

Dampak Model Tanah Pada Analisis Metode Elemen Hingga 2 Dimensi Terowongan NATM : Studi Kasus Terowongan Manikin

Muhammad Hanif¹, Aswin Lim^{*2}, Martin Wijaya³, Simon Heru Prasetyo⁴

^{1,2,3} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan

Jl. Ciumbuleuit No.94, Hegarmanah, Cidadak, Bandung

⁴ Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan,
Institut Teknologi Bandung

Submitted : 31, Agustus, 2023;

Accepted: 30, Oktober, 2023

Abstrak

Konstruksi terowongan melalui tanah lempung sensitif terhadap air dapat menyebabkan deformasi berlebihan pada dinding terowongan. Untuk dapat memprediksi deformasi yang terjadi pada terowongan melalui tanah lempung ekspansif, model konstitutif tanah yang sesuai dibutuhkan agar pemodelan memberikan hasil analisis yang memuaskan. Makalah ini berisi mengenai fenomena *swelling* tanah pada Terowongan Manikin di Kupang. Analisis deformasi terowongan menggunakan metode elemen hingga 2D dengan bantuan program Plaxis2D dilakukan untuk memberi prediksi terhadap deformasi yang terjadi pada terowongan Manikin. Analisis dilakukan menggunakan dua model konstitutif tanah, model keruntuhan *Mohr-Coulomb* dan *Hardening Soil*. Penggunaan kedua model tersebut dilakukan untuk mengetahui dampak serta pengaruh dari kedua model konstitutif tanah terhadap nilai deformasi pada terowongan melalui tanah ekspansif. Untuk dapat memodelkan fenomena *swelling* pada tanah, dikerahkan beban tambahan pada dinding terowongan yang berperan sebagai tekanan *swelling pressure*. Dengan metode ini, analisis menggunakan simulasi numerik dapat menyerupai deformasi dari hasil pengawasan di lapangan. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa desain sistem penyangga asli menggunakan model MC dan HS memberikan deformasi sebesar 921,5 mm (11,8%) dan 900 mm (11,5%). Dua alternatif sistem penyangga awal diusulkan, menggunakan *steel ribs* dengan profil lebih besar dan *Umbrella Arch Method* (UAM). Kedua alternatif secara signifikan memberikan hasil deformasi yang lebih kecil dari desain awal. *Steel ribs* yang lebih besar memberikan deformasi terkecil menggunakan model MC sebesar 412 mm (5,2%), sedangkan UAM memberikan deformasi terkecil pada model HS dengan deformasi sebesar 247 mm (3,1%).

Kata Kunci : *hardening soil*; lempung ekspansif; *Mohr-Coulomb*; NATM; Plaxis2D

Abstract

Tunnel construction through water-sensitive clay can cause excessive deformation of the tunnel lining. To be able to predict deformation that occur in tunnels through expansive

clay soil, an appropriate constitutive soil model is needed in soil analysis to give satisfactory analytical results. This paper describes swelling soil phenomenon in the Manikin Tunnel in Kupang. Tunnel deformation analysis using 2 dimension finite element method with Plaxis2D program was carried out to provide prediction of deformation that occurs in the Manikin tunnel. 2 constitutive soil model was used in the tunnel analysis, the Mohr-Coulomb and Hardening Soil. These two soil models was used in analysis to determine the impact and influence of both soil model on deformation values in tunnel through expansive clay soil. To be able to model the phenomenon of swelling of the soil, an additional load is deployed on the tunnel wall which acts as swelling pressure. With this method, the analysis using numerical simulation can resemble the deformation from the results of field monitoring. The numerical simulation results show that the original support system design using the MC and HS models gives a deformation of 921,5 mm (11,8%) and 900 mm (11,5%). Two alternative initial support systems were proposed, using larger steel profiles for the steel ribs and the Umbrella Arch Method. Both alternatives give significantly smaller deformation results than the initial design. Bigger steel ribs gave the smallest deformation using the MC model of 412 mm (5,2%), while the UAM gave the smallest deformation on the HS model with a deformation of 247 mm (3,1%)

Keywords : *hardening soil; expansive clay; mohr-coulomb; NATM; Plaxis2D*

A. PENDAHULUAN

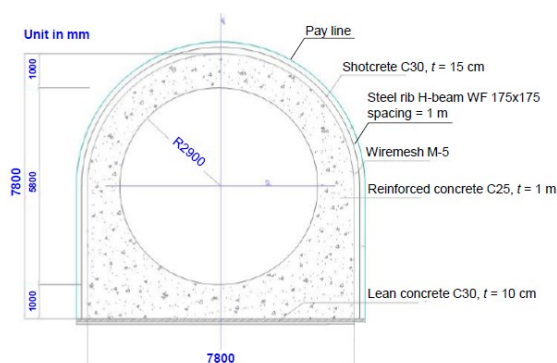
Tanah ekspansif pada konstruksi terowongan melalui tanah lempung lunak dapat menjadi sebuah kesulitan tersendiri bagi perancang dan pelaksana pekerjaan konstruksi. Tanah lempung ekspansif berperilaku sensitif terhadap air, dimana tanah ini dapat berkurang kekuatannya dan bertambah volume ketika berinteraksi dengan air. Hal ini bisa menjadi sebuah permasalahan apabila pertambahan volume ini menyebabkan pergerakan dan tegangan berlebih pada lining terowongan. Deformasi berlebih ini dapat menyebabkan kegagalan struktur penyangga terowongan, seperti keretakan pada dinding *shotcrete*, kerusakan pada dinding terowongan, pengembangan dari lantai terowongan, dan deformasi pada *steel ribs* dan lainnya. Apabila perilaku ekspansif dari tanah lempung tidak dapat diprediksi, maka hasil pemodelan dan analisis terowongan akan tidak akurat dan dapat berbahaya bagi kestabilan terowongan.

Hingga hari ini, banyak model konstitutif tanah yang dapat digunakan untuk analisis numerik. Tidak mudah bagi insinyur untuk memilih model yang paling sesuai dengan permasalahan yang mereka hadapi. Model konstitutif tanah yang paling sering digunakan dalam analisis numerik merupakan model elastoplastik dari *Mohr-Coulomb* (Ng et al., 2015). Keterbatasan dalam model konstitutif tanah yang sederhana pada permasalahan kompleks memaksa insinyur untuk menggunakan kondisi batasan, parameter konstitutif, atau variabel yang tidak sesuai dengan kondisi fisik di lapangan (Dias & Bezuijen, 2014). Kemampuan prediksi dalam analisis numerik terdiri dalam 3 komponen, sebuah model untuk mendiskripsikan perilaku tanah, metode yang sesuai untuk mengevaluasi parameter tanah yang diperoleh, dan prosedur hitung untuk menerapkan model tanah pada permasalahan praktis (Sakajo & Kamei, 1996).

Terowongan Manikin merupakan sebuah terowongan pengelak dari sebuah proyek bendungan yang terletak di Kupang, Nusa Tenggara Timur, Indonesia. Terowongan ini digali melalui tanah lempung lunak yang didasari formasi bobonaro, yang dimana diketahui bahwa formasi ini terkenal memiliki resiko tinggi. Lempung pada formasi bobonaro diindikasikan mempunyai sifat plastisitas tinggi dan mengandung mineral *montmorillonite*, sehingga pada musim hujan berpotensi tinggi terjadinya pengembangan dan mudah erosi. Sedangkan pada kondisi kering atau musim kemarau, terjadi penyusutan dan bersifat sangat keras (Vong & Rahardjo, 2016). Pada terowongan ini terjadi sebuah fenomena *swelling* pada tanah lempung lunak dimana tanah mengembang serta memberikan tekanan pada dinding terowongan sehingga menyebabkan kerusakan pada struktur penyangga awal terowongan.

Metode konstruksi yang dipilih untuk pembangunan terowongan

Manikin adalah metode *New Austrian Tunneling Method* (NATM) dengan 2 fase penggalian, bagian atas (*heading*) dan bawah (*invert*). Terowongan yang digali melewati material tanah akan memiliki karakteristik yang berbeda dengan material batuan. Selama proses penggalian, terowongan cenderung akan runtuh, sehingga dibutuhkan perlindungan dari atap terowongan sebelum penggalian terowongan dilakukan (Wijaya et al., 2021). Terowongan ini memiliki bentuk tapal kuda dengan dimensi 8,4 m × 8,4 m (*pay line*). Sistem pendukung awal merupakan kombinasi dari beton semprot dan rusuk baja. Penggalian bagian bawah dilakukan apabila penggalian bagian atas sudah digali sejauh 20 m. Ukuran dimensi terakhir setelah pendukung awal selesai dipasang menjadi 7,8 m × 7,8 m (gambar 1). Terowongan Manikin memiliki panjang total 803 m (STA 0+100 – STA 0+920), dan kedalaman maksimum 100 m, seperti tersaji pada gambar 1.



Gambar 1. Dimensi terowongan dan sistem penyangga terowongan Manikin
 (Sumber: Prasetyo et al, 2022)

Terowongan Manikin digali melalui sebuah lapisan tanah lempung lunak yang terdiri dari *redish clay* dan *scaly clay* yang didasari dari Formasi Bobonaro yang terkenal menantang secara geologis. Kedua lapisan tanah lempung yang dilalui ketika penggalian, memiliki nilai SPT antara 10 hingga 28. Penggalian

dimulai pada Oktober 2020 dari sisi *outlet* menuju *inlet* menggunakan ekskavator hidrolik.

Terowongan Manikin mengalami deformasi yang besar, mengakibatkan kegagalan pada penyangga awal terowongan. Kerusakan pertama diamati pada bulan Januari 2021 dalam bentuk

kerusakan pada *shotcrete* dan *steel ribs*. Penggalian pada akhirnya dihentikan pada bulan Juli 2021, ketika muka terowongan berada pada STA 0+680 / SR 260. Meskipun demikian, kerusakan pada sistem penyangga terowongan masih terjadi secara signifikan hingga Desember 2021. Pada penelitian ini, peneliti melakukan analisis pada potongan melintang di *Steel Ribs* (SR) No. 139 pada STA 0+768 seperti yang tertera pada gambar 2.

B. TINJAUAN PUSTAKA

Pemodelan perilaku tanah pada aplikasinya dalam analisis numerik tidak sama dengan material lainnya, perilaku tanah tidak berperilaku ideal dan simpel. Perilaku tanah sangat non-linear, dengan kekuatan dan kekakuan bergantung kepada tingkatan tegangan dan regangan yang terjadi. Untuk memprediksi secara realistis, model konstitutif yang lebih kompleks dibutuhkan untuk memperhitungkan perilaku pada tanah. Karena kompleksitas perilaku pada tanah, sebuah konstitutif model yang dapat menjelaskan semua segi dari perilaku tanah, dengan jumlah banyak parameter

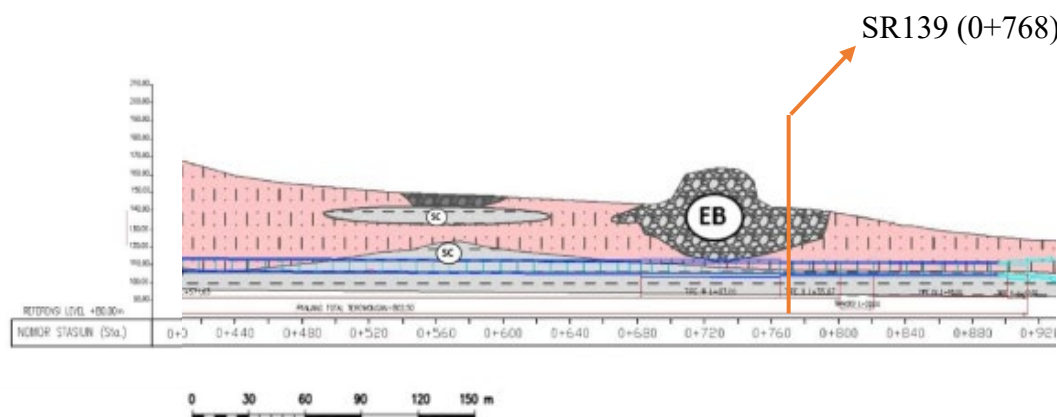
yang dapat diterima, belum tersedia. Maka dari itu, terdapat beberapa model yang tersedia, dengan kelebihan dan kekurangannya masing-masing.

1. Model Tanah *Mohr-Coulomb*

Jika hasil beberapa pengujian laboratorium dapat diplot dalam bentuk tegangan efektif, lingkaran *mohr* dari tegangan pada saat tanah gagal dapat ditarik sebuah garis, sehingga membentuk garis lurus. Ketika model *Mohr-Coulomb* diasumsikan sebagai plastik sempurna, Kriteria kegagalan *Mohr-Coulomb* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\tau_f = c' + \sigma \tan \varphi' \quad (1)$$

Dalam praktik dilapangan, model tanah MC sering digunakan karena parameter tanah yang dibutuhkan relatif mudah diperoleh dibandingkan model tanah lain. Namun, hasil pemodelan tanah pada terowongan menggunakan model MC dinilai menghasilkan deformasi yang lebih lebar dan dangkal dibandingkan dengan yang terjadi di lapangan (Hejazi et al., 2008).



Gambar 2. Letak SR139 pada potongan memanjang terowongan pengelak Manikin
 (Sumber: PT. LAPI, 2020)

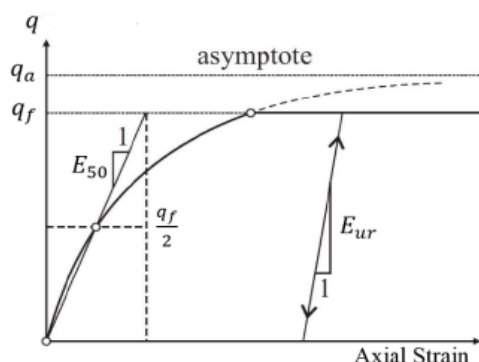
2. Model Tanah *Hardening Soil*

Bukti eksperimental dapat menunjukkan bahwa deformasi plastis

pada tanah dimulai dari tahapan awal pembebanan. Untuk menjelaskan perilaku tanah pada model konstitutif tanah, model elasto-plastik tidak sesuai

dengan perilaku tersebut. Model konstitutif tanah *Hardening Soil* (HS) merupakan model yang diturunkan dari hubungan hiperbolik antara regangan vertikal ε_1 dengan tegangan deviatorik, q , dalam pembebanan primer pada uji triaxial. Ketika tanah diberi pembebanan deviatorik primer, tanah menunjukkan adanya penurunan kekakuan dan pengembangan regangan plastik terbentuk (Schanz et al., 1999).

Pada pemodelan menggunakan *Hardening Soil Model*, dibutuhkan parameter seperti sudut geser tanah (ϕ), kohesi (c), sudut dilatasi (ψ), modulus kekakuan tanah, yaitu ($E_{50}^{ref}, E_{ur}^{ref}, E_{oed}^{ref}$), tekanan referensi (p^{ref}), *poisson ratio* untuk *unload-reload* (ν_{ur}), dan rasio kegagalan (R_f). Gambar 3 menyajikan hubungan tegangan-regangan pada Model *Hardening Soil*.



Gambar 3. Hubungan *stress-strain* pada Model *Hardening Soil*
 (Sumber: Hejazi et al., 2008)

C. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bersifat kajian numerik berdasarkan kombinasi data primer dan sekunder.

1. Identifikasi Tanah Ekspansif

Sebagian besar penyebab *swelling* pada proses penggalian terowongan apabila mineral lempung yang tidak terhidrasi bersinggungan dengan air maka fenomena *swelling* pada tanah akan

terjadi. Mineral seperti *montmorillonite* memiliki bentuk bersisik dan berlapis, air dapat masuk dari kisi-kisi kristal dengan peningkatan resultan volume hingga 10 kali volume awal. Perpindahan akibat peningkatan volume dapat menyebabkan *swelling pressure* (Bickel, 1996).

Lapisan tanah *scaly clay* merupakan material tanah yang paling dominan dilewati ketika proses penggalian terowongan pengelak. Kedua lapisan tanah, lempung lanau kemerahan dan *scaly clay* ini juga memiliki potensi *slaking*. Dengan kuat tekan uniaksial sebesar UCS = 0,4 MPa, uji *slake durability test* mengindikasikan bahwa sampel lempung *reddish clay* dan *scaly clay* tersebut sangat mudah terdisintegrasi ketika mengalami siklus pengeringan dan penjemuran dengan nilai *Slake Durability Index* sebesar SDI = 7,4 – 48%. Berdasarkan tabel klasifikasi Gamble (1971), lapisan *scaly clay* masuk dalam kategori *low to very low durability* seperti yang tertera pada tabel 1. Hal ini mengindikasikan bahwa material tersebut sangat mudah terlapukkan ketika terpapar atau terjadi aliran air yang masuk kedalam terowongan pada saat penggalian. Terkadang, *slaking* merupakan bagian dari proses *swelling*, sehingga dapat menjadi indikasi awal akan adanya fenomena *swelling*. Apabila material yang digali mengalami *swelling*, maka sistem penyangga yang digunakan harus memiliki kekakuan yang besar untuk menahan tekanan dari fenomena tersebut.

Walaupun demikian, berdasarkan data Uji XRD (*X-Ray Diffraction*) kandungan *clay minerals* sebesar 8-36% dengan kandungan mineral *montmorillonite* sebesar 0,4%. Dengan mempertimbangkan kandungan mineral tanah ekspansif *montmorillonite* yang rendah, massa tanah di sekitar terowongan pengelak diperkirakan tidak akan mengalami *swelling* pada tanah.

Pengujian batas susut juga dilakukan dalam uji batas *atterberg*. Dari sampel yang diperoleh nilai batas susut sebesar 18,15% (PT. Banyu Bumi Sangkara, 2020). Berdasarkan nilai uji batas susut

tersebut, identifikasi tanah lempung berdasarkan kriteria lempung ekspansif berdasarkan USBR (Al-Rawaz, 2006) masuk kedalam tanah dengan derajat ekspansif sedang hingga rendah.

Tabel 1. Klasifikasi tanah lempung ekspansif berdasarkan nilai SDI menurut Gamble, 1971

No.	Group Name	% Retained after two 10-minutes cycle
1	<i>Very High Durability</i>	>98
2	<i>High Durability</i>	95-98
3	<i>Medium High Durability</i>	85-95
4	<i>Medium Durability</i>	60-85
5	<i>Low Durability</i>	30-60
6	<i>Very Low Durability</i>	<30

(Sumber : PT. LAPI, 2020)

2. Penentuan Parameter Tanah

Parameter tanah diperoleh melalui 13 titik pengeboran geoteknik di sepanjang lokasi terowongan pengelak dan pengujian laboratorium. Pengeboran dilakukan dengan kedalaman pengeboran bervariasi mulai dari 30 hingga 85 meter. Berdasarkan Laporan dari PT. LAPI menilai bahwa nilai UCS tanah *scaly clay* dan *reddish clay* dari uji laboratorium bernilai sangat rendah, yaitu UCS = 0,4 – 0,6 MPa. Hal ini tidak sesuai dengan kondisi aktual pada saat proses penggalian terowongan, dimana alat penggali dan alat pemecah batu mengalami kesulitan saat menggali material *scaly clay* pada STA 0+885. Penentuan parameter tanah untuk analisis akan mempertimbangkan antara lain nilai uji laboratorium, Uji pengeboran, dan faktor ketebalan *overburden*. Hasil dari

pengujian ini dirangkum pada tabel 2 dan tabel 3 yang diinterpretasikan menjadi parameter input model tanah.

Pada studi ini akan dilakukan analisis dengan model konstitutif tanah *Mohr-Coulomb* (MC) dan *Hardening Soil* (HS) pada lapisan tanah *reddish clay* dan *scaly clay*, namun untuk batuan *exotic block* hanya akan menggunakan model MC. Pada model MC, hanya terdapat satu modulus elastisitas yang dibutuhkan pada model, melainkan pada model HS terdapat 3 nilai modulus yang perlu diketahui yakni E_{50} , E_{oed} , dan E_{ur} . Untuk mengakomodasi nilai modulus yang rata, nilai E pada MC disamakan dengan E_{50}^{ref} pada model HS. E_{oed}^{ref} disamakan dengan nilai E_{50}^{ref} , dan E_{ur}^{ref} diambil sebesar 3 kali nilai E_{50}^{ref} .

Tabel 2. Parameter tanah model *Mohr-Coulomb*

Parameter Tanah MC	<i>Reddish Clay</i>	<i>Scaly Clay</i>	<i>Exotic Block</i>
Berat Isi Basah (kN/m ³)	20,22	20,50	23,66
Berat Isi Kering (kN/m ³)	18,43	19,1	-
Modulus Elastisitas (kN/m ²)	16000	24000	9400000
Kohesi (kN/m ²)	60	60	3400
Sudut Geser (Derajat)	19	18	55
<i>Poisson Ratio</i>	0,25	0,25	0,4
Permeabilitas (m/s)	$2,3 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	13×10^{-5}

(Sumber: Prasetyo et al, 2022)

Tabel 3. Parameter tanah model *Hardening Soil*

Parameter Tanah HS	<i>Reddish Clay</i>	<i>Scaly Clay</i>	<i>Exotic Block</i>
Berat Isi Basah (kN/m ³)	20,22	20,50	23,66
Berat Isi Kering (kN/m ³)	18,43	19,1	-
E ₅₀ (kN/m ²)	16000	24000	9400000
E _{oed} (kN/m ²)	16000	24000	-
E _{ur} (kN/m ²)	48000	72000	-
Kohesi (kN/m ²)	60	60	3400
Sudut Geser (Derajat)	19	18	55
<i>Poisson Ratio</i>	0,25	0,25	0,4
Permeabilitas (m/s)	$2,3 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-5}$	13×10^{-5}

(Sumber: Prasetyo et al, 2022)

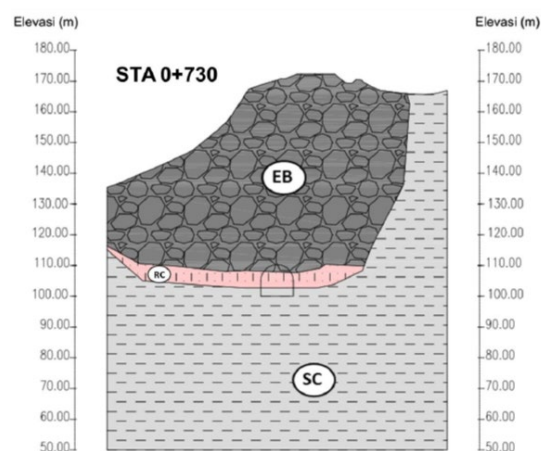
3. Pemodelan 2 Dimensi Menggunakan Metode Elemen Hingga (Plaxis2D)

Analisis dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan program Plaxis2D. Metode elemen hingga merupakan pendekatan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan mekanis dengan membagi sebuah sistem menjadi elemen-elemen yang lebih kecil. Pelapisan tanah dimodelkan berdasarkan data yang diperoleh dari potongan memanjang dan melintang dari terowongan pengelak Manikin. Pembagian lapisan tanah dibuat berdasarkan data potongan melintang pada STA 0+730 (gambar 4), dimana terletak berdekatan dengan lokasi SR139. Pemodelan lapisan tanah dapat digambarkan pada gambar 5.

Pemodelan menggunakan program Plaxis2D dilakukan dengan mengasumsikan bagian bawah model merupakan sendi *fixed* dan bagian samping kiri dan kanan model merupakan sendi *roll*. Tahapan-tahapan konstruksi pada analisis yang disesuaikan dengan tahapan konstruksi di lapangan. Tahapan konstruksi yang digunakan pada pemodelan terowongan pengelak Manikin dilakukan sebagai berikut:

- Tahap 1: Penggalian bagian atas terowongan fase 1

- Tahap 2: Penyemprotan *shotcrete* dan pemasangan rusuk besi pada bagian atas terowongan fase 1
- Tahap 3: Penggalian bagian bawah terowongan fase 2
- Tahap 4: Penyemprotan *shotcrete* dan pemasangan rusuk besi bagian bawah terowongan fase 2

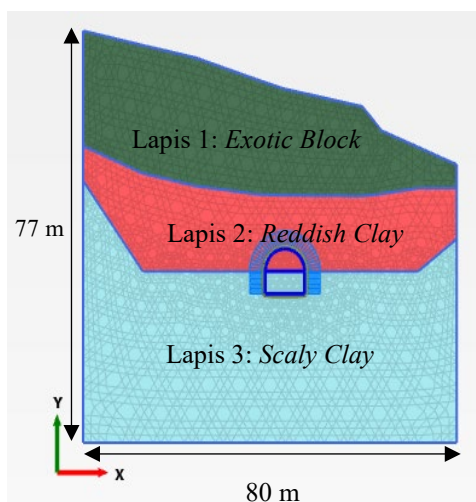


Gambar 4. Potongan melintang lapisan tanah pada terowongan Manikin

(Sumber: PT. LAPI, 2020)

Untuk mensimulasikan penambahan *swelling pressure* pada dinding terowongan, pemberian beban dalam bentuk beban garis diberikan pada dinding terowongan. Pemberian *swelling pressure* hanya diberikan pada dinding terowongan, tidak pada lantai

terowongan. Nilai besaran beban garis pada pemodelan diberikan mengikuti besaran deformasi yang terjadi di lapangan mengikuti besaran waktu yang tersedia dari data *monitoring* (gambar 6). Dengan mengambil sebanyak 5 data pengawasan sebagai acuan, maka dapat dilakukan 5 tahapan pembebanan dengan beban garis yang memegang peran sebagai *swelling pressure* pada dinding terowongan. Tahapan pemberian beban ini akan dilakukan pada tahap 5 hingga tahap 10.

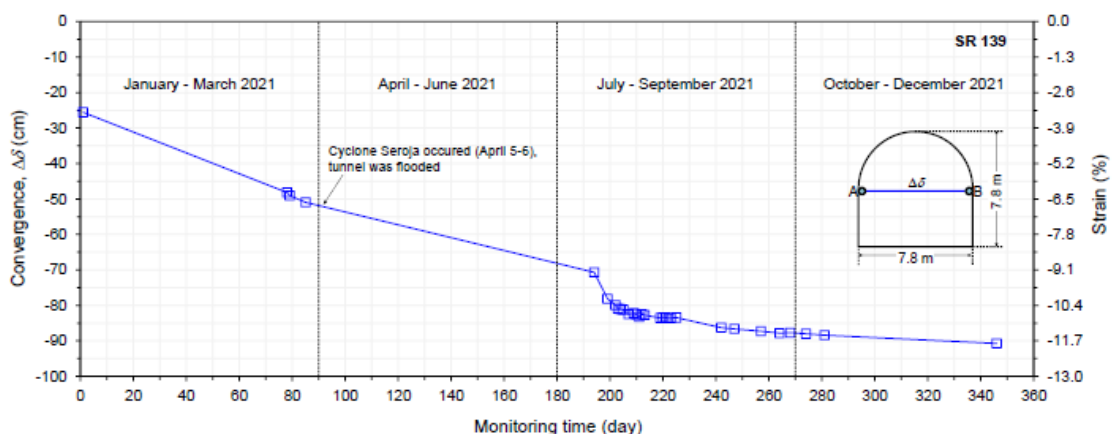


Gambar 5. Pembagian lapisan tanah pada program plaxis2D

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

Swelling pada tanah yang menekan dinding terowongan bisa terjadi karena beberapa alasan. Pertama, *swelling* pada tanah akan terjadi secara alami karena proses pelepasan tegangan atau *unloading* dari tanah yang digali. Kedua, tanah mengalami *swelling* karena terdapat material tanah ekspansif yang terganggu oleh air. Apabila kedua penyebab tersebut tidak dapat dibuktikan, maka *swelling* terjadi dari alasan yang tidak diketahui. Pada kasus *swelling* pada terowongan Manikin, ketiga skenario ini akan dimodelkan untuk menentukan penyebab dari *swelling* pada tanah pada dinding terowongan Manikin.

Deformasi pada terowongan yang dianalisis merupakan deformasi arah lateral (sumbu x) antara titik A dan B pada SR139 (gambar 6), sesuai dengan data pengawasan yang tersedia. Hasil analisis deformasi terowongan pada pemodelan yang telah dilakukan akan dibandingkan dengan data pengawasan yang terjadi di lapangan untuk memverifikasi pemodelan 2 dimensi dengan menggunakan Plaxis2D. Berikut hasil analisis yang telah dilakukan.



Gambar 6. Data *monitoring* deformasi pada terowongan Manikin
 (Sumber: Prasetyo et al., 2022)

1. Hasil Analisis Model MC

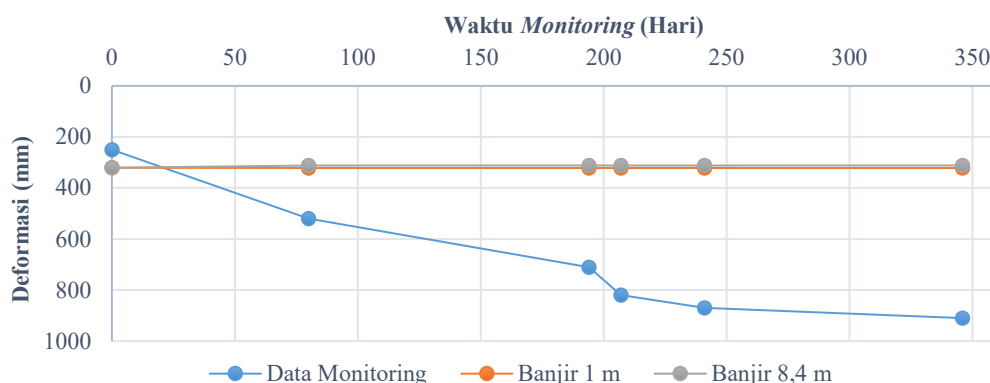
Hasil yang diperoleh pada analisis deformasi menggunakan model tanah MC yang diukur pada tahap penyangga awal selesai dipasang, mendapatkan deformasi sebesar 320,67 mm (4,11%). Deformasi yang terukur ini merupakan deformasi yang disebabkan oleh proses pelepasan tegangan akibat penggalan terowongan. Untuk mengukur deformasi akibat banjir, maka dilakukan juga analisis dengan memasukkan ketinggian muka air sesuai ketinggian banjir. Karena data ketinggian banjir tidak tersedia, maka banjir dibuat dalam 3 kondisi, setinggi 1 m dan 8,4 m (terowongan terendam penuh). Hasil analisis terhadap pengaruh banjir memberikan nilai deformasi yang cenderung dekat, 321 mm untuk ketinggian air 1 m dan 312 mm untuk kedalaman 8,4 m. Meskipun ketinggian muka air banjir yang berbeda, maka dapat dinilai bahwa memiliki pengaruh minim terhadap deformasi terowongan seperti tertera pada gambar 7. Hal ini disebabkan dari keterbatasan parameter pada model MC dalam memodelkan *swelling* pada tanah. Maka dari itu, pengaruh air banjir terhadap *swelling* pada tanah dapat di eliminasi pada model MC. Maka dari itu, dibutuhkan bantuan dari beban tambahan berupa beban garis yang berperan sebagai *swelling pressure* dari tanah ekspansif untuk memodelkan fenomena *swelling*

dari tanah ekspansif pada terowongan Manikin.

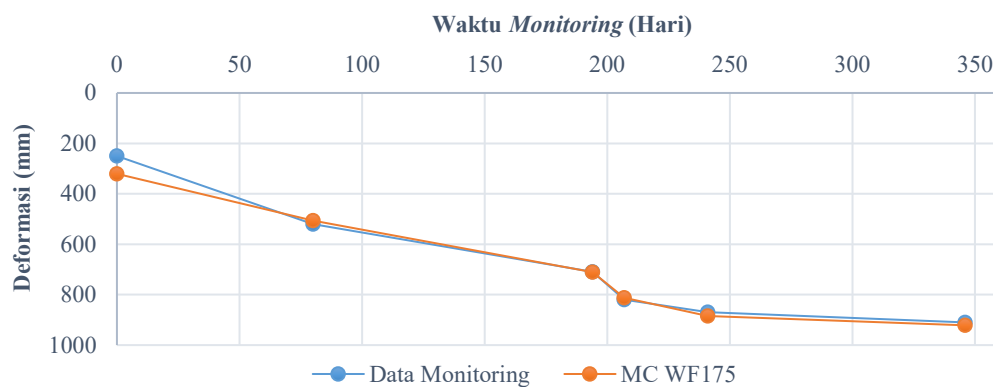
Kemudian, pemodelan dilanjutkan dengan memberikan *swelling pressure* dalam bentuk beban garis, dimana besaran beban yang diberikan mengikuti besaran deformasi yang diperoleh aktual di lapangan. Dengan melakukan *Back Analysis*, maka dapat diperoleh besaran *swelling pressure* terhadap waktu pada model MC. Deformasi dan *swelling pressure* terhadap waktu dapat digambarkan pada gambar 8. Dari proses analisis menggunakan program diketahui bahwa besaran *swelling pressure* diprediksi terbesar 85 kN/m/m terjadi pada hari ke-80 pada model MC. Kemudian, *swelling pressure* berangsur-angsur turun hingga ke batas minimal 10 kN/m/m (gambar 9).

2. Hasil Analisis Model HS

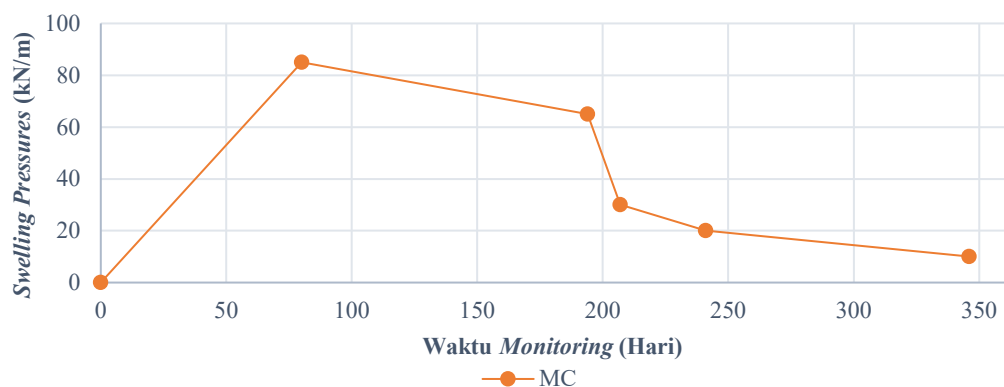
Pemodelan selanjutnya pada studi ini dilakukan menggunakan soil model *Hardening Soil* (HS). Deformasi yang disebabkan dari proses pelepasan tegangan pada tanah memberikan nilai deformasi sebesar 420,26 mm (5,38%). Untuk mengetahui penyebab *swelling* pada tanah akibat dari banjir, maka dilakukan analisis dengan menggunakan model tanah HS. Ketinggian muka air banjir dan tahapan perhitungan pada analisis disamakan dengan analisis banjir yang dilakukan pada model MC.



Gambar 7. Grafik deformasi vs. waktu pengaruh banjir model *Mohr-Coulomb*



Gambar 8. Grafik deformasi vs. waktu pemodelan menggunakan *Mohr-Coulomb*



Gambar 9. Grafik distribusi *swelling pressure* dengan *back analysis* model *Mohr-Coulomb*

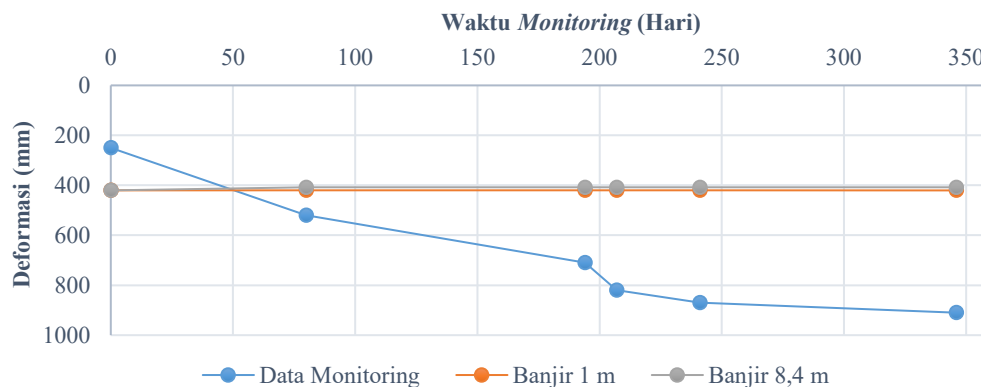
Hasil analisis deformasi menggunakan model tanah HS terhadap pengaruh banjir memberikan nilai yang cenderung sama sepanjang waktu meskipun ketinggian air berbeda; deformasi sebesar 420 mm untuk ketinggian air 1 m, deformasi 408 mm untuk ketinggian air 8,4 m (gambar 10). Pemodelan untuk modelkan tanah ekspansif kemudian dilanjutkan dengan memvariasikan besaran nilai E_{ur}^{ref} . Besaran nilai E_{ur} pada awal dibuat $3 \times E_{50}^{ref}$; kedua sebesar $2,5 \times E_{50}^{ref}$; dan $2 \times E_{50}^{ref}$. Hasil yang diperoleh dari analisis tersebut pun, tidak memberikan hasil yang sesuai dengan deformasi yang terjadi di lapangan, dimana deformasi terbesar terjadi pada variasi $2 \times E_{50}^{ref}$ dengan deformasi akhir sebesar 478 mm/6,13% (gambar 11).

Keterbatasan parameter pada model HS tidak dapat memodelkan fenomena *swelling* pada tanah. Maka dari itu, pemodelan banjir dan variasi nilai E_{ur} tidak dapat menyimpulkan banjir sebagai penyebab fenomena *swelling* dari model HS pada kasus ini. Sama seperti model MC, model HS membutuhkan bantuan beban tambahan dalam bentuk beban garis untuk meniru fenomena *swelling* pada tanah pada terowongan Manikin.

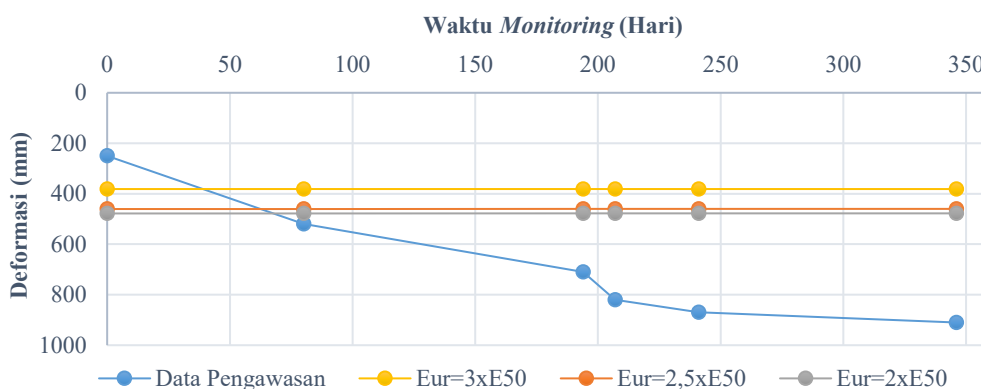
Dengan besaran beban *swelling pressure* yang sama dengan model MC, maka dapat diperhatikan bahwa nilai deformasi pada pemodelan *Hardening Soil* (HS) secara keseluruhan lebih besar dari pemodelan menggunakan MC (gambar 12). Meskipun deformasi pada dari awal pemberian *swelling pressure*

model HS berbeda dengan MC, namun pada hari ke-346, nilai deformasi pada pemodelan HS cukup mendekati nilai deformasi MC. Pemodelan untuk

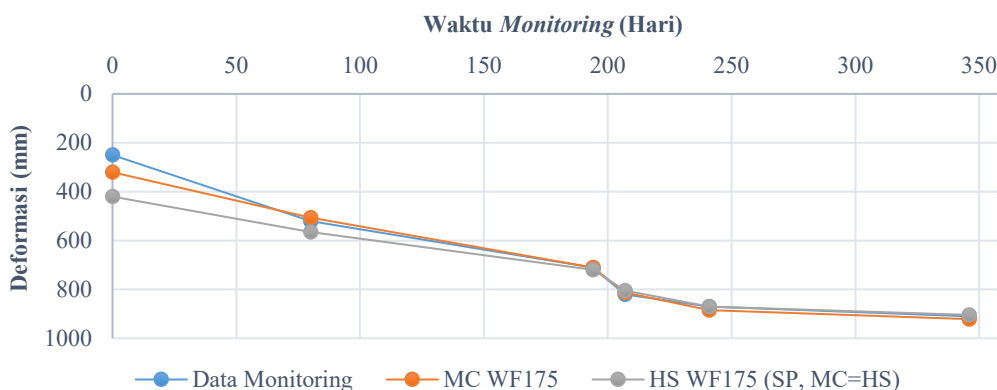
menentukan *swelling pressure* yang sesuai dengan model HS terhadap data pengawasan kemudian dilakukan.



Gambar 10. Grafik deformasi vs. waktu pengaruh banjir model *Hardening Soil*



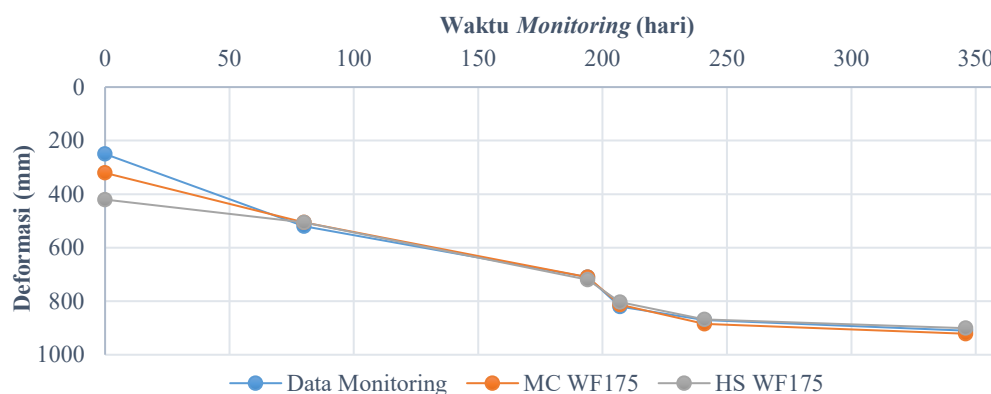
Gambar 11. Grafik deformasi vs. waktu pengaruh banjir dengan memvariasikan nilai E_{ur}^{ref}



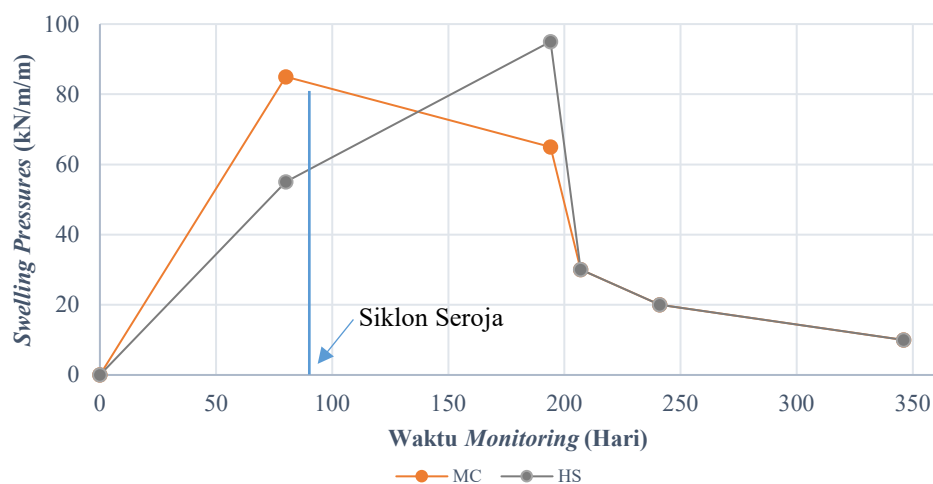
Gambar 12. Grafik deformasi vs. waktu pemodelan menggunakan *Hardening Soil* dengan nilai SP sama dengan hasil dari model MC

Back analysis untuk menentukan besaran *swelling pressure* kemudian dilakukan menggunakan model HS mengikuti besaran deformasi yang terjadi terhadap waktu. Hasil analisis dapat dibuat dalam bentuk grafik pada gambar 13. Dapat diperhatikan pada grafik *swelling pressure* (SP) terhadap waktu, bahwa besaran SP yang terjadi berbeda antara kedua model. Model MC memberikan SP terbesar pada hari ke-90 sebesar 85 kN/m/m. Kemudian, besaran

SP menurun hingga berakhir sebesar 10 kN/m/m (gambar 14). Model tanah HS memberikan nilai SP terbesar pada hari ke-194 sebesar 95 kN/m/m. Meskipun penyebab dari fenomena *swelling* pada terowongan tidak diketahui, mempertimbangkan kejadian banjir yang terjadi pada bulan April akibat siklon seroja, maka pemodelan HS memberikan distribusi pembebanan yang lebih representatif apabila dibandingkan dengan model MC.



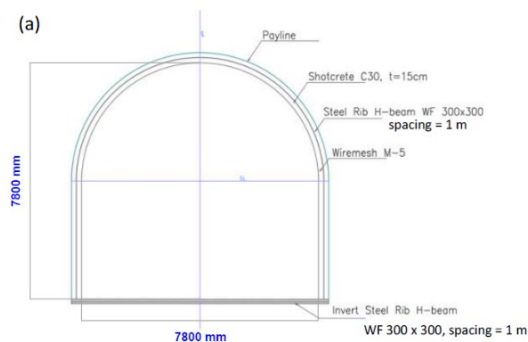
Gambar 13. Grafik deformasi vs. waktu pemodelan menggunakan *Hardening Soil* dengan SP dari *Back Analysis*



Gambar 14. Perbandingan grafik distribusi *swelling pressure* model *Mohr-Coulomb* dan *Hardening Soil*

3. Alternatif Sistem Penyangga Awal

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Prasetyo (2022), beberapa usulan diberikan dalam menanggulangi permasalahan tanah ekspansif pada terowongan Manikin. Alternatif pertama adalah dengan menggunakan baja *steel ribs* dengan profil yang lebih besar, yakni baja *H-Beam* WF 300×300 dengan spasi 1 m, dan *shotcrete* C30 setebal 15 cm (gambar 15). Penyangga kedua adalah dengan menggunakan *Umbrella Arch Method* (UAM) yang terdiri dari baja *H-Beam* WF 175×175 dengan spasi 1 m, *shotcrete* C30 dengan ketebalan 15 cm, dan UAM dengan diameter 114 mm, L= 9 m, dan *overlap* 6m (gambar 16). Dengan melakukan analisis pada kedua alternatif sistem penyangga awal untuk terowongan tersebut, diharapkan dapat memprediksi deformasi yang terjadi akibat fenomena tanah ekspansif untuk mengendalikan deformasi berlebih yang terjadi pada terowongan.

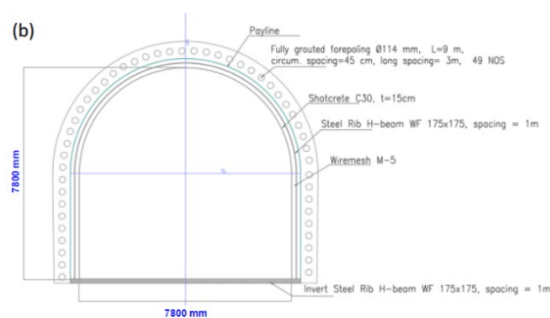


Gambar 15. Desain alternatif sistem penyangga awal terowongan dengan WF300
 (Sumber: Prasetyo et al., 2022)

4. Hasil Analisis Menggunakan Sistem Penyangga *Steel Ribs* WF300

Hasil yang diperoleh dengan mengganti material yang digunakan pada awal (WF175) dengan menggunakan baja WF300 yang memiliki profil lebih besar akan memberikan deformasi yang lebih

kecil jika dibandingkan dengan perkuatan WF 175. Hasil yang diperoleh akibat proses unloading menggunakan model MC (248 mm/3,18%) memberikan deformasi yang lebih kecil jika dibanding dengan HS (393,2/5%). Deformasi dari pembebanan tambahan dengan *line load* pada model MC memberikan deformasi akhir dengan nilai sebesar 412,8 mm/5,3% sedangkan HS memberikan deformasi akhir sebesar 504,3/6,4% mm (gambar 17).



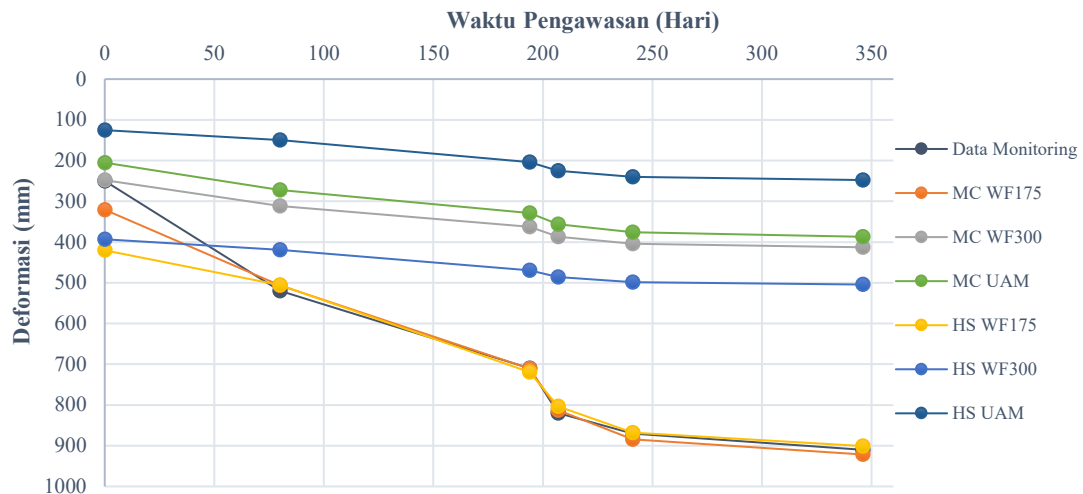
Gambar 16. Desain alternatif sistem penyangga awal terowongan dengan UAM
 (Sumber: Prasetyo et al., 2022)

5. Hasil Analisis Menggunakan Sistem Penyangga *Umbrella Arch Method*

Alternatif kedua pada studi ini adalah dengan menggunakan metode *Umbrella Arch Method* atau *forepoling* pada terowongan Manikin. Dengan menambahkan metode ini dengan sistem perkuatan terowongan yang ada (WF 175), deformasi pada terowongan Manikin diharapkan lebih kecil dari sistem perkuatan awal. Hasil yang diperoleh dari analisis dengan metode UAM ini menunjukkan bahwa deformasi yang terjadi berkurang secara signifikan. Deformasi yang dihasilkan dari proses unloading pada model MC memberikan nilai sebesar 205 mm/2,6% sedangkan model HS memberikan besaran deformasi sebesar 125 mm/1,6%. Deformasi yang dihasilkan dengan memberikan beban tambahan pada model

HS memberikan hasil deformasi yang lebih kecil jika dibandingkan model MC pada kasus ini. Deformasi akhir pada model MC memberikan deformasi

terbesar senilai 387 mm /4,96% sedangkan model HS memberikan nilai deformasi sebesar 247,7 mm/3,1% (gambar 17).



Gambar 17. Grafik deformasi vs. waktu menggunakan alternatif sistem penyangga awal (WF175, WF300, UAM)

E. KESIMPULAN

Analisis telah dilakukan untuk terowongan Manikin dengan metode galian bertahap atau NATM menggunakan metode elemen hingga 2 dimensi pada program Plaxis2D. Pada studi ini, analisis dilakukan menggunakan dua model konstitutif tanah yakni *Mohr-Coulomb* dan *Hardening Soil*. Pemodelan juga dilakukan dengan 2 alternatif sistem perkuatan awal dinding terowongan, menggunakan profil *steel ribs* yang lebih besar (WF300) dan *Umbrella Arch Method* (UAM). Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, terdapat beberapa kesimpulan yang dapat diambil :

- Deformasi yang dihasilkan pada lining asli (WF175) menggunakan model MC dan HS memberikan nilai yang berbeda. Pada proses *unloading* tegangan tanah dari proses penggalian, pemodelan MC memberikan deformasi (320,67 mm; 4,1%) yang dimana lebih kecil pada

kondisi awal dibanding pada model HS (420,26 mm; 5,38%). Namun, ketika model diberi pembebanan akibat *swelling pressure*, pada akhir pembebanan kedua model memberikan nilai deformasi yang tidak jauh berbeda. Hal ini terjadi akibat perbedaan perilaku tegangan-regangan pada kedua model konstitutif tanah.

- Kedua model tanah (MC dan HS) tidak dapat memberikan hasil yang signifikan terhadap pengaruh banjir terhadap fenomena tanah ekspansif pada terowongan Manikin, disebabkan dari keterbatasan parameter yang digunakan kedua model untuk meniru perilaku tanah ekspansif. Namun, dengan melakukan beban tambahan pada model, distribusi pembebanan pada model dapat menggambarkan fenomena *swelling* pada tanah melalui *swelling pressure* yang terjadi.

- c. Mempertimbangkan banjir yang terjadi pada bulan April 2021 akibat Siklon Seroja, model HS memberikan prediksi terhadap distribusi pembebanan *swelling pressure* yang lebih representatif dibandingkan dengan model MC.
- d. Hasil dari analisis dua alternatif sistem penyangga awal dinding terowongan pada terowongan Manikin efektif memberikan deformasi yang lebih kecil, berikut untuk model MC dan HS. Alternatif menggunakan metode UAM dengan model HS memberikan deformasi terkecil sebesar 246,46 mm/3,16%.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Rawaz, A. A. (2006). *Expansive Soil Recent Advances in Characterization and Treatment*. A.A.Balkema.
- Bickel, J. O. (1996). Tunnel Engineering Handbook. In *Tunnel Engineering Handbook*. Kluwer Academic Publisher.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0449-4>
- Dias, T. G. S., & Bezuijen, A. (2014). Tunnel Modelling: Stress Release and Constitutive Aspects. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground - 8th International Symposium*.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1201/b17240-37>
- Hejazi, Y., Dias, D., & Kastner, R. (2008). Impact of Constitutive Models on The Numerical Analysis of Underground Constructions. *Acta Geotechnica*, 3(4), 251–258.
<https://doi.org/10.1007/s11440-008-0056-1>
- Ng, C. W. W., Sun, H. S., Lei, G. H., Shi, J. W., Mašin, D., & Huasheng, M. S. (2015). Ability of Three Different Soil Constitutive Models To Predict a Tunnel's Response To Basement Excavation. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(11), 1–14.
<https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0361>
- Prasetyo, S. H., Stephen, Wattimena, R.K., & Baskara, A. (2022). Assessing the Performance of Various Initial Support Systems For Tunneling in Swelling Clay. *American Rock Mechanics Association*.
<http://dx.doi.org/10.56952/ARMA-2022-2356>
- PT. Banyu Bumi Sangkara. (2020). *Laporan Pengujian Laboratorium Tanah INA GT- 24 sd 28 Bendungan Manikin*.
- PT. LAPI. (2020). *Review Desain Bendungan Proyek Bendungan Manikin Paket II di Kabupaten Kupang*.
- Sakajo, S., & Kamei, T. (1996). Simplified Deformation Analysis for Embankment Foundation using Elasto-Plastic Model. *Soils and Foundations*, 36(2), 1–11.
<https://doi.org/10.3208/sandf.36.21>
- Schanz, T., Vermeer, P. A., & Bonnier, P. G. (1999). *The Hardening Soil Model: Formulation and Verification*. 328. Beyond 2000 in Computational Geotechnics – 10 Years of PLAXIS, Balkema, Rotterdam.

Vong, E. A., & Rahardjo, P.P. (2016). Studi Efek Pengembangan Terhadap Kuat Geser dan Perubahan Volume Tanah Lempung Bobonaro (Studi Kasus Lempung Bobonaro Di Maliana Timor Leste). *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*, 2(2), 190-201.

Wijaya, W., Rahardjo, P. P., & Lim, A. (2021). Investigation of Twin Tunnel Deformation with Umbrella Grouting Protection & NATM Tunneling using 3D Finite Element: Case Study Cisumdawu Tunnel. *Ukarst*.5, 5(2), 253-267.
<https://doi.org/10.30737/ukarst.v3i2>



© 2023 Siklus Jurnal Teknik Sipil All rights reserved. This is an open access article distributed under the terms of the CC BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)