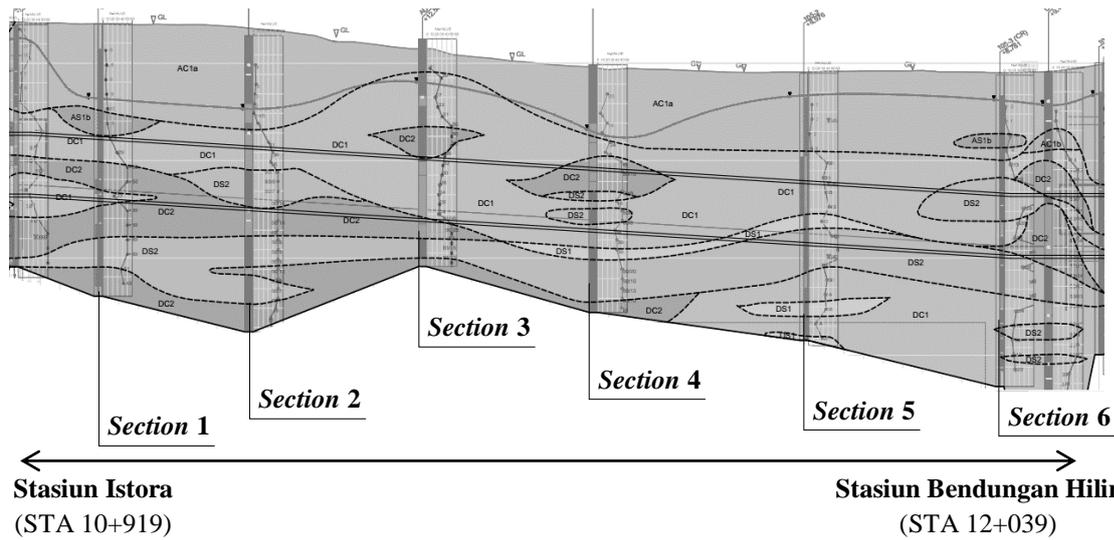
$$V_{max} = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^3 E_l I_c A}{1 + \frac{E_l I_c}{K_t} \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4} = \left(\frac{2\pi}{L}\right) M_{max} \dots\dots\dots (9)$$

$$= \left(\frac{2\pi}{L}\right) \left(\frac{E_l I_c e^{\beta}_{max}}{r}\right) \dots\dots\dots (10)$$

Lokasi penelitian konstruksi bawah tanah (*underground*) terletak pada ruas CP 105 yang ditinjau dari stasiun Istora (STA 10+919) sampai stasiun Bendungan Hilir (STA 12+039) di Jakarta. Pada penelitian ini data primer dan sekunder digunakan sebagai masukan dalam pemodelan analisis stabilitas dan deformasi terowongan pada proyek pembangunan terowongan MRT Jakarta. Data primer berupa data hasil penyelidikan tanah yang telah dilakukan sebelumnya serta hasil survey dan dokumentasi. Data sekunder dalam penelitian ini berupa olahan interpretasi lapisan tanah serta desain terowongan. Proses analisis dalam penelitian ini dengan pemodelan menggunakan *software* ABAQUS v.6.11 dan PLAXIS v.8.6.

## 2. Pembahasan

Dalam penelitian ini, lapisan tanah pada terowongan MRT Jakarta dari stasiun Istora sampai stasiun Bendungan Hilir dibagi menjadi 6 *section* yang tersaji pada Gambar 5. Pemilihan *section* tersebut berdasarkan pada lokasi pengujian *borelog*.



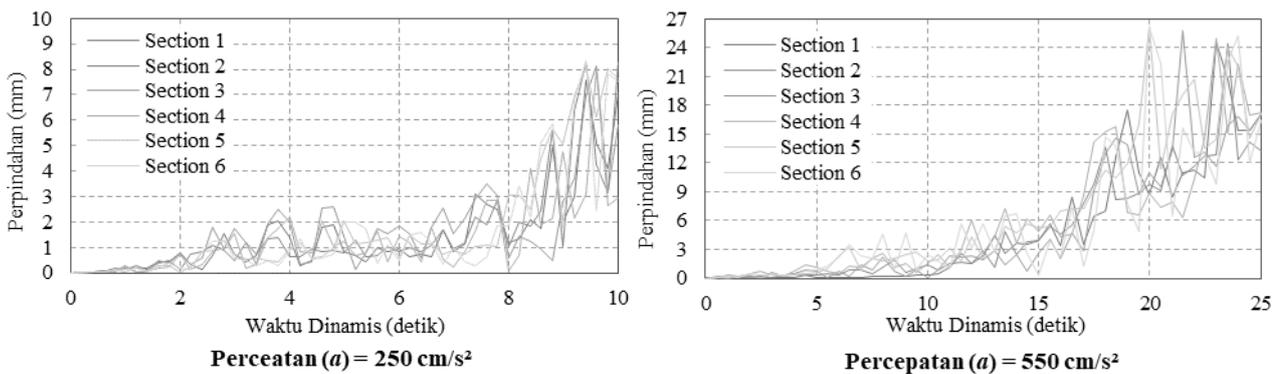
Gambar 5. Interpretasi lapisan tanah stasiun Istora sampai Bendungan Hilir ruas CP 105 (Jakarta MRT, 2015)

Untuk perhitungan numeris, beban gempa yang diberikan dalam format riwayat percepatan waktu. Dalam penelitian ini, variasi beban gempa yang diterapkan yaitu dimulai dari 250, 300, 350, 400, 450, 500 dan 550  $\text{cm/detik}^2$  yang didapat dari USGS. Pada Tabel 1 dijabarkan data parameter gempa yang akan digunakan dalam analisis.

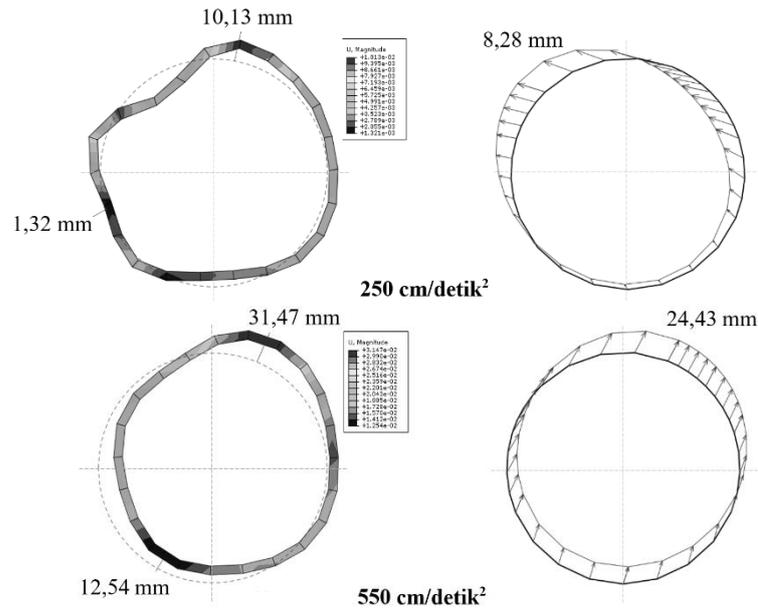
Tabel 1. Detail parameter beban gempa

Percepatan ( $\text{cm/detik}^2$ )	Sumber Gempa	Magnitude	Waktu Puncak (detik)
250	Kiholo Bay, Hawaii, 2007	6,7	8,183
300	Kiholo Bay, Hawaii, 2007	6,7	27,278
350	Kiholo Bay, Hawaii, 2007	6,7	25,066
400	El Savador, 2001	7,6	18,315
450	Kiholo Bay, Hawaii, 2007	6,7	17,926
500	Yountville, California, 2000	5	22,602
550	Kiholo Bay, Hawaii, 2007	6,7	21,625

Bentuk deformasi dari *lining* terowongan hasil analisis metode numeris dengan *software* PLAXIS dan ABAQUS dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7. Nilai deformasi *lining* terowongan yang ditampilkan merupakan nilai maksimum dari keseluruhan bentuk lingkaran.

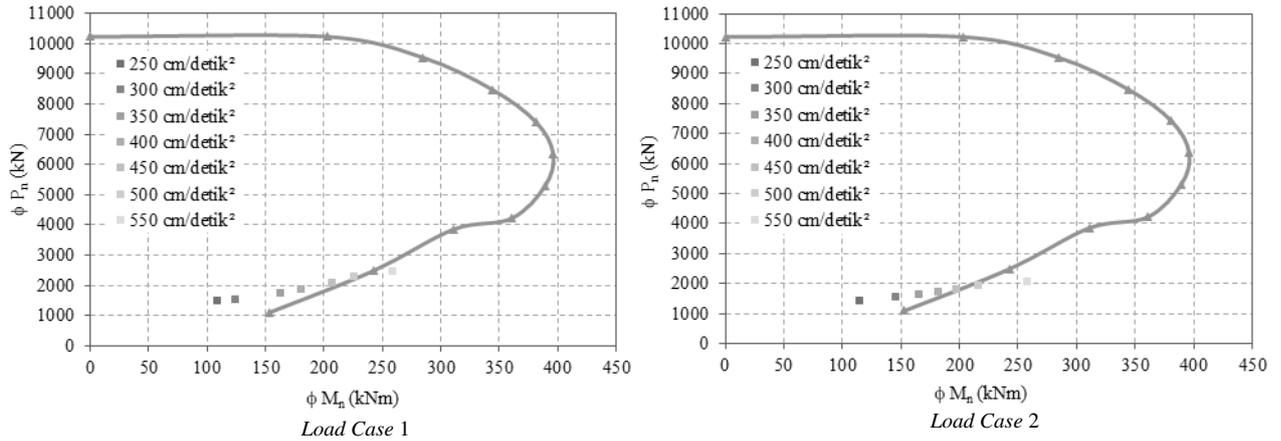


Gambar 6. Deformasi *lining* terowongan terhadap riwayat waktu

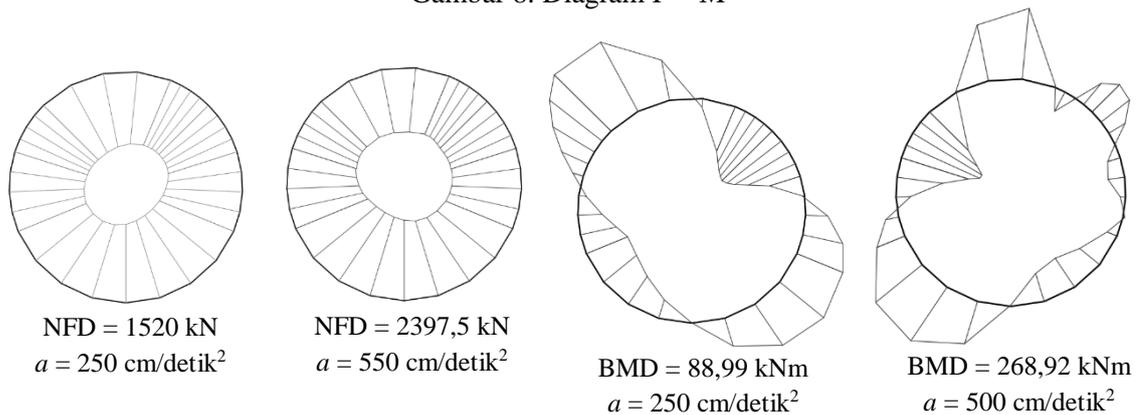


**Gambar 7.** Deformasi *lining* terowongan takibat beban gempa PGA *output* ABAQUS dan PLAXIS

Untuk mengetahui batas layan dari *lining*, hasil gaya aksial dan momen lentur analisis metode numeris dimasukkan ke dalam diagram P – M yang tersaji pada Gambar 8. Diagram gaya aksial dan momen lentur dari *lining* terowongan dapat dilihat pada Gambar 9. Nilai gaya aksial dan momen lentur *lining* terowongan yang ditampilkan merupakan nilai maksimum dari keseluruhan bentuk lingkaran.

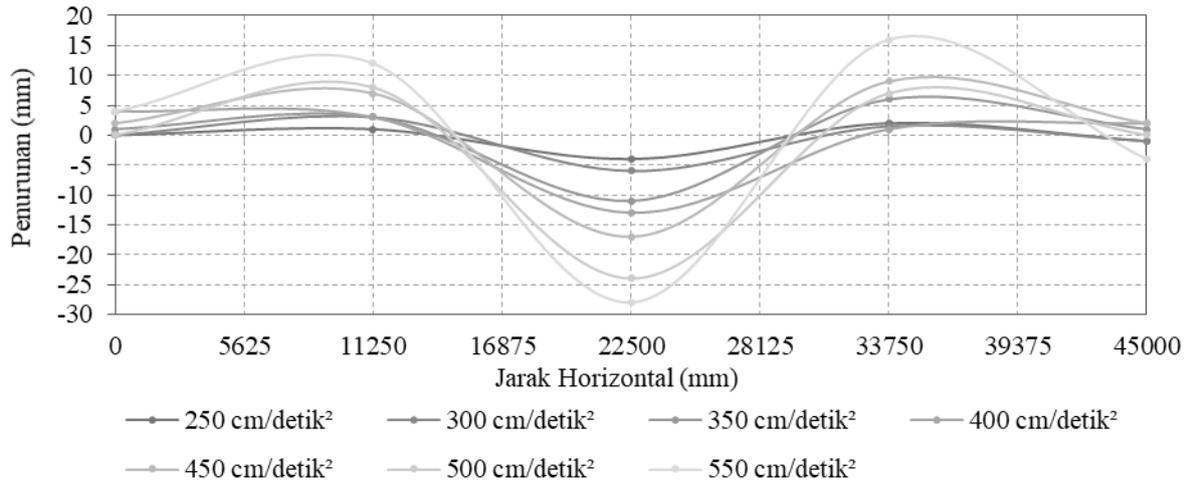


**Gambar 8.** Diagram P – M



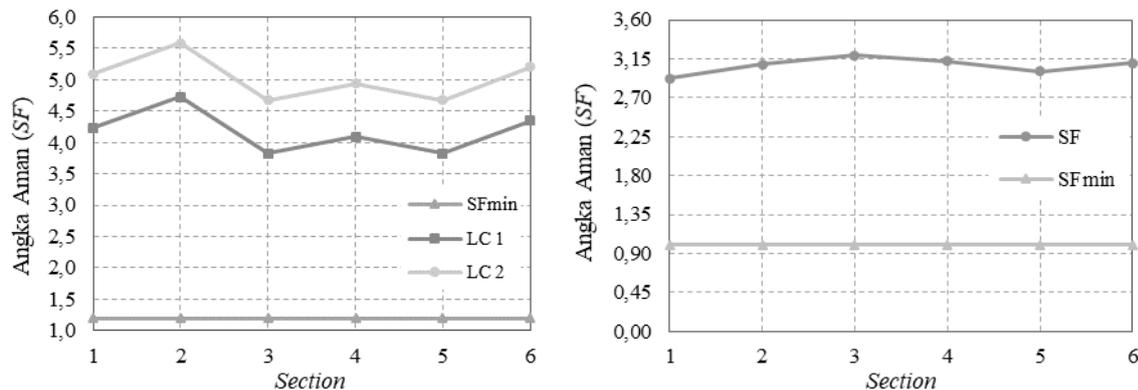
**Gambar 9.** Diagram gaya aksial dan momen lentur akibat beban gempa

Besar penurunan tanah di setiap *section* berbeda tergantung dari kedalam terowongan dari permukaan tanah. Hal lain yang menyebabkan penurunan permukaan tanah adalah tinggi permukaan air tanah. Diagram penurunan permukaan tanah di atas terowongan dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Penurunan permukaan tanah

Stabilitas dari terowongan dihitung menggunakan metode Muir Wood (1975) dan Carranza-Torres (2013). Analisis dilakukan pada 6 *section* yang terbentang antara stasiun Istora (STA 10+919) sampai stasiun Bendungan Hilir (STA 12+039). Untuk grafik angka aman dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Perbandingan nilai stabilitas terowongan metode Muir Wood (1975) dan Carranza-Torres (2013)

### 3. Simpulan

Berdasarkan hasil analisis deformasi dan kekuatan *lining* serta penurunan permukaan tanah pada terowongan MRT Jakarta dari Stasiun Istora sampai Stasiun Bendungan Hilir pada ruas CP 105 akibat variasi beban gempa, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Output* pada *software* ABAQUS memiliki hasil yang lebih besar dibandingkan dengan *software* PLAXIS. Hal tersebut terjadi karena penyusunan jaring elemen (*meshing*) pada *software* ABAQUS lebih halus dibandingkan dengan *software* PLAXIS.
- Peningkatan nilai PGA menyebabkan kenaikan nilai deformasi pada *lining* terowongan. Untuk analisis deformasi *lining* metode empiris kenaikan rata-rata yang terjadi sebesar 2,57 mm (17,41 %) untuk *Load Case* 1 dan 2,58 mm (17,25 %) untuk *Load Case* 2. Sedangkan untuk analisis deformasi *lining* metode numeris *software* PLAXIS kenaikan rata-rata yang terjadi sebesar 2,87

- mm (18,65 %) untuk *Load Case* 1 dan 2,88 mm (17,24 %) untuk *Load Case* 2. Untuk *software* ABAQUS kenaikan rata-rata yang terjadi sebesar 3,52 mm (17,74 %) untuk *Load Case* 1 dan 3,76 mm (17,76 %) untuk *Load Case* 2.
- c. 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* 1 dan 283,11 kN (12,09 %) untuk *Load Case* 2. Kenaikan rata-rata momen lentur metode empiris yang terjadi sebesar 20,03 kNm (12,08 %) untuk *Load Case* 1 dan 19,75 kNm (11,42 %) untuk *Load Case* 2. Sedangkan untuk analisis gaya aksial pada *lining* metode numeris kenaikan rata-rata yang terjadi sebesar 134,28 kN (6,28 %) untuk *Load Case* 1 dan 132,06 kN (6,55 %) untuk *Load Case* 2. Kenaikan rata-rata momen lentur metode numeris yang terjadi sebesar 26,8 kNm (15,38 %) untuk *Load Case* 1 dan 25,21 kNm (35,37 %) untuk *Load Case* 2.
  - d. 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* 1 dan 3,42 mm (28,11 %) untuk *Load Case* 2. Untuk *software* ABAQUS kenaikan rata-rata yang terjadi sebesar 4,43 mm (24,40 %) untuk *Load Case* 1 dan 4,63 mm (24,48 %) untuk *Load Case* 2. Secara umum penurunan permukaan tanah dapat dikatakan aman karena masih dalam batas pemurunan maksimum sebesar 127 mm
  - e. Nilai angka aman rata-rata dari stabilitas terowongan analisis metode Muir Wood (1975) sebesar 4,17 (11 %) untuk *Load Case* 1 dan 5,03 (10 %) untuk *Load Case* 2. Untuk metode Carranza-Torres (2013) nilai rata-rata angka aman sebesar 3,07. Dengan nilai angka aman sebesar 3,07, nilai tekanan kritis rata-rata terowongan sebesar 128,15 kN/m<sup>2</sup> untuk *Load Case* 1 dan 103,24 kN/m<sup>2</sup> untuk *Load Case* 2. Secara keseluruhan struktur terowongan dapat dikatakan stabil.
  - f. Dari seluruh hasil yang didapatkan, disimpulkan bahwa kekuatan batas struktur terowongan yang dapat diterima akibat beban gempa yaitu pada PGA 550 cm/detik<sup>2</sup>. Semakin dalam air tanah dari permukaan tanah, semakin besar dampak yang dihasilkan terhadap struktur terowongan tersebut.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada yang telah membantu penerbitan makalah ini, khususnya kepada dewan pembimbing Teuku Faisal Fathani, S.T., M.T., Ph.D. dan Prof. Ir. Iman Satyarno, M.E., Ph.D.

#### Daftar Pustaka

- [1]. U.S. Geological Survey, 2012. *Earthquake Hazard Program*, USGS Website
- [2]. Muir-Wood, A.M., 1975. *The Circular Tunnel in Elastic Ground*, *Geotechnique*, Vol. 25, No. 1, pp. 115-127.
- [3]. Carranza-Torres, C.Reich, T.Safter D., 2013. Stability of shallow circular tunnels in soils using analytical and numerical models. In: *Procrrdings of the 61st Minnesota Annual Geotechnical Engineering Conference*. St. Paul Campus: University of Minnesota.
- [4]. Schmidt, B., 1974. Exploration for Soft Ground Tunnels – A New Approach, *Subsurface Exploration and Heavy Construction*. New England Collage, Henniker, New Hampshire, American Society of Civil Engineers, New York.
- [5]. Zahrah, T. F., 1987. A Seismic Design of Underground Structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 2, No. 2, 165-197.
- [6]. Wang, J. N., 1993. Seismic Design of Tunnels. *Quade and Douglas Inc*. New York
- [7]. Owen dan Scholl, 1981. *Earthquake Engineering of Large Underground Structure*. Report No. FHWA/RD-80/195. Federal Highway Administration and Nation Science Foundation.
- [8]. Sakurai, A., Takahashi, T., 1969. *Dynamic Stresses of Underground Pipeline during Earthquakes*. Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering, Japan.
- [9]. MRT Jakarta, 2015. *Basic Engineering Design*. Jakarta: Jakarta Metro Engineering Consultant.