

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Definisi Terowongan

Terowongan adalah struktur bawah tanah yang mempunyai panjang lebih dari lebar penampang galiannya, dan mempunyai gradien memanjang kurang dari 15%. Terowongan umumnya tertutup di seluruh sisi kecuali di kedua ujungnya yang terbuka pada lingkungan luar. Beberapa ahli teknik sipil mendefinisikan terowongan sebagai sebuah tembusan di bawah permukaan yang memiliki panjang minimal 0,1 mil (160,9 meter), dan yang lebih pendek dari itu dinamakan *underpass*. (Paulus P. Rahardjo, 2004).

Pada umumnya bangunan terowongan dibuat untuk keperluan transportasi yang terhalang oleh kondisi alam yang ada, misalnya pada kondisi lahan perkotaan atau kondisi bawah tanah yang terdiri dari berbagai jenis lapisan, hal tersebut merupakan titik lemah dalam mendesain suatu terowongan. Transportasi yang dimaksud dapat digunakan untuk keperluan khusus, misalnya untuk angkutan hasil tambang yang dieksplorasi melalui terowongan, terowongan untuk saluran air, drainase maupun untuk keperluan pembangkit listrik, termasuk terowongan sementara untuk pengeringan (*diversion tunnel*) dan *tunnel spillway* untuk keperluan irigasi, dan keperluan transportasi manusia, baik untuk jalan kereta api maupun jalan raya. (Paulus P. Rahardjo, 2004).

2.2 Klasifikasi Terowongan

Terowongan dapat diklasifikasikan berdasarkan kondisi material di lapangan dan kegunaan.

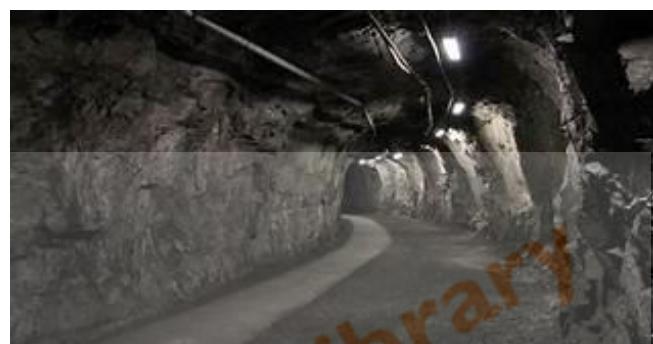
2.2.1 Terowongan Berdasarkan Material Lapangan

Berdasarkan material yang dihadapi, Paulus P Rahardjo (2004) menjelaskan terdapat 3 jenis terowongan, yaitu:

1. Terowongan batuan (*Rock Tunnel*)

Terowongan batuan dibuat langsung pada batuan massif dengan cara pemboran atau peledakan. Terowongan batuan umumnya lebih mudah dikonstruksikan daripada terowongan melalui tanah lunak

karena pada umumnya batuan dapat berdiri sendiri kecuali pada batuan yang mengalami *fracture*. Adapun Teknik *fire setting* yang menjadi alternatif peledakan. Teknik ini dilakukan dengan memanaskan dinding terowongan dengan api, lalu didinginkan dengan air. Ekspansi dan konstraksi yang cepat disebabkan oleh perubahan suhu mendadak menyebabkan potongan batu besar terputus. Klasifikasi massa batuan pada terowongan berdasarkan bentuk dan kekuatan batuan secara singkat dapat dilihat pada **Gambar 2.1.**

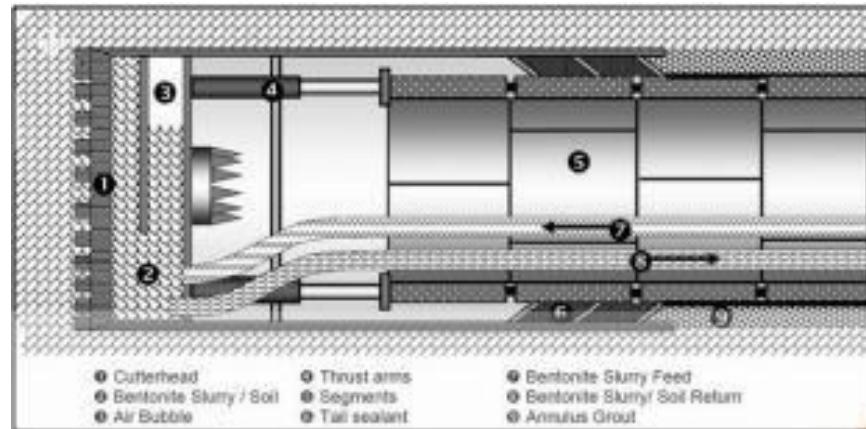


Gambar 2.1 Terowongan batuan berdasarkan kekuatan massa batuan

(Sumber: Google, 2018 Sweden Kiruna Mine Tunnel)

2. Terowongan melalui tanah lunak (*Soft Ground Tunnel*)

Terowongan melalui tanah lunak dibuat melalui tanah liat, lempung pasir, kerikil, lanau, lumpur, atau batuan lunak (*Soft Rock*). Karena jenis material ini rentan runtuh bila digali, terdapat *Stand Up Time* yang menentukan berapa lama bidang yang digali dapat berdiri sendiri dengan aman. Pada umumnya stand up time sangat singkat maka diperlukan suatu dinding atau lapisan sebagai penahan akibat proses penggalian. Umumnya digunakan pelindung (*shield*) untuk memproteksi agar galian tidak runtuh. Teknik yang umum digunakan pada saat ini adalah *shield tunneling*. Pada terowongan melalui tanah lunak ini, lining langsung dipasang dibelakang *shield* bersama dengan pergerakan maju dari mesin pembor terowongan (*Tunnel Boring Machine*).



Gambar 2.2 Tunnel Boring Machine

(Sumber: Najafi, 2016)

3. Terowongan gali – timbun (*Cut and Cover Tunnel*)

Terowongan ini dibuat dengan cara menggali sebuah *trench* pada tanah, kemudian dinding dan atap terowongan dikonstruksikan didalam galian. Galian ditimbun kembali setelah dinding dan atap terowongan dikonstruksikan dan seluruh struktur berada dibawah timbunan tanah. Tahap pembuatan *Cut and Cover Tunnel* dapat dilihat pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 Cut and Cover Tunnel

(Sumber: Ruang Sipil, 2018)

2.2.2 Terowongan Berdasarkan Kegunaan

Ditinjau berdasarkan kegunaan terowongan, Made Astawa Rai (1988) membagi menjadi 2 bagian, yaitu:

1. Terowongan Lalu – Lintas (*Traffic Tunnel*)

a. Terowongan kereta api

Terowongan yang merupakan terowongan paling penting diantara terowongan lalu – lintas.

b. Terowongan jalan raya

Terowongan yang dibangun untuk kendaraan bermotor karena pesatnya pertambahan lalu-lintas jalan raya bersamaan dengan berkembangnya industri kendaraan bermotor.

c. Terowongan pejalan kaki

Terowongan ini termasuk dalam grup terowongan jalan (*road tunnel*) tetapi penampangnya lebih kecil, jari – jari belokannya pendek dan kemiringannya besar (lebih besar dari 10%). Terowongan ini biasanya digunakan dibawah jalan raya yang ramai atau dibawah sungai dan kanal sebagai tempat menyebrang bagi pejalan kaki.

d. Terowongan navigasi

Terowongan ini dibuat untuk kepentingan lalu – lintas air di kanal-kanal dan sungai-sungai yang menghubungkan satu kanal atau sungai ke kanal lainnya.

e. Terowongan transportasi ditambang bawah tanah

Terowongan ini dibuat sebagai jalan masuk kedalam tambang bawah tanah yang digunakan untuk lalu – lintas para pekerja tambang, mengangkut peralatan tambang, mengangkut batuan dan bijih hasil penambangan. Terowongan ini dibuat menggunakan teknik serupa dengan terowongan lainnya, namun harganya lebih murah untuk dibangun. Terowongan tambang tidak seaman terowongan yang dirancang untuk pekerjaan tetap.

2. Terowongan Angkutan

a. Terowongan stasiun pembangkit listrik air

Air dialihkan atau dialirkan dari sungai atau reservoir untuk digunakan sebagai pembangkit listrik di sebuah stasiun pembangkit listrik yang letaknya lebih rendah.

b. Terowongan penyediaan air

Terowongan ini hampir sama dengan terowongan stasiun pembangkit listrik air, perbedaannya hanya pada fungsi kedua terowongan tersebut. Fungsi terowongan ini adalah menyalurkan air dari mata air ketempat penyimpanan air didalam kota atau membelokkan air ke tempat penyimpanan tersebut.

c. Terowongan saluran air kotor

Terowongan ini dibuat untuk membuang air kotor dari dalam kota ataupun dari kawasan industri ke tempat pembuangan yang sudah disediakan.

d. Terowongan yang digunakan untuk kepentingan umum

Terowongan ini biasanya ada di perkotaan untuk menyalurkan kabel listrik dan telepon, pipa gas, air dan juga pipa-pipa lainnya yang penting, dibuat dibawah saluran air, jalan raya, jalan kereta api, blok bangunan untuk memudahkan inspeksi secara kontinyu, pemeliharaan dan perbaikan sewaktu-waktu jika ada kerusakan.

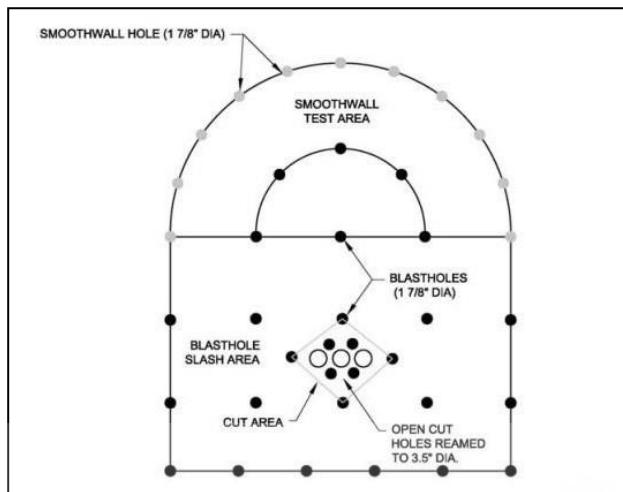
2.3 Metoda Penggalian Terowongan

Berdasarkan jenis lapisan tanah dan batuan yang berbeda-beda sehingga metode konstruksi pembuatan terowongan menyesuaikan dengan kondisi tanah yang ada di lapangan. Metode konstruksi yang lazim digunakan dalam pembuatan terowongan menurut dibagi dalam beberapa macam, yaitu :

2.3.1 Ledakan dan Bor (*Drill and Blast*)

Dahulu penggalian bawah tanah dilakukan dengan cara sederhana dan dengan alat seadanya seperti tulang, tanduk, kayu dan batu, serta dengan bantuan kekuatan fisik. Pada pertengahan 1800-an, Alfred Nobel menciptakan dinamit dan mulai membuat kemajuan signifikan dalam cara penggalian untuk aplikasi pertambangan, sipil, dan militer. Penggalian dengan metode bor dan ledakan hingga saat ini masih

banyak digunakan pada proyek-proyek pertambangan. Metode yang dilakukan adalah membuat pola lubang-lubang bor, lalu mengisi lubang-lubang itu dengan bahan peledak dan kemudian meledakan bahan peledak tersebut sehingga membuat lubang pada batu dengan pola yang sudah ditentukan (**Gambar 2.4**).



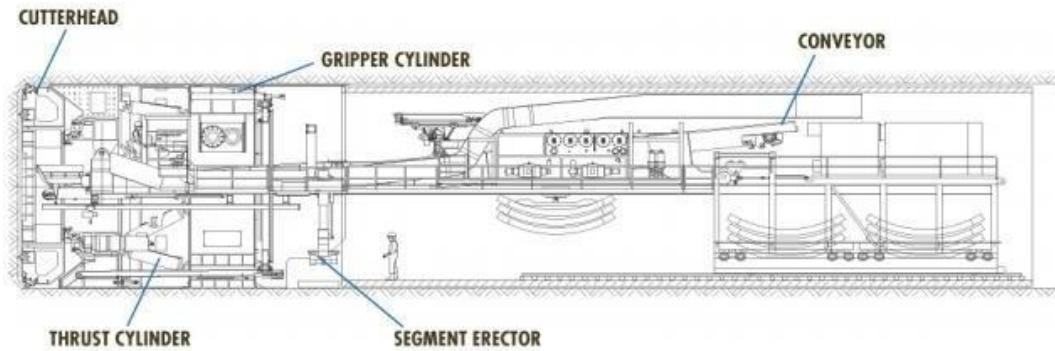
Gambar 2.4 Pola Lubang Untuk Peledakan

(Sumber: FHWA,2009)

2.3.2 Tunnel Boring Machine (TBM)

Metode *drill and blast* terus dikembangkan dengan berbagai cara, namun *progress* galian dari metode tersebut belum menunjukkan hasil yang signifikan. Kecepatan penggalian hanya beberapa meter per hari, sehingga kebutuhan akan alat pengeboran yang termekanisasi dibutuhkan untuk mencapai kecepatan penggalian yang lebih baik. Seiring perkembangan dan penelitian yang terus dikembangkan maka TBM diperkenalkan pada tahun 1960-an, saat itu TBM digunakan untuk pengeboran minyak. Beberapa kemajuan diperlihatkan tetapi masih tergolong sangat lamban karena TBM pada saat itu bergerak seakan menggiling dinding batuan pada titik yang akan digali bukan seperti menggali batuan yang sesungguhnya. Kemajuan pesat terjadi ketika diperkenalkan piringan pemotong (*disc cutter*) yang membuat batuan runtuh dengan cara memberikan gaya ke arah bidang gesernya, dan membentuk potongan-potongan batuan, sehingga kemajuan *progress* penggalian terowongan dapat mencapai 30 meter per hari. TBM dilengkapi dengan alat untuk meng-instalasi elemen penyangga awal hingga final

lining yang dibawa di bagian belakang dari *Tunnel Boring Machine* dapat dilihat pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5 Bagian dari *Tunnel Boring Machine*

(Sumber: FHWA,2009)

2.3.4 New Australian Tunneling Method

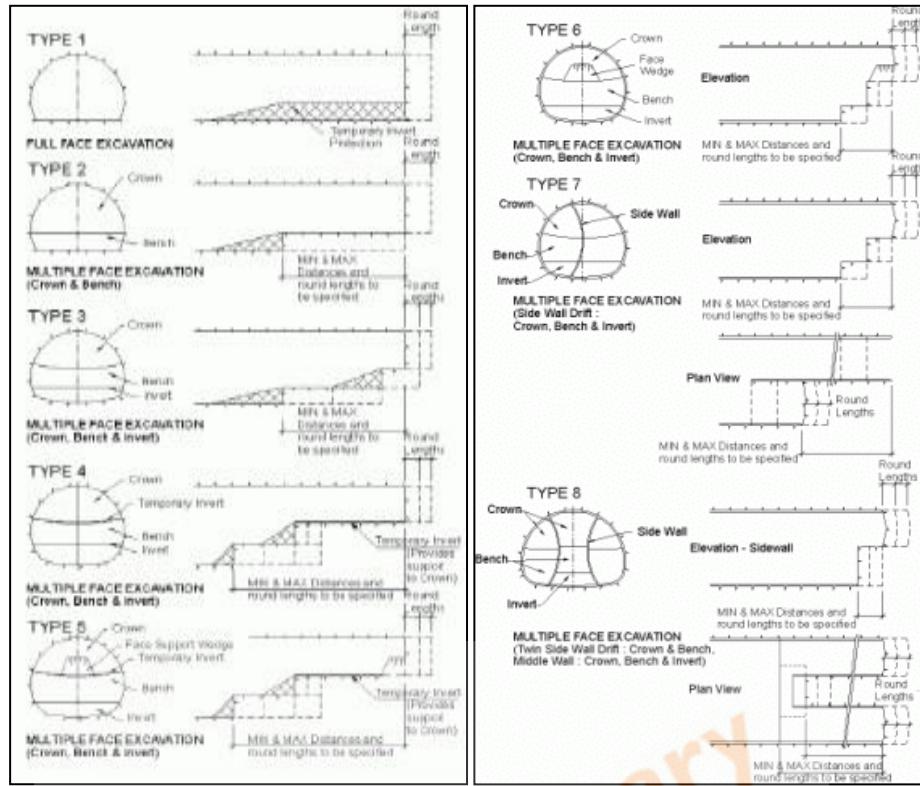
New austrian tunneling method pertama kali diakui oleh internasional yaitu pada tahun 1964. Berdasarkan kronologisnya metode NATM ini mengembangkan dari beberapa perintis yang berkontribusi penting dalam dunia terowongan. Seperti, pada abad ke-18 Sir Marc Brunel menemukan sebuah *shield* untuk menstabilkan tanah pada saat penggalian. Kontribusi penting lainnya yaitu dari seorang insinyur Jerman bernama Rziha yang memperkenalkan *steel support* untuk mengganti kayu sebagai sistem pendukung untuk men-stabilkan tekanan batuan pada terowongan. Kronologis pengembangan metode NATM lebih rinci nya dapat dilihat pada **Tabel 2.1**

Tabel 2.1 Kronologis perkembangan NATM

Years	Developments
1811	Invention of circular shield by Brunel.
1848	First attempt to use fast-setting mortar by Wejwanow.
1872	Replacement of timber by steel support by Rziha.
1908-	Invention of revolver shotcrete machine by Akeley.
1911	
1914	First application of shotcrete in coal mines, Denver.
1948	Introduction of Dual-lining system by Rabcewicz.
1954	Use of shotcrete to stabilize squeezing ground in tunnelling by Bruner.
1955	Development of ground anchoring by Rabcewicz.
1960	Recognition of the importance of a systematic measuring system by Müller.
1962	Rabcewicz introduced the New Austrian Tunnelling Method in a lecture to the XIII Geomechanics Colloquium in Salzburg.
1964	English form of the term NATM first appeared in literature produced by Rabcewicz.
1969	First urban NATM Application in soft ground (Frankfurt am Main).
1980	Redefinition of NATM due to conflict existing in the literature by the Austrian National Committee on Underground Construction of the International Tunnelling Association (ITA).
1987	First NATM in Britain at Barrow upon Soar mine

(Sumber : Sauer 1988 & Rabcewicz 1964)

NATM secara definisi menurut Sauer (1988) adalah Metode memproduksi ruang bawah tanah dengan menggunakan semua cara yang tersedia untuk memperkuat kapasitas batuan atau tanah itu sendiri sehingga dapat memberikan stabilitas pada terowongan. Prinsip dari metode konstruksi NATM adalah penggalian terowongan dengan menggunakan bantuan *shotcrete* dan *rockbolt* sebagai penyangga sebelum struktur *lining* terpasang. Pada pelaksanaannya, metode ini terdapat berbagai tipe penggalian yang dapat dilihat pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2.6 Tipe Skema Desain Penggalian NATM

(Sumber : Ahmad, 2017)

Desain penggalian terowongan dan sistem pendukung untuk pembangunan terowongan dapat menimbulkan masalah yang beragam, sehingga perlu mempertimbangkan banyak faktor untuk memilih tipe skema penggalian yang paling tepat, beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan adalah :

1. Ukuran terowongan dan geometri yang direncanakan
2. Jenis elemen pendukung yang akan digunakan
3. Kondisi tanah di lapangan
4. Mesin yang tersedia untuk melakukan pekerjaan
5. Deformasi yang diizinkan

Prinsip utama yang perlu diperhatikan dari metode konstruksi NATM ini adalah :

1. Kekuatan massa batuan di sekitarnya

Kekuatan yang melekat dari tanah atau batu di sekitar terowongan harus dipertahankan dan sengaja dimobilisasi semaksimal mungkin. Mobilisasi dapat tercapai sehingga deformasi tanah dapat dikontrol. Deformasi

berlebihan yang akan mengakibatkan hilangnya kekuatan atau penurunan permukaan yang tinggi.

2. Sistem pendukung

Sistem pendukung awal dan primer yang terdiri dari *rockbolt* dan *shotcrete* tipis semi fleksibel digunakan untuk meminimalkan deformasi yang terjadi pada saat penggalian. Contoh penggunaan sistem pendukung dapat dilihat pada **Gambar 2.7**

3. Penutup *invert*

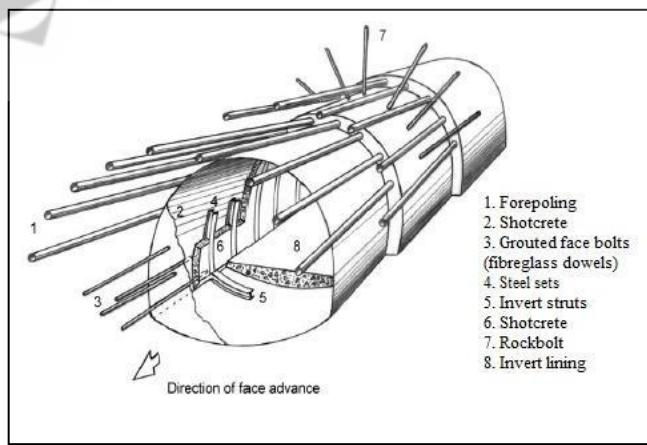
Pembuatan penutup *invert* dan membuat cincin bantalan beban harus disesuaikan dengan waktu yang tepat serta tergantung pada kondisi tanah di lapangan.

4. Tes laboratorium dan pemantauan lapangan

NATM harus dilakukan pemasangan instrumen pengukuran yang canggih yang bertujuan untuk mengetahui setiap deformasi yang terjadi akibat penggalian serta dilakukan analisis lebih lanjut.

5. Koordinasi di lapangan

Semua pekerja yang terlibat dalam pelaksanaan, desain dan pengawasan konstruksi NATM harus memahami prosedur NATM dan bereaksi secara kooperatif dalam menyelesaikan setiap masalah yang dapat terjadi.



Gambar 2.7 Detail Sistem Pendukung pada Terowongan dengan Metode NATM

(Sumber : Ahmad, 2017)

2.4 Jenis-jenis Perkuatan Terowongan

2.4.1 Steel Rib

Steel rib merupakan salah satu jenis penyangga konstruksi terowongan yang terbuat dari baja. Tipe steel rib dapat dilihat dalam **Gambar 2.8** (Singh dan Rajnish, 2006). Penyanggaan dengan steel rib memiliki lebih banyak kelebihan antara lain:

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



Gambar 2.8 Tipe Steel Rib

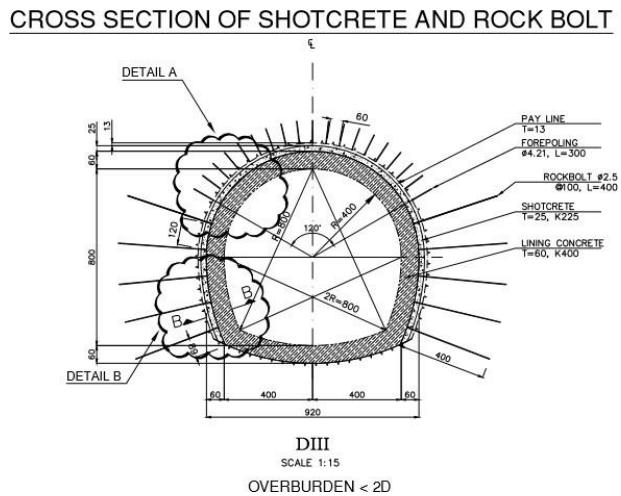
(Sumber: Singh and Rajnish, 2006)

2.4.2 Rock Bolt

Menurut Singh, 2006, *rockbolt* adalah bahan batang yang terbuat dari baja, berpenampang bulat yang digunakan untuk menyangga massa batuan. Kekuatan *rockbolt*, biasanya diukur dengan melaksanakan uji tarik (*pull test*) di lapangan. Berdasarkan Handbook of Road Power, 2006, kekuatan perkuatan ini ditentukan oleh beberapa parameter diantaranya diameter, panjang, dan jarak antar rockbolt.

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

batuan yang keras tidak dibutuhkan *rockbolt*. Berikut merupakan contoh penggambaran *rock bolt* pada **Gambar 2.9**



Gambar 2.9 Detail *Rock Bolt*, Perkuatan Terowongan Nanjung

(Sumber : BBWS Citarum 2018)

2.4.3 Shortcrete

Menurut Kolymbas, 2005, shotcrete merupakan beton yang disemprotkan untuk menambah kekuatan suatu permukaan. Beton yang digunakan sebagai shotcrete, memiliki karakteristik yang hampir sama dengan beton biasa, hanya saja, modulus elastisitas beton yang digunakan sebagai shotcrete lebih rendah daripada beton biasa. Kekuatan shotcrete bertambah seiring dengan pertambahan umur shotcrete. Ketebalan shotcrete pada konstruksi terowongan, tergantung dari luas bukaan terowongan.

Secara rinci pengaruh shotcrete pada pelaksanaan penggalian adalah (Pedoman Pekerjaan Terowongan Pegunungan, Komisi Terowongan Himpunan Insinyur Sipil Jepang) :

1. Menjadi penyangga karena lekatan 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 pemasukan tegangan
 5. Menjadi pelindung dari pelapukan, rembesan, erosi dan lainnya.

2.5 Parameter Tanah

Parameter tanah merupakan suatu bagian yang penting dalam merancang ataupun menganalisis struktur yang akan dibangun baik diperlukan tanah maupun dibawah tanah.

2.5.1 Berat Isi Tanah

Berat isi tanah merupakan salah satu sifat fisik tanah yang sering ditetapkan karena berkaitan erat dengan tingkat kepadatan tanah serta perhitungan penetapan sifat-sifat fisik tanah lainnya. Menurut Lembaga Penelitian Tanah (1979), definisi berat isi tanah adalah berat tanah utuh (*undisturbed*) dalam keadaan kering dibagi dengan volume tanah, dinyatakan dalam gr/cm³. Nilai berat isi tanah sangat bervariasi antara satu titik dengan titik lainnya karena perbedaan kandungan bahan organik, tekstur tanah, kedalaman tanah, jenis fauna tanah, dan kadar air tanah (Agus, 2006). Metode untuk menetapkan berat isi tanah dapat dikorelasikan dengan jenis tanah itu sendiri, seperti yang ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 2.2 Korelasi antara N-SPT dengan Berat Isi Tanah

Cohesionless Soil					
<i>N</i>	0–10	11–30	31–50	> 50	
Unit weight γ , kN/m ³	12–16	14–18	16–20	18–23	
Angle of friction ϕ	25–32	28–36	30–40	> 35	
State	Loose	Medium	Dense	Very dense	
Relative density D_r	see Eq. (6-3) and Eq. (6-4) since depends on $p_0 = \gamma y$				
Cohesive Soil					
<i>N</i>	< 4	4–6	6–15	16–25	> 25
Unit weight† γ , kN/m ³	14–18	16–18	16–18	16–20	> 20
q_u , kPa†	< 25	20–50	30–60	40–200	> 100
Consistency	Very soft	Soft	Medium	Stiff	Hard

† Values heavily dependent on water content.

(Sumber : Conduto, 1994)

2.5.2 Modulus Elastisitas Tanah

Modulus elastisitas tanah (Es) merupakan besarnya nilai elastisitas tanah yang merupakan perbandingan antara tegangan yang terjadi terhadap regangan. Modulus elastisitas tanah juga dapat menunjukkan tingkat kekakuan pada tanah, artinya apabila nilai modulus elastisitas semakin besar maka tanah akan semakin kaku. Nilai Modulus elastisitas tanah bisa didapatkan dari pengujian laboratorium,

yaitu dari pengujian *Triaxial*. Selain itu, nilai modulus ini bisa didapatkan dari perhitungan yang dikorelasikan dengan jenis tanah, seperti yang ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 2.3 Korelasi Nilai Modulus Elastisitas Terhadap Jenis Tanah Dan Modulus Elastisitas

Type of soil	Range of values of E (MPa or kN/m ² × 1000)
1. Clay	
(i) Very soft	2–15
(ii) Soft	5–25
(iii) Medium	15–20
(iv) Hard	50–100
(v) Sandy	25–250
2. Loess	15–60
3. Sand	
(i) Silty	5–20
(ii) Loose	10–25
(iii) Dense	50–81
4. Sand and Gravel	
(i) Loose	50–150
(ii) Dense	100–200
5. Silt	2–20

(Sumber : Bowless, 1988)

Tomlinson (2001) mengemukakan bahwa massa batuan, modulus elastisitas dapat ditentukan sebagai berikut:

$$E_M = j \times \text{modulus ratio} \times \sigma_c \quad \dots \dots \dots \quad (2.1)$$

Nilai j dapat ditentukan dengan melihat tabel di bawah ini.

Tabel 2.4 Mass Factor *j* in Eq

Discontinuity spacing (mm)	<30	30–100	>100
Mass factor <i>j</i>	0.2	0.5	0.8

(Sumber: Tomlinson, 2001)

Tabel 2.5 Typical Values of Modulus Ratio

Sedimentary	Texture			
	Coarse	Medium	Fine	Very fine
Conglomerates	Sandstones	Siltstones	Claystones	
300–400	200–350	350–400	200–300	
Breccias		Greywackes	Shales	
230–350		350	150–250 ^a	
			Marls	
			150–200	
Crystalline limestone	Sparitic limestone	Micritic limestone	Dolomite	
400–600	600–800	800–1000	350–500	
	Gypsum	Anhydrite	Chalk	
	(350) ^c	(350) ^c	1000+	

(Sumber: Tomlinson, 2001)

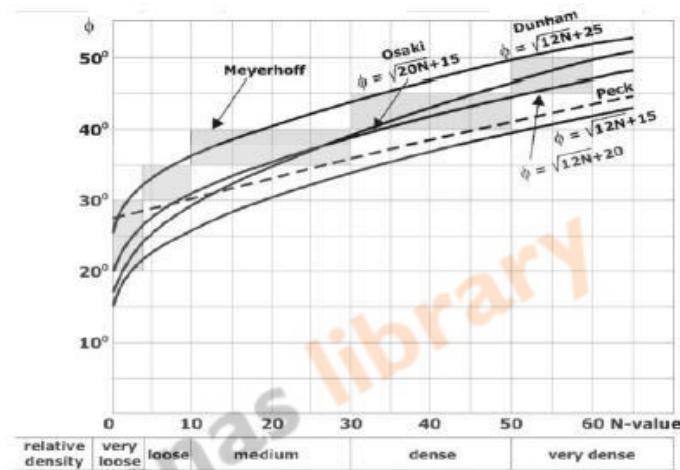
Tabel 2.6 Nilai σ_c

R4	Strong rock	Specimen requires more than one blow by geological hammer to fracture it.	50–100	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale
----	-------------	---	--------	---

(Sumber: Tomlinson, 2001)

2.5.3 Sudut Geser Dalam

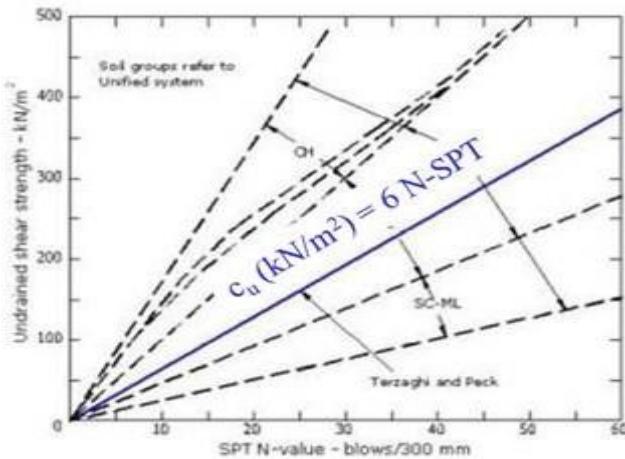
Kuat geser tanah memiliki variabel kohesi dan sudut geser dalam. Sudut geser dalam bersamaan dengan kohesi menentukan ketahanan tanah akibat tegangan yang bekerja berupa tekanan lateral tanah. Selain itu, sudut geser dalam berperan penting terhadap kekuatan tanah yang kaitannya dengan gesekan antar partikel tanah. Nilai dari sudut geser dalam didapatkan dari pengujian tanah dengan *Direct Shear Test*. Sudut geser dalam bisa di korelasikan dengan menggunakan grafik pada **Gambar 2.10** dibawah:



Gambar 2.10 Grafik Korelasi Nilai N-SPT dengan Nilai Sudut Geser Dalam Tanah

2.5.4 Kohesi Tanah

Kohesi merupakan gaya tarik menarik antar partikel tanah atau lekatan yang terjadi antar partikel tanah. Sama halnya dengan sudut geser dalam, parameter kohesi adalah parameter yang menentukan ketahanan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja, yaitu tegangan berupa gerakan lateral tanah. Deformasi ini terjadi akibat kombinasi keadaan kritis pada tegangan normal dan tegangan geser yang tidak sesuai dengan faktor aman dari yang direncanakan. Nilai dari kohesi tanah dapat diperoleh berdasarkan pengujian laboratorium, yaitu pengujian *Triaxial*. Adapun penentuan nilai kohesi berdasarkan korelasi dengan kepadatan tanah yang dapat dilihat pada **Gambar 2.11**.



Gambar 2.11 Grafik Korelasi Nilai N-SPT dengan Nilai Kohesi

(Sumber : modifikasi dari Terzaghi and Peck, 1987)

2.6 Metode Numerik (PLAXIS 2D)

Program PLAXIS 2D merupakan program yang berfungsi menganalisis deformasi dan stabilitas dua dimensi dalam rekayasa struktur dan geoteknik yang cukup kompleks. PLAXIS 2D 2017 Terdiri dari 3 subprogram mendasar yaitu *Input*, *Output*, dan *Curves*. Input digunakan untuk mengatur geometri, parameter model, dan fase perhitungan. Perangkat lunak ini pada dasarnya menggunakan metode penyelesaian *finite element method* (FEM) yang menghasilkan persamaan dari masalah yang dianalisis dengan pendekatan dari nilai yang tidak diketahui pada titik tertentu dalam sistem perhitungan yang kontinyu. Program ini terdiri dari dua mode yang berbeda yaitu Model dan *Calculation*. Model berfungsi untuk mengatur model geometri dan membuat jaring-jaring elemen hingga (*meshing*), sedangkan *calculation* mengatur suatu fase perhitungan yang merupakan tahap-tahap dari pembebanan dan konstruksi, termasuk kondisi awal yang merupakan tahap-tahap dari pembebanan dan konstruksi, serta kondisi awal geometri. Geometri dari suatu kasus geoteknik harus dibuat terlebih dahulu dalam *input* program permodelan ini. Perhitungan dapat dilakukan dengan masuk ke dalam model *calculation*. Perhitungan elemen hingga dapat dibagi menjadi beberapa rangkaian fase perhitungan. Fase perhitungan yang paling awal (*initial phase*) memperhitungkan kondisi tegang awal suatu geometri model. Setelah perhitungan awal ini, rangkaian perhitungan selanjutnya dapat dilakukan sesuai dengan analisis yang akan dilakukan.

Output digunakan untuk menampilkan hasil perhitungan. Terdapat banyak pilihan *output* untuk menampilkan hasil dari perhitungan seperti deformasi, tegangan regangan, *safety factor* dan lain lain. *Curves* berfungsi untuk melakukan plot grafik angka hasil. Program ini adalah suatu subprogram dari PLAXIS 2D untuk menampilkan kurva beban perpindahan, garis tegangan, dan diagram tegangan-tegangan.

Konsep dasar dari metode elemen hingga adalah apabila suatu sistem diberikan gaya luar, maka gaya luar tersebut diserap oleh sistem tersebut dan akan menimbulkan gaya dalam dan perpindahan. Untuk mengetahui besarnya gaya dalam dan perpindahan akibat gaya luar tersebut, perlu dibentuk suatu persamaan yang mewakili sistem tersebut. Persamaan matriksnya dapat didefinisikan sebagai berikut :

Dengan :

$\{R\}$ = Matriks Gaya Global

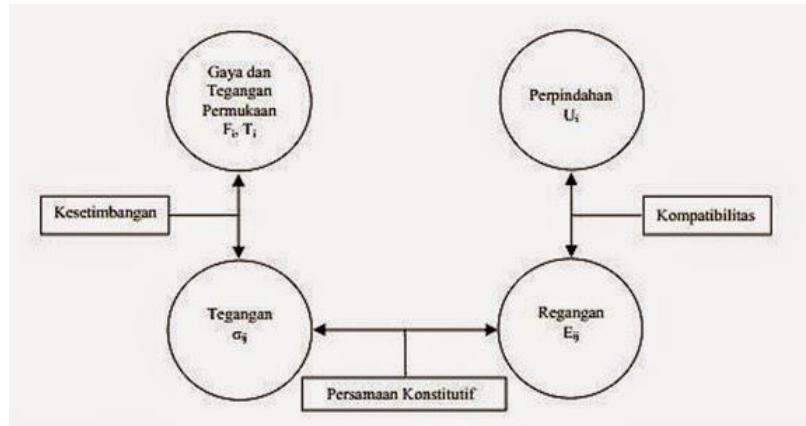
$\{D\}$ = Matriks Perpindahan Global

[K] = Matriks Kekakuan Global

Dalam proses pembentukan persamaan diatas, terdapat beberapa kondisi yang saling berhubungan dan harus dipenuhi sebagai berikut :

1. Kesetimbangan, yaitu kesetimbangan gaya-gaya yang bekerja pada setiap elemen dan keseluruhan material.
 2. Kompatibilitas, berkaitan dengan geometri dari material yaitu hubungan perpindahan dengan dan regangan.
 3. Persamaan konstitutif dari material, mengenai hubungan tegangan regangan yang merupakan kareakteristik dari material.

Hubungan dari ketiga kondisi diatas dapat dilihat pada **Gambar 2.12**.



Gambar 2.12 Hubungan Antara Variabel-Variabel dalam Penyusunan Persamaan Elemen

(Sumber : Chen dan Baladi, 1985)

Pemodelan dengan menggunakan model material *Hardening soil* dan *Hoek brown* yang mampu menganalisis perilaku tegangan-rengangan yang *non-linear* pada tanah dipilih karena merupakan model yang lebih sederhana dan sering digunakan dalam analisis geoteknik dibandingkan parameter model lainnya seperti *soft soil*, *modified cam-clay*, dan *sekiguchi-ohta*.

2.7 Stabilitas Terowongan (*Face Stability*)

Faktor penting yang perlu diperhatikan dalam proses penggalian terowongan adalah memastikan stabilitas tanah pada area galian tetap mampu bertahan hingga proses penggalian selesai dan pemasangan sistem perkuatan permanen. Stabilitas terowongan biasanya diperhitungkan sebelum proses galian dilakukan. Hal tersebut bertujuan untuk menentukan apakah perlu sistem perkuatan sementara atau tidak sebelum dilakukan pemasangan sistem perkuatan permanen.

Pertimbangan dalam memerlukan atau tidaknya sistem perkuatan sementara dilakukan dengan bermacam-macam metode. Tentunya dengan melakukan beberapa pertimbangan yang berdasarkan klasifikasi massa tanah atau batuan disekitar area penggalian terowongan. Sehingga dapat mengetahui kondisi tanah atau batuan tersebut tergolong dalam kondisi baik atau tidak.

Penggalian terowongan sesungguhnya dapat mengubah kondisi tegangan terhadap keadaan awal pada tanah dan batuan, kondisi tersebut semula berupa massa yang berada dalam keseimbangan dalam medan gravitasi. Akibat dari galian

terowongan terjadi pelepasan tegangan (*stress release*) yang menyebabkan redistribusi tegangan mula-mula sehingga terjadi regangan dan deformasi baru. Pada penggalian terowongan umumnya timbul suatu zona tegangan yang berubah. Dengan demikian akan ada peningkatan dari tegangan vertikal didepan galian yang bergerak maju pada proses penggalian.

2.8 Faktor Keamanan

Proses melakukan analisis geoteknik sangat perlu diperhatikan dalam memperhitungkan faktor keamanan suatu pekerjaan konstruksi. Khususnya dalam melakukan perhitungan faktor keamanan seringkali dibuat dengan metode analisis, salah satunya adalah dengan metode numerik.

Metode numerik dalam analisisnya yaitu, dengan mendefinisikan sebagai istilah ϕ' - c' reduction. Nilai dari ϕ' dan c' merupakan nilai yang menjadi parameter *hardening soil model* dalam program PLAXIS 2D. Metode ϕ' - c' reduction adalah mereduksi atau mengurangi nilai parameter kuat geser serta kohesi tanah hingga batas kestimbangan tercapai, hal ini berarti kekuatan yang mendorong setara dengan kekuatan yang menahan. Berikut persamaan faktor keamanan (η) dalam program PLAXIS 2D :

$$n = \frac{\tan \varphi'}{\tan \omega' - \frac{c''}{c' - \frac{c''}{\text{failure}}}} = \dots \quad (2.3)$$

Dengan :

- | | |
|----------------------------|---|
| φ' | = Sudut geser tanah |
| $\varphi' \text{ failure}$ | = Sudut geser tanah saat mengalami keruntuhan |
| c' | = Kohesi |
| $c' \text{ failure}$ | = Kohesi saat memengalami keruntuhan |

2.9 Referensi Penelitian Terkait

Penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik terowongan menjadi referensi penelitian ini dalam memperkaya tinjauan pustaka. Dari penelitian terdahulu, ditemukan banyak studi-studi yang menjadi teknik penting dalam melakukan pembangunan terowongan, baik dari standar perancangan, metode

konstruksi yang digunakan, faktor-faktor penting dalam pembangunan terowongan, serta teknik menganalisis terowongan selama waktu konstruksi dilakukan. Berikut adalah penelitian terdahulu berupa jurnal terkait dengan penelitian ini

2.8.1 Pemodelan Terowongan Pada Batuan dengan Metode *Finite Element*, Studi Kasus Terowongan *Diversion Tunnel* Rencana Bendungan Jambu Aye, Nangro Aceh Darusalam

Penelitian ini dilakukan oleh Junaida Wally yang pada saat itu merupakan mahasiswa di Jurusan Teknik Sipil, Universitas Komputer Indonesia, Bandung. Penelitian tersebut dilakukan pada tahun 2014. Penelitian ini menganalisis terowongan dengan menggunakan metode empirik serta metode numerik. Dari metode empirik tersebut dapat diperoleh *rock load*, kualitas batuan, tebal *shotcrete*, petunjuk penggalian dan penyangga, *stand-up time*, jenis *steel support*, nilai Q, panjang *rockbolt*, span maksimum dan tekanan penyangga. Sedangkan dengan analisis metode numerik hasil yang didapatkan, yaitu besarnya deformasi yang terjadi disekitar terowongan, tegangan yang bekerja disekitar terowongan, *bending moment* dan *shear force* yang bekerja pada *shotcrete*.

2.8.2 Design Considerations for Single Twin-Track Railway NATM Tunnel over Mountainous Terrain in Kenny Hill Formation

Jurnal dengan judul penelitian *Design Considerations for Single Twin-Track Railway NATM Tunnel over Mountainous Terrain in Kenny Hill Formation* ditulis oleh Esam Ahmad S. Al-Samarraee yang berasal dari University Of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia. Jurnal ini dipublikasikan melalui *ResearchGate* pada tahun 2017.

Penelitian menggambarkan metodologi dan langkah-langkah dasar untuk merancang terowongan NATM melewati medan pegunungan Bukit Kenny. Desain dan konstruksi didasarkan pada prinsip-prinsip *New Austrian Tunnelling Method* (NATM). Sistem pendukung seperti yang dirancang menggunakan *shotcrete* sementara, set baja dan batu-batuan dengan tiga langkah utama memotong tanah dan batu (*Top heading, Benching dan Invert*). Pendekatan NATM memberikan dukungan yang diperlukan untuk penggalian bentang lebar (12.1m) untuk kondisi tanah yang lemah dan bisa berubah. Sistem ini memonitor deformasi massa batuan

dan merancang sistem pendukung dengan mengacu pada jenis dan deformasi massa batuan.

Melihat lebih dekat ke detail tanah yang disiapkan dengan baik akan menjadi bantuan yang baik untuk perancang terowongan untuk menyiapkan bagian terowongan ilustratif dan representatif untuk pemodelan komputer, serta melakukan analisis regresi untuk data investigasi tanah yang luas akan menghasilkan parameter tanah demonstratif untuk formasi tanah dan batuan yang berbeda. Lapisan terowongan primer (*shotcrete* dan set baja) selanjutnya akan dinilai pada kekuatan ekstrem internal yang dihitung, menggunakan analisis struktural (Hoek, 2008), sebagai kombinasi dari tegangan yang dihasilkan pada bagian tersebut oleh suatu tekukan momen dan gaya dorong (sesuai dengan diagram interaksi), dan ini menyiratkan bahwa tidak ada retak tarik atau retak tekan beton pada elemen beton terowongan.

Fitur penting terowongan lainnya perlu diselidiki dan dirancang dengan tepat, seperti stabilitas permukaan terowongan dan portal terowongan dan lereng, karena fenomena relaksasi tanah akan terjadi karena lapisan tanah mengalami pengurangan tekanan utama yang akan mengurangi parameter kekuatan geser tanah dan itu adalah Sangat penting untuk memperkirakan pengurangan ini untuk pemeriksaan desain.

2.8.3 Analisis Terowongan Jalan Raya dengan Proteksi *Umbrella Grouting* Menggunakan Metode Elemen Hingga 2d Kasus Studi Tol Cisumdawu

Jurnal dengan judul penelitian *Analisis Terowongan Jalan Raya Dengan Proteksi Umbrella Grouting Menggunakan Metode Elemen Hingga 2D Kasus Studi Tol Cisumdawu* ditulis oleh Dendi Yogaswara yang berasal dari Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Katolik Parahyangan, Bandung. Jurnal ini dipublikasikan oleh Jurnal Sains dan Teknologi – ISTP– Volume 11 – No.02 – Oktober 2019.

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, kontruksi 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, standup 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 penellitian.

2.8.4 Evaluasi Numerik Metode Penggalian Terowongan Cisumdawu (*Numerical Evaluation of Cisumdawu Tunnel Excavation Method*).

Jurnal berjudul “Evaluasi Numerik Metode Penggalian Terowongan Cisumdawu (*Numerical Evaluation of Cisumdawu Tunnel Excavation Method*)” ini ditulis oleh Ridwan Umbara, I Gde Budi Indrawan, dan Fahmi Aldiamar pada tahun 2019 yang merupakan penelitian gabungan dari Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian PUPR, Departemen Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, dan Pusat Litbang Jalan dan Jembatan. Indonesia.

Jurnal ini menampilkan hasil penelitian yang dilakukan untuk mengevaluasi metode penggalian terowongan Cisumdawu sisi kiri (barat) menggunakan metode numerik. Menggunakan data hasil penyelidikan tapak dalam proses perancangan dan data hasil face mapping di delapan stasiun titik pengamatan, penggalian

terowongan dengan metode penggalian *bench* ganda (***bench cut multiple***), metode penggalian seluruh muka bidang galian dengan *bench* tambahan (*full face with bench cut*) dan metode penggalian diafragma tengah (*centre diaphragm*) dimodelkan secara numerik dalam dua dimensi menggunakan metode elemen hingga. Hasil pemodelan numerik dibandingkan dengan hasil pengukuran lapangan untuk menentukan metode penggalian yang paling sesuai diterapkan di terowongan Cisumdawu. Hasil penelitian menunjukkan *roof displacement* terowongan dengan metode penggalian *bench cut (multiple)* yang diperoleh dalam pemodelan numerik mendekati *roof displacement* pada pengukuran lapangan. Metode penggalian *bench cut (multiple)* yang diterapkan di lapangan menghasilkan nilai *roof displacement* lebih rendah dibandingkan metode *full face with bench cut* dan *centre diaphragm*. Namun demikian, ketiga metode penggalian tersebut masih memenuhi batasan nilai *displacement* maksimum 10 cm yang ditentukan dalam JSCE (2007) dan menghasilkan nilai *roof strength factor* $> 1,25$ yang menunjukkan terowongan dalam kondisi stabil.