

# ANALISIS TEROWONGAN JALAN RAYA DENGAN PROTEKSI UMBRELLA GROUTING MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA 2D KASUS STUDI TOL CISUMDAWU

**Dendi Yogaswara**

Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik  
Universitas Katolik Parahyangan, Bandung

*email : dendiogaswara23@gmail.com*

## **Abstrak**

Pada pembangunan Jalan Tol Cisumdawu, akan ada pembangunan terowongan pertama untuk jalan tol di Indonesia tepatnya berada di Sta. 12+600 – Sta. 13+100. Total panjang pembangunan terowongan adalah 472 meter dan memiliki diameter 14 meter. Kondisi geologi di daerah terowongan merupakan daerah perbukitan vulkanik berumur quarter dan sudah menjadi tanah residual. Oleh karena itu, konstruksi terowongan utama sepanjang 362 meter menggunakan metode NATM (*New Austrian Tunneling Method*). Tingkat kesulitan pelaksanaan terowongan pada tanah sangat ditentukan oleh *stand-up time* dan posisi muka air tanah. Posisi terowongan di atas muka air tanah, *stand-up time* ditentukan oleh kuat geser dan kuat tarik material, sedangkan di bawah muka air tanah, *stand-up time* ditentukan oleh nilai permeabilitasnya. Penurunan tanah di permukaan adalah akibat deformasi yang disekitar galian. Salah satu metode tambahan untuk perkuatan terowongan adalah *Umbrella Arch Method* (UAM). Metode tambahan ini digunakan untuk mencegah penurunan muka tanah. *Umbrella Arch Method* (UAM) adalah teknik penguatan tanah di mana semua atau sebagian dukungan dari bagian terowongan ditempatkan sebelum memulai penggalian. Hasil analisis dengan menggunakan metode elemen hingga 2D menunjukkan bahwa deformasi terowongan di titik yang ditinjau terjadi sebesar 40 mm dan nilai tersebut masih lebih besar bila dibandingkan dengan deformasi yang didapatkan berdasarkan hasil dari monitoring terowongan dilapangan yaitu sebesar 33 mm di titik yang sama dilakukan penelitian.

**Kata Kunci:** Tol Cisumdawu, Terowongan, Deformasi, Metode Elemen Hingga 2D

## **Abstract**

*In the construction of the Cisumdawu Toll Road, there will be the construction of the first tunnel for toll roads in Indonesia to be precisely located at Sta. 12 + 600 - Sta. 13 + 100. The total length of the tunnel construction is 472 meters and has a diameter of 14 meters. The geological condition in the tunnel area is a quarter-year volcanic hilly area and has become residual land. Therefore, the construction of the 362 meters main tunnel uses the NATM (New Austrian Tunneling Method) method. The level of difficulty in carrying out tunnels on the ground is largely determined by the stand-up time and ground water level position. The position of the tunnel above the ground water level, stand-up time is determined by the shear strength and tensile strength of the material, while below the ground water level, stand-up time is determined by the permeability value. Land subsidence is due to deformation around the excavation. One additional method for tuning tunnels is the Umbrella Arch Method (UAM). This additional method is used to prevent land subsidence. Umbrella Arch Method (UAM) is a soil strengthening technique where all or part of the support from the tunnel section is placed before starting the excavation. The results of analysis using 2D finite element method show that the tunnel deformation at the point observed is 40 mm and that value is still greater than the deformation obtained based on the results of monitoring the tunnel in the field at 33 mm at the same point conducted research.*

**Keywords:** Cisumdawu Toll Road, Tunnel, Deformation, 2D Finite Element Method

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Jalan Tol Cisumdawu merupakan salah satu proyek strategis nasional, jalan tol ini dibangun dengan panjang  $\pm$  60 kilometer yang merupakan bagian dari Jalan Tol Trans Jawa yang berada di Propinsi Jawa Barat dan menghubungkan daerah Cileunyi-Sumedang dan Cirebon daerah Dawuan atau Jalan Tol Padaleunyi dengan Jalan Tol Palimanan-Kanci dengan keseluruhan mempergunakan lahan seluas 825 ha (Sumber : Wikipedia).

Kondisi tofografi di ruas tersebut yang terjal dan berbukit-bukitlah yang mendasari dibangunnya terowongan tersebut. Panjang total terowongan 472 meter dengan tahap awal dilakukan konstruksi portal di kedua sisi terowongan dengan metode *cut and cover* dan konstruksi *main tunnel* sepanjang 362 meter dengan metode NATM (*New Austrian Tunneling Methode*). Dimensi terowongan memiliki diameter 14 meter dengan lebar badan jalannya 11 meter dan ketinggian bukit dari permukaan jalan mencapai 40 meter.

Metode NATM (*New Austrian Tunneling Methode*) dipilih pada konstruksi *main tunnel*, karena metode ini lebih cocok untuk lokasi proyek dengan kondisi tanah lunak seperti lokasi Tol Cisumdawu. Pengertian tanah lunak adalah material yang dapat digali secara manual. Material ini pada umumnya tidak dapat menahan berat sendiri dalam jangka waktu yang panjang. Dalam teknologi terowongan tanah dimasukkan dalam kategori *soft ground*.

Beberapa potensi masalah pada konstruksi terowongan diantaranya :

- Penurunan di permukaan tanah akibat adanya galian terowongan
- Masalah dewatering
- Keruntuhan di muka terowongan waktu penggalian
- Pergerakan dari struktur di bawah tanah
- Bocoran pada lining

Berdasarkan potensi-potensi tersebut diatas, salah satu metode tambahan untuk perkuatan terowongan adalah *Umbrella Arch Method* (UAM). Metode tambahan ini digunakan untuk mencegah penurunan muka tanah. *Umbrella Arch Method* (UAM) adalah teknik penguatan tanah di mana semua atau sebagian dukungan dari bagian terowongan ditempatkan sebelum memulai penggalian. Tujuan dari *Umbrella Arch Method* (UAM) ini adalah untuk membentuk lengkungan seperti cangkang *grouting* atau batu bertulang dan massa tanah di sekitar terowongan.

### 1.2 Maksud dan Tujuan Penelitian

Adapun maksud dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Melakukan kajian dan analisa terowongan dengan pola *Umbrella Arch Method* (UAM) yang dilaksanakan di terowongan jalan tol Cisumdawu,
- Melakukan pemodelan analisa perkuatan terowongan dengan bantuan program finite elemen PLAXIS 2D,

Sedangkan tujuan dari penelitian ini untuk memperoleh pemahaman mengenai *Umbrella Arch Method* (UAM) di Indonesia dan menjadikan salah satu referensi mengenai teknologi terowongan. 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 terhadap terowongan jalan tol Cisumdawu menggunakan data-data yang peneliti dapatkan dari data teknis terowongan Cisumdawu maupun dari gambar final design terowongan. Pemodelan dilakukan dengan metode elemen hingga dan menggunakan bantuan program geoteknik PLAXIS 2D. Studi dilakukan pada terowongan jalan tol Cisumdawu yang sedang dikonstruksi. Studi kasus tersebut menggunakan data tanah dan parameter tanah yang sudah ada dan dilakukan oleh jasa penyelidikan tanah lokal.

### 1.4 Lokasi Penelitian

Dikarenakan luasnya pembahasan dan keterbatasan waktu penelitian maka, pada penelitian ini batasan masalah yang akan dianalisis adalah sebagai berikut:

- 1) Penelitian akan membahas analisis stabilitas tanah pada Sta. 26+200 ~ 26+275 Proyek Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Cisumdawu Seksi II berdasarkan data penyelidikan tanah.
- 2) Penelitian akan membahas solusi perkuatan timbunan pada Sta. 26+200 ~ 26+275 Proyek Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Cisumdawu Seksi II yang efisien dari segi keamanan struktur dan biaya konstruksi.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Karakteristik Tanah

Dalam proses konstruksi terowongan, tanah lunak merupakan material yang dapat dipindahkan dengan alat-alat sederhana walaupun sebenarnya alat-alat tersebut tidak dipakai dalam pembuatan lubang galian. Pembuatan lubang galian pada tanah lunak memerlukan informasi tentang kondisi tanah *subsurface* disekitar lokasi terowongan.

Setiap jenis tanah memiliki kekuatan yang berbeda dalam memberikan respon terhadap proses konstruksi ataupun gangguan terhadap tanah tersebut. Informasi ini akan digunakan sebagai referensi terhadap metode pelaksanaan pekerjaan

terowongan, baik itu dimensi lubang bukaan, teknik penggalian dan penyangga untuk kekuatan lining terowongan.

**Tabel 2.1** Klasifikasi Tanah untuk Terowongan (Terzaghi, 1950)

Klasifikasi		Perilaku	Tipe Tanah
Firm (kuat)		Karena bagian depan galian kuat, maka tidak diperlukan penyokong sementara dan lining permanen dipasang sebelum adanya tanah.	Tanah lepas diatas air tanah, lempung keras, marl, pasir semen kerikil.
Raveling	Slow raveling	Bongkahan tanah mulai keluar dari daerah lengkungan atau dinding terowongan setelah tanah digali, mengarah pada loosening atau retakan yang getas (tanah retak pada permukaan, melawan tanah yang squeezing). Pada tanah yang ber-raveling cepat, proses mulai pada beberapa menit, sebaliknya terjadi pada tanah yang ber-raveling lambat.	Sisa tanah atau pasir dengan sedikit bahan pengikat akan mempercepat raveling di bawah muka air tanah dan memperlambat di atas muka air tanah. Kecepatan raveling pada lempung keras bergantung pada derajat pembebanan.
	Fastraveling		
Squeezing		Adanya tanah yang ter-squeeze atau extrudes plastically pada terowongan terjadi tanpa retak yang terlihat atau hilangnya kontinuitas dan tanpa terlihat bertambahnya kadar air. Kekentalan, plastic yield dan aliran mengarah pada pembebanan.	Tanah dengan kekuatan friksi yang kecil. Rata-rata squeezezenya tergantung pada derajat pembebanan. Terjadi sampai kedalaman sedang. Pada lempung kaku sampai keras akan terjadi kombinasi antara raveling pada permukaan dan squeezing di bawah permukaan.
Running	Cohesive-running	Material granular tanpa kohesi tidak stabil lereng $\pm 30-35$ . Pada lereng yang lebih curam material ini runtuh sampai lereng menjadi hampir rata.	Material granular bersih dan kering. Adanya kohesi pada pasir basah atau sementasi lemah pada beberapa tanah granular membuat terjadinya raveling sesaat sebelum material runtuh, yang disebut cohesive-running.
	Running		
Flowing		Campuran tanah dan air yang mengalir ke dalam terowongan seperti cairan kental. Material itu dapat masuk dari balik dinding dan dapat mengalir dengan deras dan mengisi penuh terowongan pada beberapa kasus.	Lanau, pasir atau butiran kasar di bawah muka air tanah tanpa adanya lempung yang mempunyai kohesi dan plastisitas. Dapat terjadi pada lempung sensitive jika merupakan tanah yang disturbed (terganggu).
Swelling		Tanah menyerap air, memperbesar volume dan secara perlahan terowongan menjadi lebih luas.	Lempung dengan highly preconsolidated, mempunyai indeks plastisitas $\pm 30$ , biasanya mengandung montmorillonite.

## 2.2 New Austrian Tunneling Method (NATM)

New Austrian Tunneling Method (NATM) adalah suatu metode dengan cara pendekatan atau filsafat yang mengintegrasikan prinsip-prinsip perilaku massa batu dan pemantauan perilaku penggalian bawah tanah selama konstruksi. Metode ini menggunakan kombinasi banyak cara untuk melakukan pemantauan terhadap gerakan dari batuan, terowongan, dan lain-lain pada saat penggalian maupun tidak. Pada dasarnya metode ini digunakan untuk mendapatkan kondisi stabil dan ekonomis.

NATM ini dikembangkan pada tahun 1957 sampai 1965 di Austria. Di tahun 1962 ada sebuah nama untuk NATM yaitu unsalzburg, yang digunakan agar dapat membedakan antara NATM dengan Austria Tunneling Method yang masih tradisional atau lama oleh Szechy. Kontributor utama dalam pengembangan NATM adalah Ladislaus Von Rabcewicz, Leopold Muller dan Franz Pacher. Pada dasarnya NATM adalah pendekatan empiris ilmiah, yang berkembang dari pengalaman Rabcewicz (1964). Dalam teorinya Rabcewicz (1964) mengemukakan mengenai NATM berhubungan dengan stress dan deformasi di sekitar terowongan. Sedangkan menurut Fenner dan Kastner, NATM

adalah suatu metode yang digunakan dalam membuat instrumentasi canggih, pemantauan, dan menafsirkan pengukuran ini secara ilmiah.

Menurut Profesor Milner itu sendiri NATM sebagai sebuah konsep untuk mengamati prinsip-prinsip tertentu. Meskipun dia telah terdaftar lebih kurang dari 22 prinsip (Muller, 1978), ada tujuh fitur yang paling penting yang didasarkan NATM yaitu sebagai berikut :

- Mobilisasi kekuatan massa batuan

Metode ini bergantung pada kekuatan inheren massa batuan disekitarnya yang dilestarikan sebagai komponen utama dari terowongan dukungan. Dukungan primer diarahkan untuk mengaktifkan batu dalam mendukung dirinya sendiri. Dukungan tersebut harus memiliki karakteristik beban-deformasi yang cocok dan ditempatkan pada waktu yang betul.

- Penggunaan *Shotcrete* sebagai *protection*

Untuk menahan atau menopang beban yang mempunyai kapasitas massa yang benar dan mengurangi deformasi batuan, digunakan *system shotcrete*. Selain dengan menggunakan *system shotcrete* kadang-kadang kombinasi dengan sistem *rockbolting*.

- Penggunaan alat ukur

NATM memerlukan instalasi yang canggih pada saat pemasangan *shotcrete* untuk memantau deformasi penggalian. Dalam hal ini, diperlukan informasi tentang stabilitas terowongan agar memungkinkan melakukan optimalisasi pembentukan beban.

- Penggunaan peyanggaan yang fleksibel

NATM ini ditandai dengan adanya fleksibilitas dan adaptasi yang mengarah pada terowongan. Penguatan aktif bukan pasif dianjurkan untuk penguatan terhadap terowongan seperti beton yang tebal dengan kombinasi *rockbolts*, *wire mesh* dan *steel rib*.

- Menutup terowongan

Menutup terowongan ini penting dalam mengatasi perilaku tanah ketika terowongan itu masih digunakan, dan untuk terowongan yang tidak digunakan lagi.

- Menyangkut kontrak yang didasarkan pada kondisi massa batuan

Prinsip utama NATM hanya akan berhasil jika kontrak perjanjian khusus telah dibuat. Karena konsep NATM didasarkan pada pemantauan, pengukuran, perubahan dalam dukungan dan metode konstruksi. Namun ini hanya mungkin jika sistem kontrak adalah sedemikian rupa sehingga perubahan selama konstruksi diperbolehkan.

- Penentuan penyanggaan dari klasifikasi massa batuan

Klasifikasi massa batuan sangat berguna untuk menentukan apakah terowongan yang direncanakan diperlukan sistem penyangga

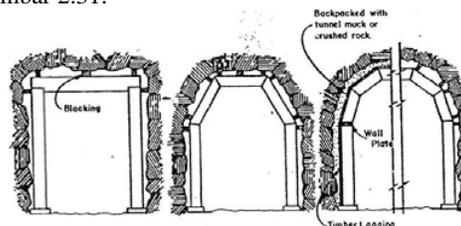
sementara atau tidak. Lauffer (1958) mengusulkan bahwa stand-up time untuk batuan tanpa penyangga sementara tergantung pada jenis batuan yang digali. Arti penting dari stand-up time adalah waktu yang dibutuhkan batuan untuk menahan beban sampai saat batuan akan mengalami keruntuhan.

## 2.3 Sistem Penyangga Untuk Perkuatan Lining Terowongan

Lubang galian yang telah di buat belum tentu mampu berdiri sendiri. Oleh karena itu dibutuhkan penyangga. Jenis-jenis penyangga yang kita ketahui antara lain :

- Penyangga kayu

Kayu dipakai sebagai penyangga pada masa-masa terowongan mulai dibangun orang. Pada masa kini kayu mulai jarang digunakan kecuali sebagai bantalan atau dalam keadaan darurat dimana tidak cukup waktu untuk mendapatkan *steel rib* atau bahan penyangga lainnya. Bentuk sederhana dari penyangga kayu adalah pemasangan seperti pada Gambar 2.31.

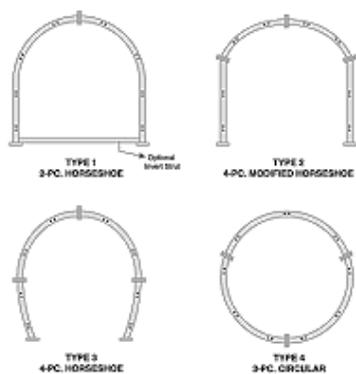


Gambar 2.31. Penyangga Kayu di Terowongan

- Penyangga baja “*steel rib*”

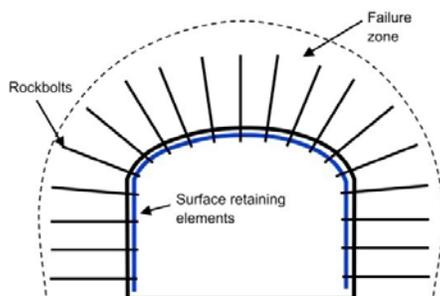
Penyanggaan dengan *steel rib* memiliki lebih banyak kelebihan dibandingkan dengan penyanggaan kayu, antara lain :

- Dengan ukuran dan profil penampang yang lebih kecil, baja memiliki kekuatan dan kekakuan yang lebih besar
- *Steel rib* dapat digunakan sebagai tulangan tambahan untuk lining beton
- Dapat dipakai sebagai perkuatan permanen. Bila hal ini yang diinginkan, maka *lining* beton tidak perlu terlalu tebal dan hanya menjadi pelindung dari korosi



**Gambar 2.32.** Steel Rib

- Penyangga baut batuan (*rock bolt*)  
Sistem penyanggaan dengan *rock bolt* (baut batuan) adalah sistem penyanggaan yang memelihara kesatuan antara massa batuan di sekeliling lubang bukaan dengan batuan induknya.  
Penggunaan *rock bolt* sebagai perkuatan/penyangga sendiri harus memperhatikan kondisi batuan. *Rock bolt* tidak dapat digunakan pada batuan atau tanah yang terlalu lunak dan sebaiknya pada batuan yang keras tidak dibutuhkan *rock bolt*.



**Gambar 2.33.** Rock Bolt

- *Shotcrete*  
*Shotcrete* didefinisikan sebagai beton atau mortar yang disemprotkan pada suatu permukaan dengan kecepatan tinggi akibat dari diberikannya suatu tekanan. Secara rinci pengaruh *shotcrete* pada pelaksanaan penggalian adalah (Pedoman Pekerjaan Terowongan Pegunungan, Komisi Terowongan-Himpunan Insinyur Sipil Jepang) :  
  1. Menjadi penyangga karena lekat dengan batuan serta memberi tahanan geser
  2. Memberi tekanan yang membatasi atau mengurangi penurunan kekuatan tanah
  3. Meneruskan beban pada rusuk baja atau *rock bolt*
  4. Melindungi permukaan terowongan dari terjadinya pemusatan tegangan
  5. Menjadi pelindung dari pelapukan, rembesan, erosi dan lainnya.

- *Precast Concrete Lining*  
Beton cetak telah sering digunakan pada kasus pembangunan subway di Eropa, Mexico, dan Jepang. Material tersebut dicetak dengan cetakan yang akurat dan dibentuk sedemikian rupa menjadi kedap air dengan *neoprene gaskets*. Beton cetak ini juga diperkuat dengan tulangan baja yang bertujuan untuk meningkatkan kemampuan memikul gaya tarik dan momen yang terjadi pada saat proses *handling*, ereksi, maupun proses majunya *shield*. Perkuatan baja juga bertujuan memikul beban permanen dari tanah.

## 2.4 Grouting

Grouting adalah suatu proses, dimana suatu cairan campuran antara semen dan air diinjeksikan dengan tekanan ke dalam rongga, pori, rekahan dan retakan batuan yang selanjutnya cairan tersebut dalam waktu tertentu akan menjadi padat secara fisika maupun kimiawi.

Menurut *Dwiyanto (2005)*, grouting adalah penyuntikan bahan semi kental (*slurry material*) ke dalam tanah atau batuan melalui lubang bor, dengan tujuan menutup diskonstruksi terbuka, rongga-rongga dan lubang-lubang pada lapisan yang dituju untuk meningkatkan kekuatan tanah. Sedangkan *Budiyanto (2000)*, menyebut grouting sebagai penginjeksian material perekat ke dalam tanah atau batuan yang lulus air dengan tujuan untuk menutup pori dan rekahan. Sedangkan bahan-bahan yang biasanya dijadikan sebagai material pengisi pada grouting diantaranya campuran semen dan air; campuran semen, abu batu dan air; campuran semen, clay dan air; campuran semen, clay, pasir dan air; asphalt; campuran clay dan air dan campuran bahan kimia.

Menurut *Pangesti (2005)*, fungsi grouting di dalam tanah atau batuan dapat dibagi menjadi 3, yaitu :

- a. Penetrasi atau Penembusan  
Grouting mengalir ke dalam rongga tanah dan lapisan tipis batuan dengan pengaruh minimum terhadap struktur asli.
- b. Kompaksi atau Pematatan  
Material grouting dengan konsistensi sangat kental dipompakan ke dalam tanah sehingga mendorong dan memadatkan.
- c. Rekah Hidrolik  
Apabila tekanan grouting lebih besar dari kuat tarik batuan atau tanah yang di grouting, akhirnya material pecah dan grouting dengan cepat menembus zona rekahan.  
Manfaat dari suatu pekerjaan grouting antara lain adalah sebagai berikut (*Dwiyanto, 2005*) :  
  - a. Menahan aliran air dan mengurangi rembesan
  - b. Menguatkan tanah dan batuan
  - c. Mengisi rongga dan celah pada tanah dan batuan sehingga menjadi padat
  - d. Memperbaiki kerusakan struktur

- e. Meningkatkan kemampuan anchor dan tiang pancang
- f. Menghindarkan dari material fluida yang dapat merusak tanah atau batuan.

### 2.5 Metode Tambahan Terowongan

Metode tambahan untuk pekerjaan terowongan dibagi menjadi 3, yaitu :

- **Metode Tambahan Untuk Stabilitas Permukaan Kerja Penggalian**

Metode tambahan untuk meningkatkan stabilitas permukaan kerja harus dipilih setelah uji yang diteliti mengenai efektivitas setiap metode tambahan, jadwal pekerjaan konstruksi terowongan dan metode pekerjaan konstruksi berdasarkan hasil penyelidikan dengan mempertimbangkan kondisi tanah dan kondisi lapangan. Yang dimaksud dengan stabilitas permukaan kerja adalah merujuk pada stabilitas daerah galian permukaan kerja termasuk permukaan kerja itu sendiri.

(a) Turap depan tipe pengisi

Turap depan tipe pengisi adalah salah satu metode tambahan yang menggunakan baut-baut, batang baja atau pipa dengan panjang kurang dari 5m yang kemudian ditekan ke dalam tanah pada sekitar lengkung depan atas, seperti terlihat pada gambar 2.51(a). Pengaruh penggunaan metode ini adalah menaikkan kekuatan geser tanah pada puncak terowongan dan menghambat proses pelepasan tanah di depan galian permukaan kerja. Batang perkuatan baja dan jarak antara batang perkuatan dengan tanah biasanya diisi dengan pasta semen atau mortar.



Sumber: JSCE : Mountain Tunnels, 2006

**Gambar 2.51.**(a)Turap depan (b) Turap depan tipe injeksi

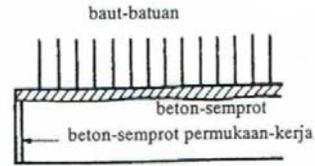
(b) Turap depan tipe injeksi

Turap depan tipe injeksi adalah metode tambahan dimana baut-baut atau pipa-pipa dengan panjang sampai dengan 5m ditekan ke dalam tanah di atas dan di depan galian permukaan kerja seperti terlihat pada gambar 2.51(b) dan pasta semen atau material injeksi kimia kemudian diinjeksi segera di bawah tekanan tertentu untuk meningkatkan kestabilan bagian puncak terowongan.

(c) Baut Permukaan Kerja

Tujuan penggunaan baut permukaan kerja adalah untuk menstabilkan permukaan kerja penggalian dengan menyangga sebagian atau keseluruhan permukaan kerja dengan baut batuan. Baut permukaan kerja seperti terlihat pada Gambar 2.52. Akan lebih efektif bila dikombinasikan dengan beton

semprot. Penggunaan injeksi pada baut batuan dimaksudkan untuk meningkatkan efektivitas perkuatan permukaan kerja. Pada penggalian mekanis, baut-baut yang terbuat dari *glass fiber reinforced plastic* (FRP) umum digunakan karena mudah dipotong.



Sumber: JSCE : Mountain Tunnels, 2006

**Gambar 2.52.** Beton Semprot Permukaan Kerja

- **Metode Tambahan Untuk Pengontrol Aliran Air Masuk**

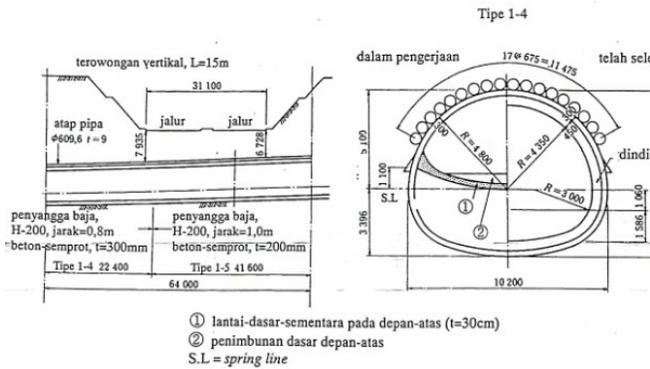
Jika kecepatan aliran air ke dalam terowongan tergolong tinggi, maka waktu menyangga sendiri permukaan kerja menjadi lebih pendek, dan akan menyebabkan masalah dalam pekerjaan penggalian terowongan, keruntuhan permukaan kerja, rendahnya daya lekat beton semprot serta rendahnya efisiensi pembuatan terowongan. Usaha-usaha sehubungan dengan pencegahan aliran air ke dalam terowongan dapat digolongkan dalam dua kategori : drainase dan penyekatan air. Sistem drainase lebih umum digunakan dibandingkan dengan penyekatan air. Sistem drainase lebih dipilih (setelah mempertimbangkan faktor hidrolika) disebabkan ketinggian air tanah tidak dapat diturunkan karena kondisi tanah dan berlebihnya air tanah.

- **Metode Tambahan Untuk Mencegah Penurunan Muka Tanah**

Metode atap pipa, metode injeksi tekan horizontal, metode turap depan pipa baja, dan metode vertikal pra-perkuatan adalah metode-metode yang umum digunakan untuk mencegah penurunan permukaan tanah akibat proses pelepasan tanah karena penggalian terowongan. Metode injeksi dan metode pembekuan juga digunakan untuk mencegah penurunan permukaan tanah yang disebabkan drainase air tanah.

(1) **Metode Atap Pipa**

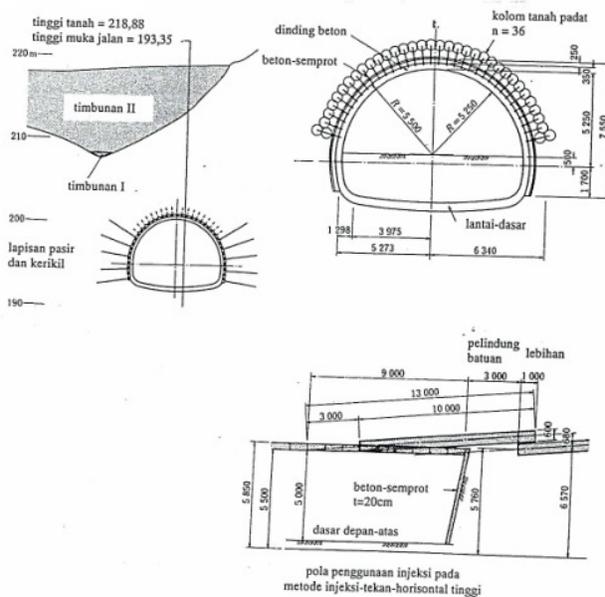
Atap pipa menekan penurunan permukaan tanah dengan memperkuat tanah sekitar terowongan menggunakan pipa kaku. Pada metode ini, pipa baja ditekan ke dalam tanah dengan bor horizontal pada sekeliling terowongan, serta celah di dalam dan luar pipa-pipa kemudian diisi dengan injeksi. Gambar 2.53 memperlihatkan sistem pipa atap berdiameter besar yang digunakan pada terowongan di bawah jalan raya bervolume lalu lintas tinggi.



Sumber: JSCE : Mountain Tunnels, 2006  
**Gambar 2.53.**Atap Pipa Berdiameter Besar

(2) **Metode Injeksi Tekan Horizontal**

Pada metode ini, daerah perkuatan berbentuk lengkungan terbentuk di dalam tanah di depan galian permukaan kerja untuk mengurangi pengaruh pelepasan tanah dan penurunan permukaan tanah. Lubang injeksi dengan kedalaman 10 sampai dengan 15 meter dibor dengan mesin tertentu. Pada saat batang bor putar ditarik perlahan, tanah pematat bertekanan tinggi diinjeksikan dari ujung batang bor, dimana kemudian kolom yang kuat, padat dan homogen terbentuk di dalam tanah. Suatu zona tanah yang diperkuat dapat dibuat dengan menempatkan sejumlah kolom sejenis sepanjang keliling terowongan. Pilihan lainnya adalah memasang pipa baja pada kolom-kolom tersebut untuk meningkatkan kekakuan kolom pada arah memanjang. Gambar 2.54 memperlihatkan penggunaan metode injeksi horizontal bertekanan tinggi pada terowongan dangkal yang terletak di bawah timbunan.



Sumber: JSCE : Mountain Tunnels, 2006  
**Gambar 2.54.**Injeksi-tekan-horisontal Tinggi

(3) **Metode Turap Depan Pipa Baja**

Metode turap depan pipa baja adalah metode yang digunakan untuk mencegah penurunan permukaan tanah dan meningkatkan daya dukung tanah menggunakan pipa baja. Pipa baja dengan diameter 50 sampai dengan 100mm ditanamkan pada keliling terowongan, kemudian material pengisi diinjeksikan dari pipa baja ke dalam tanah. Metode ini adalah kombinasi metode turap depan tipe injeksi dan metode atap pipa.

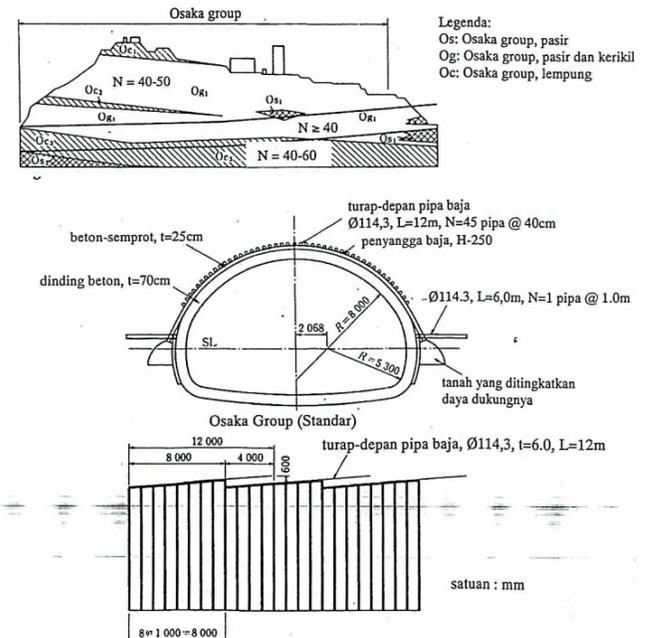
Pekerjaan turap depan pipa baja menggunakan mesin yang dirancang khusus untuk mencegah perubahan/penurunan tanah di sekitar terowongan berpenampang besar yang dibangun di bawah daerah perumahan.

(4) **Metode Pra Perkuatan Vertikal**

Yang dimaksud dengan metode pra-perkuatan vertikal adalah sekumpulan batang perkuatan yang dipancangkan vertikal atau hampir vertikal dari permukaan tanah sebelum penggalian terowongan dimulai.

(5) **Metode Injeksi**

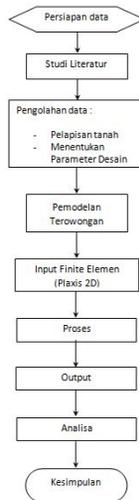
Metode injeksi terkadang digunakan untuk tujuan menambahkan aksi pelengkung pada tanah yang diperkuat dan menambah pengaruh rembesan dan konsolidasi. Gambar 2.55 adalah sebuah contoh kombinasi penggunaan pra-perkuatan vertikal dan injeksi kimiawi yang diterapkan pada tanah dimana terowongan melewati bawah perumahan dan jalan. Sistem ini digunakan untuk mencegah penurunan permukaan tanah.



Sumber: JSCE : Mountain Tunnels, 2006  
**Gambar 2.55.**Turap Depan Pipa Baja

**III. METODOLOGI PENELITIAN**

**Diagram Alir**



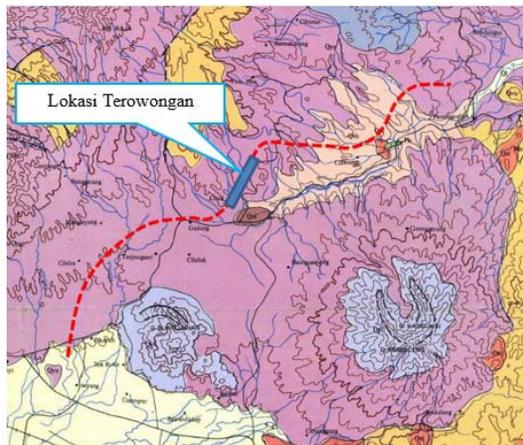
**Gambar 3.1** Diagram Alir

**IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Kondisi Geologi**

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Bandung, Jawa, 1973 yang dikeluarkan oleh Badan Geologi Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral (Gambar 4.5) kondisi geologi di lokasi terowongan merupakan hasil gunung api muda yang tidak teruraikan yang terdiri dari pasir tufaan, lapili, breksi, lava, aglomerat. Sebagian berasal dari Gunung Tangkubanperahu dan sebagian dari Gunung Tampomas. Antara Sumedang dan Bandung batuan ini membentuk dataran-dataran kecil atau bagian-bagian rata dan bukit-bukit rendah yang tertutup oleh tanah yang berwarna abu-abu kuning dan kemerahmerahan (Qyu).

Selain itu proyek tol Cisumdawu berada pada ketinggian berkisar antara 740 sampai dengan 840 m di atas permukaan laut dan memiliki sudut kemiringan lereng pada ketinggian tersebut berkisar antara 40<sup>0</sup> sampai dengan 65<sup>0</sup>.



**Gambar 4.1.** Peta Geologi Lokasi Terowongan

**Penyelidikan Geoteknik**

Data interpretasi geoteknik adalah data yang memuat informasi mengenai index dan engineering properties dari lapisan tanah disekitar konstruksi terowongan. Data-data ini digunakan dalam membuat model elemen hingga dari lapisan tanah pada analisis.

Data-data yang digunakan dalam penyelidikan geoteknik ini antara lain meliputi :

- **Uji Standar Penetration Test (SPT)**

Hasil dari pekerjaan pemboraran dalam dan SPT dapat dilihat pada Tabel 4.1

**Tabel 4.1** Hasil Uji SPT

No	Bore Hole (Sta)	Tanah Keras (m)	Jenis Tanah
1	BH-02 (STA12+050KA)	33.00	Silty clay, yellow grey, mix with limestone, nonplasticity, hard consistency
2	BH-03 (STA12+050KI)	31.00	Clayey silt, brown, hard consistency
3	BH-04 (STA12+075)	28.00	Clayey silt, yellowish brown, hard consistency
4	BH-05 (STA12+150)	34.00	Clayey silt, yellowish grey, hard consistency
5	BH-06 (STA12+250)	49.00	Boulder stone, brownish grey, strong
6	BH-07 (STA12+350)	34.00	Clayey silt, yellowish brown, hard consistency
7	BH-08 (STA12+425)	37.00	Clayey silt, yellowish brown, hard consistency
8	BH-09 (STA12+475)	31.00	Clayey silt, yellowish brown, hard consistency
9	BH-10 (STA12+575)	31.00	Boulder stone, yellowish brown, hard consistency
10	BH-11 (STA12+675)	46.00	Clayey silt, brown, hard consistency
11	BH-12 (STA12+775)	66.00	Clayey silt, yellowish brown, hard consistency
12	BH-13 (STA12+875)	61.00	Clayey silt, brown, hard consistency
13	BH-14 (STA12+975)	73.00 (25 < N < 50)	Sandy silt, yellowish brown, very stiff consistency
14	BH-15 (STA13+025)	60.00 (31 < N < 50)	Sandy silt, yellowish brown, very stiff consistency
15	BH-16 (STA13+050 KA)	54.00	Clayey silt, yellowish brown, hard consistency
16	BH-17 (STA13+050 KI)	56.00 (30 < N < 50)	Clayey silt, yellowish brown, hard consistency
17	BH-18 (STA13+075)	37.00	Clayey silt, yellowish brown, hard consistency

Berdasarkan tabel 4.1 diatas penyelidikan tanah berupa pengujian SPT dapat dilihat bahwa jenis tanah yang dominan adalah tanah lempung dan memiliki kedalaman tanah keras dengan NSPT > 50 berada di kedalaman 30-50 m. Namun pada beberapa titik pengujian terdapat NSPT<50 pada akhir kedalaman pengujian, yaitu BH-14, BH-15 dan BH-17.

• **Uji Pressuremeter**

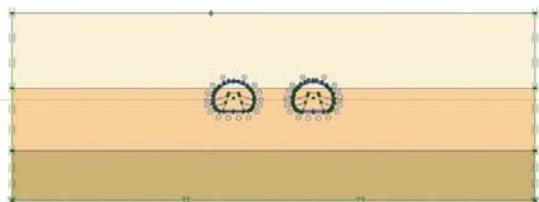
Hasildari pengujian pressuremeter dapat dilihat pada **Tabel 4.2**. Dari hasil pengujian pressuremeter dapat dilihat bahwa nilai  $P_0, P_y, P_L, E_M,$  dan  $S_u$  terbesar berada di BH-18 yaitu kedalaman 36 – 37 m.

**Tabel 4.2** Hasil Uji SPT

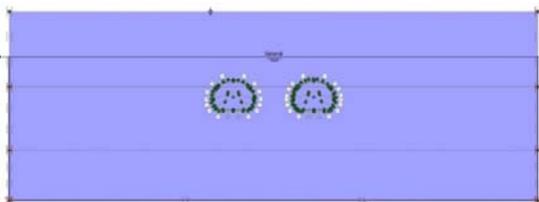
No.	Bore Hole (Sta)	Kedalaman (m)	$P_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$P_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$P_L$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_M$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$S_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )
1	BH-02	17.75-18.75	1.23	2.92	13	150.85	2.14
2	(STA 12+050 KA)	20.00-21.00	3.46	9.90	36	504.38	5.92
3	BH-03	15.00-16.00	0.88	2.72	7	72.66	1.11
4	(STA 12+025 KI)	21.00-22.00	1.07	3.66	10.5	68.70	1.71
5	BH-10	18.00-19.00	3.50	7.55	20	259.27	3.00
6	(STA 12+575)	22.00-23.00	2.20	7.57	22	367.97	3.60
7	BH-11	47.50-48.50	5.15	20.89	42	916.13	6.70
8	(STA 12+675)	28.00-29.00	4.20	8.39	45	677.23	7.42
9	BH-18	36.00-37.00	10.80	39.69	78	1447.15	12.22

Dimana :  
 $P_0$  = tegangan lateral at rest atau tegangan initial (awal) (kg/cm<sup>2</sup>), ketika membran pressuremeter menyentuh tanah.  
 $P_y$  = tegangan yield (leleh) (kg/cm<sup>2</sup>), yaitu ketika tanah mulai menjadi plastis.  
 $P_L$  = tegangan batas (kg/cm<sup>2</sup>), yaitu tegangan maksimum tanah yang dicapai dari hasil test.  
 $E_m$  = modulus tanah, (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $S_u$  = undrained shear strength, (kg/cm<sup>2</sup>)

**Pemodelan Terowongan dengan Plaxis 2D**



**Gambar 4.2.** Model Terowongan Yang Digunakan Dalam Penelitian



**Gambar 4.3.** Posisi Muka Air Tanah

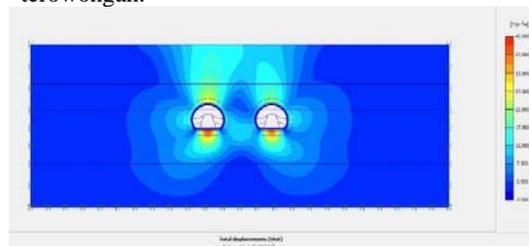
Gambar 4.2 menunjukkan pemodelan terowongan *twin tunnel* yang menjadi lokasi penelitian di titik tinjau tepatnya di Sta. 12+700. Sedangkan gambar 4.3 memperlihatkan posisi muka air tanah yang berada di kedalaman 18 m dari permukaan tanah.

Di saat pemodelan terowongan dengan Plaxis 2D, untuk pemodelan *umbrella grouting* dapat dilakukan dengan cara merubah material tanah di sekitar pemasangan *umbrella grouting*. Dengan cara merubah parameter tanah terhadap homogenesinya maka ekivalensi perubahan terhadap modulus dilakukan. Untuk menentukan nilai modulus ekivalen, dapat digunakan hays tensor homogen yang didapatkan dari penjumlahan kontribusi dua material atau dapat digunakan persamaan sebagai berikut :

$$E_i = \frac{E_g A_g + E_{tanah} A_{tanah}}{A_g + A_{tanah}}$$

Dimana :  
 $E_i$  = ekuivalen modulus elastisitas  
 $E_g$  = modulus elastisitas dari material grouting  
 $E_{tanah}$  = modulus elastisitas dari tanah  
 $A_g$  = luas grouting  
 $A_{tanah}$  = luas tanah

Hasil dari pemodelan dengan Plaxis 2D ini dapat dilihat pada Gambar 4.15. Nilai deformasi yang terjadi pada titik yang ditinjau sebesar 40 mm. Dan bila dibandingkan dengan deformasi yang terjadi berdasarkan data monitoring terowongan sebesar 33 mm terjadi di mahkota terowongan. Nilai deformasi hasil analisis dengan Plaxis 2D lebih besar bila dibandingkan dengan deformasi yang terjadi riil di lapangan. Hal ini menunjukkan bahwa perkuatan terowongan dengan *Umbrella Grouting* mampu mengurangi deformasi pada tanah disekitar mahkota terowongan.



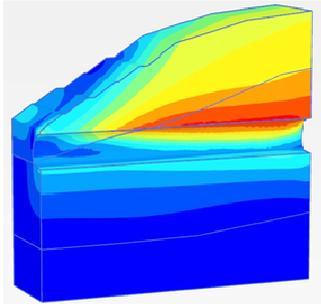
**Gambar 4.4.** Total Displacement Tanah Pada Terowongan

**Pemodelan Terowongan dengan Plaxis 3D**

Berdasarkan Laporan Akhir Analisa Sensitivitas Terowongan Pembangunan Jalan Bebas Hambatan Cisumdawu Phase 2 oleh Indra Noer Hamdhan, 2017 bahwa sebelum melakukan analisis terhadap galian terowongan, sebelumnya dilakukan analisis terhadap nilai faktor keamanan yang terjadi pada galian lereng pada bagian atas terowongan. Pada

analisis *single tunnel*, dibagi menjadi 3 (tiga) model analisis yaitu:

- **MODEL TANPA PERKUATAN**



**Gambar 4.5.** Deformasi Yang Terjadi Saat Galian Atas Terowongan 100 m Model Tanpa Perkuatan

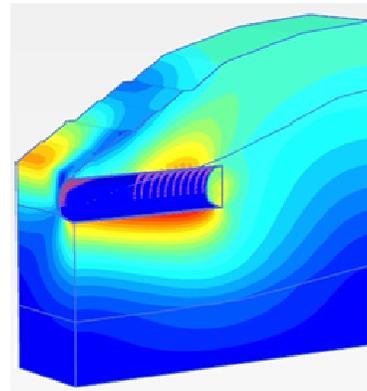
Dari hasil yang didapatkan pada pemodelan galian terowongan sedalam 100m tanpa menggunakan perkuatan apapun, nilai deformasi yang melebihi batas yang disyaratkan (20cm) terjadi saat galian terowongan bagian atas sudah mencapai kedalaman 100m. Deformasi yang melebihi batas yang disyaratkan tersebut mulai terjadi dititik tinjau C yang terletak pada kedalaman 50m hingga titik E yang terletak di kedalaman 80m.



**Gambar 4.6.** Grafik Deformasi versus Kedalaman Fase Galian Model Tanpa Perkuatan

- **MODEL A**

Dari hasil analisis deformasi pada model A, kajian terhadap nilai deformasi pada setiap fase galian menunjukkan bahwa deformasi terbesar terjadi di titik tinjau D (kedalaman 30 m) saat galian mencapai kedalaman 45.6 m. Besar deformasi tersebut yaitu 0.061m. Dari hasil analisis juga terdapat besaran deformasi yang mendekati 0.061m, dimana besarnya 0.058m dan terjadi pada saat kedalaman galian mencapai 45.6m. Besaran deformasi tersebut terjadi di titik tinjau D.

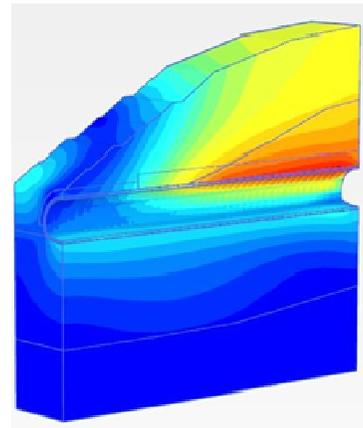


**Gambar 4.7.** Deformasi Yang Terjadi Saat Galian Atas Terowongan 48 m Model A



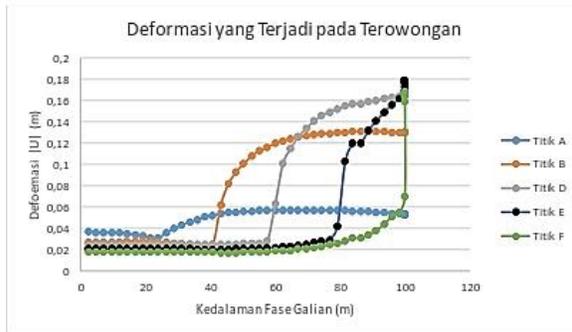
**Gambar 4.8.** Grafik Deformasi versus Tahap Galian Model A

- **MODEL B**



**Gambar 4.9.** Deformasi Yang Terjadi Saat Galian Atas Terowongan 100 m Model B

Dari hasil analisis deformasi pada model B, kajian terhadap nilai deformasi pada setiap fase galian menunjukkan bahwa deformasi terbesar terjadi di titik tinjau E (kedalaman 100m) dengan besaran deformasi mencapai nilai 0,17m.



**Gambar 4.10.** Grafik Deformasi versus Tahap Galian Model B

## V. KESIMPULAN

### Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dapat disimpulkan bahwa:

1. Pada pemodelan dengan Plaxis 2D deformasi yang terjadi pada titik tinjau di Sta. 12+700 sebesar 40 mm di daerah mahkota terowongan. Sedangkan deformasi yang terjadi riil dilapangan sebesar 33 mm.
2. Pada pemodelan dengan Plaxis 3D galian terowongan tanpa perkuatan, deformasi terbesar saat mencapai batas yang disyaratkan (20 cm) terjadi pada titik tinjau kedalaman 50m saat galian mencapai 100m.
3. Deformasi yang terjadi pada seluruh pemodelan masih termasuk dalam batas kriteria yang disarankan, dimana deformasi maksimum yang disarankan yaitu sebesar 20cm. Pada MODEL A dan MODEL B yang merupakan pemodelan galian terowongan dengan perkuatan menunjukkan besar deformasi maksimum sebesar 6mm untuk MODEL A dan 17cm untuk MODEL B.
4. Perbedaan nilai deformasi antara pemodelan terowongan dengan Plaxis 2D dan Plaxis 3D diakibatkan perbedaan parameter geoteknik yang dijadikan acuan.

### DAFTAR PUSTAKA

- Ameratunga, J., 2016. Correlation of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering. Townville:Springer.
- FHWA. 2009. Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Element. FHWA-NHI-10-034, December.
- Hardiyatmo, H., 2012. Mekanika Tanah 1. Yogyakarta : Gajah Mada University Press.
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE). 2007. Standard Specification for Tunneling – 2006 : Mountain Tunnels. Tokyo : JSCE.

Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. 2015. Metode Perencanaan Penggalian dan Sistem Perkuatan Terowongan Jalan Pada Media Campuran Tanah-Batuan.

Lambe, W.T. and R.V. Whieman., 1969. Soil Mechanics. John Wiley and Son, Inc., New York.

Muraki, Y., 1997. The Umbrella Method in Tunelling. Ph.D Thesis. Massachusetts Institute of Technology.,Massachusetts

Noer Hamdhan, Indra., 2017. Analisa Sensitivitas Terowongan Pembanguna Jalan Bebas Hambatan Cisumdawu Phase 11.

Rahardjo, Paulus P., 2016. Catatan Kuliah Teknik Terowongan. Program Magister Teknik Sipil Universitas Katolik Parahyangan.

Rahardjo, Paulus P., 2010. Teknik Terowongan. Bandung : Geotechnical Engineer Center Parahyangan Catholic University.

Tampubolon, Andar., 2007. Studi Analisis Pengaruh Pembangunan Terowongan MRT Terhadap Lingkungan Sekitar dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga. Tugas Akhir S-1 Teknik Sipil ITB