

## ANALISIS DEFORMASI DAN RETAKAN STRUKTUR TEROWONGAN DENGAN PEMODELAN *PSEUDOSHELL*

Nirwal Mahdi Abdullah<sup>1</sup>, Muttaqin<sup>2</sup>, Husaini<sup>3</sup>

<sup>1</sup>) Mahasiswa Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala,  
email : nirwalmahdi@gmail.com

<sup>2</sup>) Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala,  
email: muttaqin@unsyiah.ac.id

<sup>3</sup>) Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala,  
email: husainiftm@unsyiah.ac.id

**Abstract:** *The increasing development of infrastructure such as building tunnels in support of improved transport system that takes some analysis of the behavior of the tunnel in preventing damage. The object of research is the shotcrete lining tunnel Sieberg, Austria developed using construction methods New Austrian Tunnel Method (NATM). This study aims to determine the behavior that causes damage such as cracks and displacement by performing two analyzes are analyzed using a pseudoshell model developed by Shi (2009) with a thickness of pseudoshell is 0.06 m. Some of the data used was taken from a previous study conducted by Lackner and Mang (2003) which is also located in the tunnel Sieberg, Austria. Data collected in the form of secondary data will be analyzed using the software ATENA V5. The results obtained are in pseudoshell modeling, for a distributed load partial left side of the tunnel, the amount of deformation modeling pseudoshell thickness 0.06 m is 42,75 mm.*

**Keywords :** *Tunnels, NATM method, PseudoShell Model, Dummy Load, ATENA V5, Cracked, Displacement.*

**Abstrak:** Meningkatnya pembangunan infrastruktur seperti bangunan terowongan dalam mendukung sistem transportasi yang meningkat sehingga diperlukan beberapa analisa terhadap perilaku terowongan dalam mencegah terjadinya kerusakan. Objek penelitian adalah lapisan *shotcrete* terowongan Sieberg, Austria yang dikembangkan dengan menggunakan metode konstruksi *New Austrian Tunnel Methode* (NATM). Penelitian ini bertujuan mengetahui perilaku yang menyebabkan kerusakan seperti retakan dan *displacement* dengan melakukan analisis yaitu menggunakan model *Pseudoshell* yang dikembangkan oleh shi (2009) dengan ketebalan *pseudoshell* sebesar 0,06 m. Beberapa data yang digunakan diambil dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Lackner dan Mang (2003) yang juga berlokasi di terowongan Sieberg, Austria. Data yang dikumpulkan berupa data sekunder yang akan dianalisa menggunakan perangkat lunak ATENA V5. Hasil yang diperoleh adalah pada pemodelan *pseudoshell*, untuk beban merata sebagian sisi kiri terowongan, besaran deformasi dengan pemodelan *pseudoshell* dengan tebal 0,06 m adalah 42,75 mm.

**Kata kunci :** Terowongan, Metode NATM, Pemodelan Pseudoshell, Beban Dummy,, ATENA V5, Retak, Displacement.

Dengan meningkatnya pembangunan infrastruktur seperti bangunan terowongan dalam mendukung sistem transportasi yang semakin meningkat sehingga diperlukan beberapa analisa terhadap perilaku terowongan dalam mencegah terjadinya kerusakan. Salah satu penerapan metode yang

dikembangkan dalam tahap konstruksi terowongan adalah proses penggalian menggunakan metode *New Austrian Tunnel Methode* (NATM) yang mana teknik ini dilakukan dengan cara menembakkan campuran beton khusus berupa beton tembak (*shotcrete*) ke dinding terowongan sehingga

membentuk seperti cangkang.

Salah satu perilaku terowongan yang perlu diperhatikan dalam struktur terowongan seperti pada model terowongan NATM adalah terjadinya retakan pada cangkang terowongan. Analisa mengenai retakan yang terjadi pada terowongan ini pernah dilakukan oleh Lackner dan Mang (2003) menggunakan metode hybrid dimana dilakukan metode pendekatan dengan menggabungkan pengukuran secara in-situ dan hukum unsur material pada beton yang bertujuan meneliti bagaimana perilaku lapisan *shotcrete* selama 50 hari setelah konstruksi selesai.

Salah satu metode lain yang dapat digunakan untuk menentukan besaran pengaruh retakan dan *displacement* yang terjadi adalah pemodelan *pseudoshell* yang dikembangkan oleh Shi (2009).

Penelitian ini berfokus pada struktur terowongan Sieberg dengan data-data yang digunakan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Lackner dan Mang (2003).

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui deformasi dan retakan pada struktur terowongan akibat beban statis dengan menggunakan pemodelan *Pseudoshell* yang dikembangkan oleh Shi (2009). Digunakan pemodelan pembebanan dengan ketebalan *pseudoshell* terhadap ketebalan *shotcrete* sebesar 0,06 m yaitu pembebanan merata sebagian pada sisi kiri terowongan. Semua pemodelan menggunakan perangkat lunak ATENA v5 sebagai analisa bangunan non linier dengan metode elemen hingga.

## Terowongan Sieberg

Terowongan adalah struktur bawah tanah yang mempunyai panjang lebih dari lebar penampang galiannya, dan mempunyai gradien memanjang kurang dari 15%. Terowongan Sieberg, Australia. Terowongan ini termasuk *High Speed Railway Tunnel* karena digunakan untuk transportasi kereta api berkecepatan tinggi. Panjang terowongan Sieberg adalah 6480 m (6.48 km).

## Teknologi Beton Semprot (*shotcrete*)

Beton semprot adalah istilah tunggal yang menggambarkan berbagai komponen dari teknologi yang lengkap yaitu:

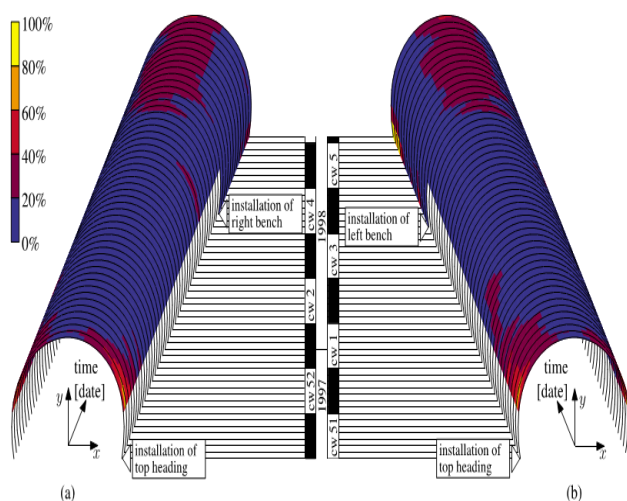
- Bahan beton yang disemprotkan.
- Proses pengecoran yang disemprotkan.
- Sistem beton semprotkan.

Menurut Wiweko (2013), berdasarkan pengamatan di lapangan, suatu lapisan "*shotcrete*" setebal 15 cm yang dipakai pada terowongan berdiameter 10 m dapat dengan aman menahan beban sampai 45 ton/m<sup>2</sup> sedang apabila dipakai baja tipe WF-200 yang dipasang pada jarak 1 m hanya mampu menahan 65% dari kekuatan "*shotcrete*" tersebut.

## Penelitian Retakan Lackner dan Mang (2003)

Metode *hybrid* yang digunakan oleh Lackner dan Mang (2003) telah dikembangkan sebelumnya oleh Zachow (1997) yaitu dengan menggabungkan antara pengukuran yang dilakukan langsung di lapangan saat pengerjaan dengan sifat-sifat material beton didalam beton tembak

(*shotcrete*). Analisa yang digunakan berada pada potongan melintang MCS 1452 (km 156.990). Hasil dari penelitian tersebut yaitu jumlah retakan yang berhubungan dengan tingkatan pembebanan yang terjadi selama 50 hari sejak awal konstruksi selesai. Pengaruh tingkatan pembebanan dapat dilihat pada Gambar 1.



**Gambar 1** Tingkatan Pembebanan Terowongan  
Sumber : Lackner dan Mang (2003)

### Perilaku Retakan Pada Terowongan

Menurut Chen dan Mo (2008), bahwa dalam menganalisa permasalahan terhadap retakan pada terowongan dilakukan pada dua kondisi yaitu kondisi tahap konstruksi dan tahap pelayanan. Pada tahap pelayanan yaitu gaya eksternal yang bekerja pada terowongan selanjutnya akan dianalisa untuk mendapatkan distribusi retak. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah dengan memodelkan retakan yang disebabkan oleh perilaku material non linier (Shi, 2009). Contoh retakan yang terjadi pada terowongan dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Contoh Retakan di Terowongan  
Sumber : Shi (2009)

### Konsep Terowongan *Shotcrete*

Menurut Hellmich (2001), suatu struktur terowongan yang menerapkan metode NATM merupakan suatu bentuk struktur yang rumit. Konsep sederhana untuk menganalisa terowongan *shotcrete* pernah dilakukan dengan menggunakan beberapa hipotesis/dugaan seperti berdasarkan Lackner dan Mang (2003) yaitu :

1. Perubahan lengkungan pada arah longitudinal diabaikan
2. Selama deformasi, ketebalan cangkang terowongan diasumsikan mendekati konstan.
3. Diasumsikan tulangan sempurna antara *shotcrete* cangkang terowongan dan batuan sekitar cangkang terowongan.
4. Diasumsikan tidak ada transfer tegangan antara ujung dari bagian atas terowongan dengan dengan batuan yang berdekatan dengan *shotcrete*.



**Gambar 3. Pemodelan elemen hingga shotcrete pada terowongan**  
Sumber: Hellmich (2001)

### Pemodelan Pseudoshell

Pemodelan *pseudoshell* dikembangkan oleh Shi (2009) digunakan khususnya untuk menilai deformasi yang terjadi pada terowongan. Konsep pemodelan ini adalah teori balok dimana saat elemen balok pada arah yang berubah-ubah sehingga untuk mencari lendutan menggunakan persamaan 1.

$$\frac{d^2}{dx^2} \left( EI \frac{d^2 v}{dx^2} \right) = q_z \quad (1)$$

Keterangan :

- EI = Kuat lentur beton (mm);
- $d^2 v$  = Perpindahan pada arah z (rad/mm);
- $d^2 x$  = Panjang bentang (mm);
- $Q_z$  = Distribusi beban arah x;

### Pemodelan Elemen Hingga pada ATENA

Pemodelan elemen hingga merupakan salah satu studi dalam mempelajari bagaimana perilaku suatu struktur yang rumit dengan menggunakan perhitungan secara komputasi (Schut, 2013). Material pada ATENA yang dapat digunakan adalah

- SBeta Material : Model ini dapat digunakan untuk menganalisa dan menjelaskan retak beton, kerusakan dan perilaku pada kondisi plastis betone of plastic (Scuht, 2013). Hubungan persamaan *plane stress* digunakan dalam material ini.
- *Reinforcement* : ada dua tipe *reinforcement* yang digunakan dalam pemodelan ATENA ini yaitu tipe *reinforcement discrete* and *smeared*.

### METODE PENELITIAN

#### Geometri Terowongan Sieberg

Pada pemodelan ini digunakan data yang berdasarkan penelitian dari Lackner dan Mang (2003). Untuk sifat karakteristik terowongan dapat dilihat pada Tabel 1 dan 2

**Tabel 1. Geometri Terowongan**

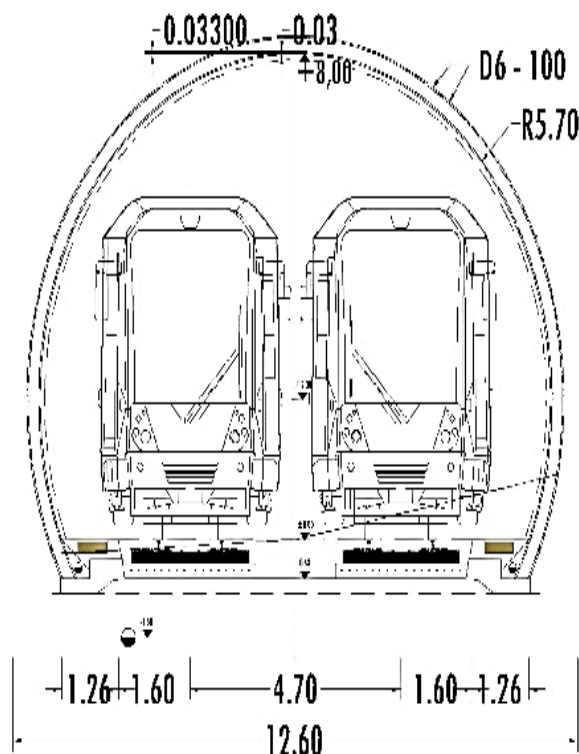
Ketinggian terowongan	8 m
Lebar terowongan	10 m
Tebal selimut <i>shotcrete</i>	30 mm
Diameter tulangan	6 mm
Spasi antar tulangan	100 mm
Tinggi efektif beton	82,5 mm

**Tabel 2. Material Shotcrete Terowongan**

Modulus Young	40800 MPa
Poisson ratio	0,2
Kuat tekan beton	39,6 MPa
Kuat tarik tulangan	0,44 Mpa

Perangkat lunak yang digunakan adalah ATENA Versi 5 dengan nomor lisensi No.250-2016 WR 556 khusus menganalisa perilaku struktur terhadap beban statis untuk model 2D dan 3 D dan Autocad 2010 untuk menggambar geometri terowongan serta mendapatkan titik-titik koordinat terowongan sebagai input pada perangkat lunak ATENA. Untuk geometri terowongan dapat dilihat pada Gambar 4. Proses analisa sendiri akan

digunakan perangkat laptop ASUS A43S dengan spesifikasi OS *Windows 7* dengan RAM sebesar 4GB dan perangkat PC Compaq dengan spesifikasi OS *Windows 7* dengan RAM sebesar 4GB.



Gambar 4. Potongan Melintang Terowongan Sieberg (m)

### Pemodelan Struktur

#### Analisa Perilaku Dengan Pemodelan *Pseudoshell*

Pemodelan elemen hingga ini dilakukan dengan model 2D pada material komposit terowongan yaitu beton dan tulangan baja. Untuk pemodelan, digunakan pembebanan merata 0,1 MN/m sepanjang 5 m hanya pada sisi sebelah kiri terowongan dengan lapisan *pseudoshell* setebal 0,06 m dari tebal *shotcrete*.

Asumsi lebar retakan yang dijadikan sebagai acuan awal ( $w_{tip}$ ) adalah sebesar 1 mm.

Pembebanan yang dilakukan dimulai dengan 0,1 kN/m dimana iterasi yang dilakukan menggunakan metode *Newton-Rhapson* dengan load step awal sebanyak 30 load step dengan jumlah iterasi sebanyak 20 iterasi.

Dalam penerapan pada ATENA V5, material-material yang diinput untuk analisa terowongan ini adalah material beton: untuk material beton akan digunakan elemen *SB Material* dengan input :

1. Modulus elastisitas (E) sebesar 40,8 GPa
2. Kuat tekan *shotcrete* sebesar 39,6 MPa,
3. Kuat tarik *shotcrete* sebesar 3,96 Mpa
4. Poisson ratio sebesar 0.2
5. Energi fraktur 0,065 N mm/mm<sup>2</sup>

Untuk nilai material-material yang lain akan mengikuti pengaturan awal elemen *SB Material* yang ada di ATENA V5.

- **Material baja** : Untuk material baja sebagai lapisan *pseudoshell* akan digunakan elemen *plastic stress isoplastic* dengan asumsi input :

- Modulus elastisitas (E) = 200000 Mpa
- Poisson ratio 0,2

- Model pembebanan

- Pemodelan beban merata adalah sebesar 0,1 kN/m sepanjang 5,8 m sisi kiri terowongan

Metode Iterasi yang digunakan adalah *Newton-Rhapson method* dengan jumlah iterasi sebanyak 20 kali.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Pemodelan *Pseudoshell*

Pada pemodelan dengan *pseudoshell*, dilakukan dengan ketebalan 0,06 m. Untuk

koordinat *monitoring point* dapat dilihat pada Tabel 3.

**Tabel 3. Monitoring Point Pembebanan Merata Sisi Kiri Terowongan**

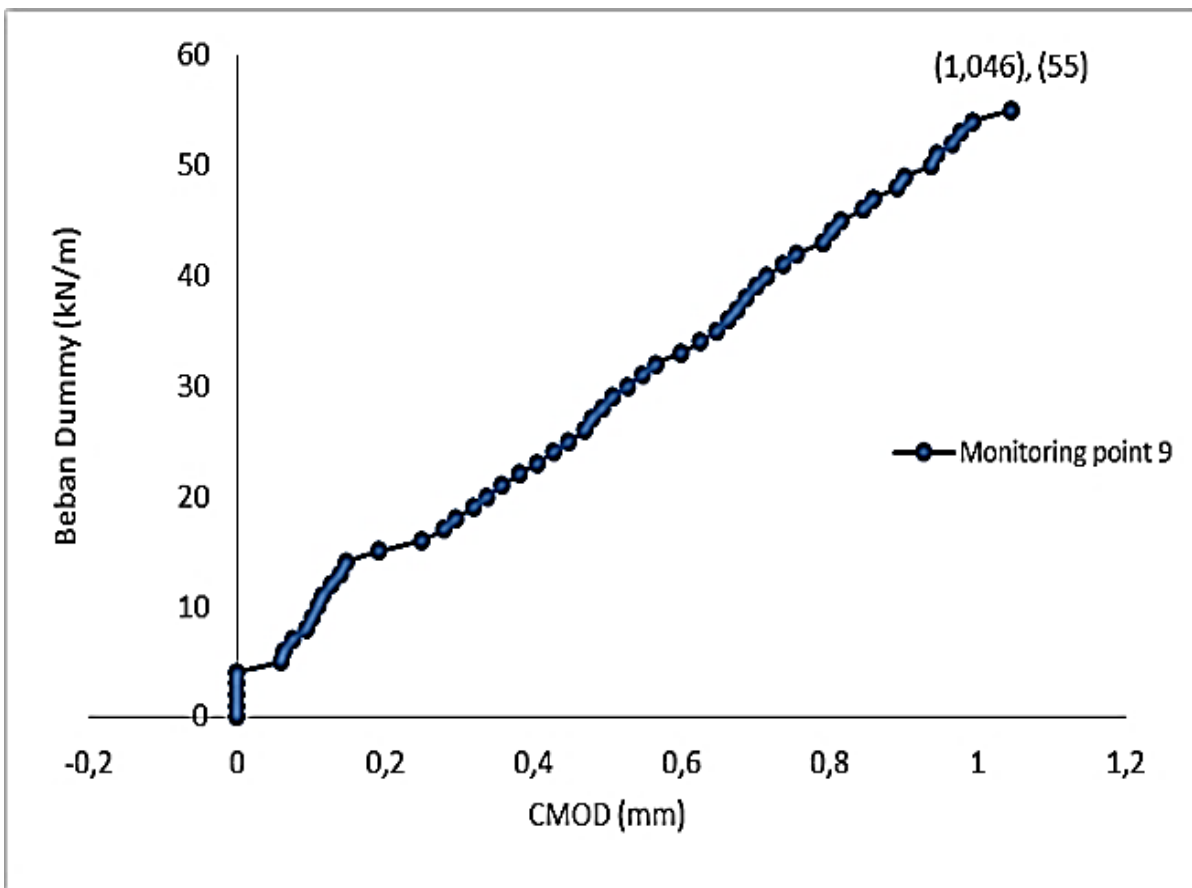
Nama titik	Lokasi koordinat	Tipe titik pantau
Monitoring point 9	x= -51.315 m; y=17.8 m	Lebar Retakan
Monitoring point x	x=-51.261 m; y=13.3 m	Lebar Retakan
Displacement kiri	x=-51.22 m; y=18.61 m	Displacement

**Pemodelan Pseudoshell Ketebalan 0,06 m Kondisi Beban Merata Pada Sisi Kiri**

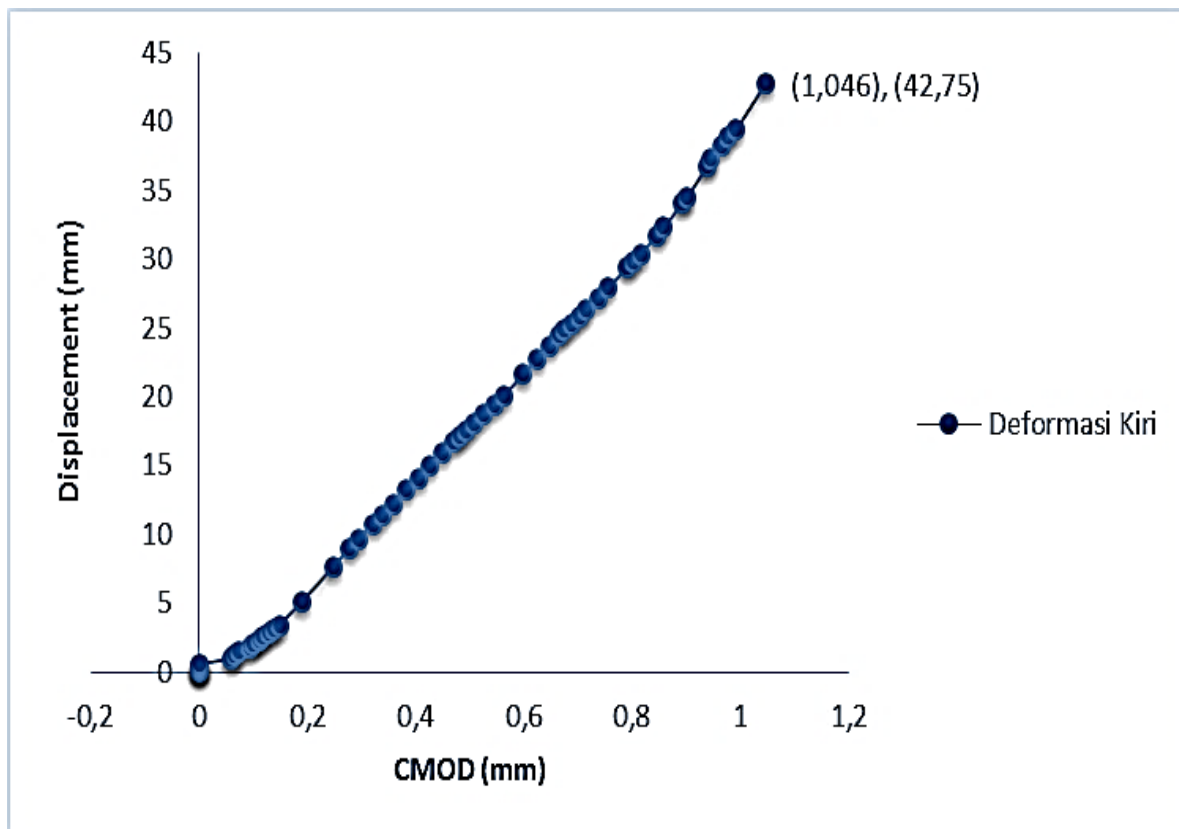
Hasil hubungan displacement dan dummy load terhadap lebar retakan yang diasumsikan pemodelan pseudoshell dapat

dilihat pada Gambar 5 dan 6. Pada pemodelan dengan kondisi tebal pseudoshell sebesar 0,06 m. Untuk data koordinat dapat dilihat pada Tabel 3.

Jumlah *load step* yang digunakan semula direncanakan sebanyak 30 dengan jumlah iterasi sebesar 20 kali. Setelah dianalisa, jumlah 30 *load step* belum mencapai lebar retak maksimum yang diasumsikan di awal, sehingga jumlah *load step* selanjutnya ditambah sampai mencapai lebar retak 1 mm. Besarnya beban *dummy* dan *displacement* pada saat CMOD 1mm berturut-turut adalah 55 kN/m dan 42,75 mm.



**Gambar 5. Grafik Hubungan Beban Dummy vs Lebar Bukaannya Retak (CMOD). Tebal Pseudoshell 0,06 m Dengan Beban Merata Sisi Kiri Terowongan**



Gambar 6. Grafik Hubungan *Displacement* vs Lebar Bukaannya Retak (CMOD). Tebal *Pseudoshell* 0,06 m Dengan Beban Merata Sisi Kiri Terowongan

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan *pseudoshell* dapat menjelaskan *displacement* dan lebar bukaan retak yang terjadi akibat peningkatan beban statis dengan menetapkan lebar retak maksimum rencana.
2. Pada pemberian beban terbagi rata di sebelah kiri terowongan, akibat peningkatan beban menyebabkan *displacement* dan lebar bukaan retak juga meningkat.

### Saran

Penelitian ini hanya sebatas pemodelan tanpa dilakukan pengujian langsung sehingga diharapkan dapat dilakukan penelitian lebih lanjut seperti membuat benda uji atau pengukuran langsung menggunakan alat pada lokasi penelitian.

Melakukan penelitian lebih lanjut pada lokasi potongan melintang yang berbeda sehingga nanti dapat dibandingkan hasil berupa perilaku terowongan.

## DAFTAR KEPUSTAKAAN

- Chen, J.S. & Mo, H. H., 2008, Numerical study on crack problems in segments of shield tunnel using finite element method, *Tunnelling and Underground Space Technology* Volume 24, Issue 1, January 2009, Pages 91–102
- Hellmich, C. 2001. *Hybrid method for quantification*, *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 25 (3), h. 321-324.
- Lackner, R. & H.A. Mang, 2003, Cracking in shotcrete tunnel shells, *Engineering Fracture Mechanics* 70 (2003) 1047–1068.
- Schut, J.F.N., 2013, *Punching Shear of Slabs on Top of Ribbed Foundation Piles*, Tesis di Delft University: Tidak diterbitkan.
- Shi, Z., 2009, *Crack Analysis in Structural Concrete*, Butterworth-Heinemann, United Kingdom.
- Wiweko, Agung. 13 April 2016. <http://www.pusdiklat-minerba.esdm.go.id/index.php/kerjasama/item/335-pembuatan-terowongan-tunneling>.