

BAB II

TINJAUAN 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*. (Rahardjo, 2004).

Bangunan terowongan dibuat untuk keperluan transportasi dan pada umumnya terowongan dibangun karena kondisi alam atau kondisi perkotaan yang tidak memungkinkan untuk dibuat di atas permukaan tanah. Transportasi yang dimaksud adalah seperti untuk kendaraan, drainase, irigasi dan kereta api.

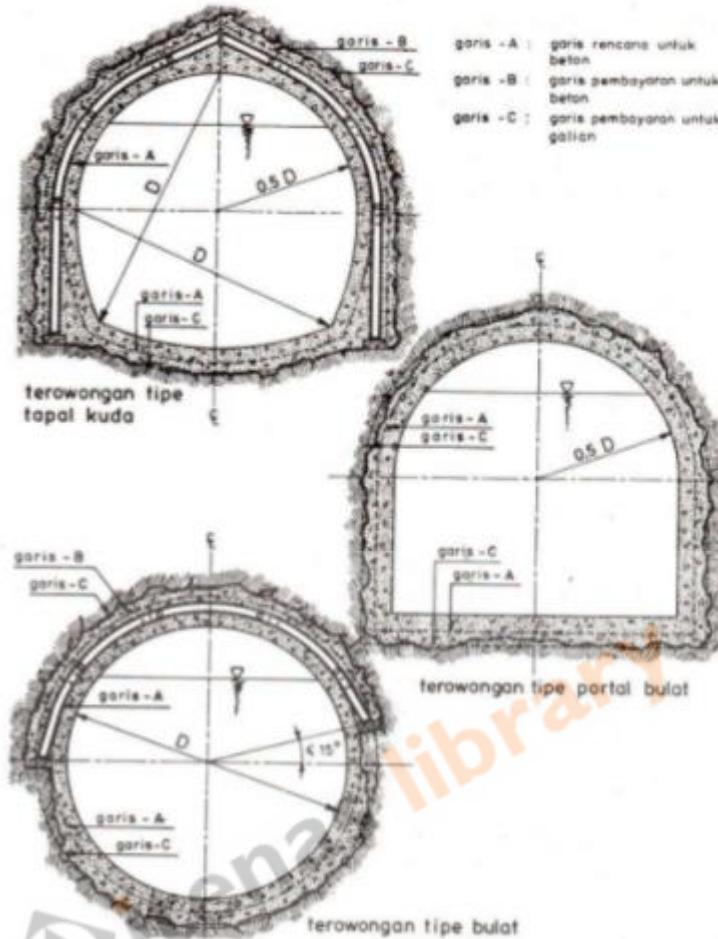
Terowongan pada umumnya dibuat menembus berbagai jenis lapisan tanah dan bebatuan sehingga terdapat beberapa metode konstruksi pembuatan terowongan yang bergantung pada keadaan tanah. Metode konstruksi yang biasanya digunakan dalam pembuatan terowongan antara lain adalah *Cut and Cover System*, *Pipe Jacking System (Micro Tunneling)*, *Tunneling Bor Machine (TBM)*, *New Austrian Tunneling Method (NATM)*, dan *Immersed-Tube Tunneling System*.

2.2 Macam-macam Bentuk Terowongan

Terdapat empat macam bentuk terowongan yang sering digunakan dalam infrastruktur di berbagai dunia, (alamysah, 2019) yaitu :

1. Terowongan lingkaran.

Terowongan bentuk ini cocok saluran atau terowongan air. Contoh seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1 Bentuk Terowongan Tapal Kuda, Terowongan Huruf D dan Terowongan Lingkaran

(Sumber :wally, 2014)

2. Terowongan tapal kuda.

Terowongan bentuk ini cocok dibangun pada lapisan tanah berjenis tanah lunak lebih cocok untuk terowongan kereta api . Contoh seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.

3. Terowongan berbentuk huruf “D”

Terowongan bentuk ini cocok untuk terowongan kereta bawah tanah (*Subways*) dan terowongan navigasi. Contoh seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.

4. Terowongan persegi.

Terowongan bentuk ini cocok dibangun pada lapisan tanah berjenis batuan keras, tingkat kesulitan dalam pembangunannya tinggi. Contoh seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2 Bentuk Terowongan Persegi

(Sumber : Wally, 2014)

2.3 Klasifikasi Terowongan

Terowongan dapat diklasifikasikan berdasarkan lokasi, kegunaan, dan kondisi material tanah di lapangan.

2.3.1 Terowongan Berdasarkan Lokasi

Terowongan berdasarkan lokasinya dibagi menjadi beberapa macam (Alamysah, 2019) yaitu:

1. Terowongan pegunungan (*Mountain Tunnels*)

Terowongan jenis ini adalah salah satu terowongan yang mempunyai peran penting ketika suatu daerah memiliki banyak pegunungan terowongan ini dibuat untuk mempermudah akses.

2. Terowongan bawah air (*Underwater Tunnels*)

Terowongan yang dibangun dibawah dasar muka air. Pada umumnya dibangun dibawah permukaan air dan biasanya dibangun di dasar sungai maupun di laut.

3. Terowongan bawah tanah perkotaan

Jaringan transportasi di Negara-negara maju banyak yang menerapkan tipe terowongan ini. Terowongan jenis ini biasanya di buat karena tingkat pertumbuhan kendaraan sangat tinggi maka akan di buat terowongan untuk memperlancar pergerakan maupun untuk mempermudah akses.

2.3.2 Terowongan Berdasarkan Kegunaan

Terowongan berdasarkan kegunaannya menurut Made Astawa Rai (1998), dibagi menjadi dua bagian, yaitu :

1. Terowongan lalu-lintas (*Traffic tunnel*)

a. Terowongan navigasi

Terowongan navigasi dibuat untuk kepentingan lalu-lintas air di kanal-kanal dan sungai-sungai yang menghubungkan satu sama lain.

b. Terowongan kereta api

Terowongan kereta api merupakan terowongan yang di bangun untuk memperpendek jarak kreta api dan mempermudah kereta api.

c. Terowongan pejalan kaki

Terowongan pejalan kaki termasuk dalam grup terowongan. Terowongan ini biasanya digunakan dibawah jalan raya yang ramai atau dibawah sungai dan kanal sebagai tempat penyebrangan.

d. Terowongan jalan raya

Terowongan jalan raya merupakan terowongan yang dibangun untuk kendaraan beremotor.

e. Terowongan transportasi ditambang bawah tanah

Terowongan ini dibuat sebagai jalan masuk kedalam tambang bawah tanah yang digunakan untuk lalu-lintas para pekerja tambang, untuk membawa hasil tambang.

2.3.3 Terowongan Berdasarkan Material di Lapangan

Terowongan berdasarkan material di lapangan, Paulus P Rahardjo (2004) membagi jadi tiga jenis terowongan, yaitu :

1. Terowongan batuan (*Rock Tunnels*)

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*.

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

Terowongan melalui tanah lunak dibuat melalui tanah lempung atau pasir atau batuan lunak (*soft rock*). Karena jenis material ini runtuh bila digali, maka dibutuhkan suatu dinding atau atap yang kuat sebagai penahan bersamaan dengan proses penggalian. Umumnya digunakan *shield* (pelindung) untuk memproteksi galian tersebut agar tidak runtuh. Teknik yang umum digunakan pada saat ini adalah *shield tunneling* pada terowongan melalui tanah lunak, *lining* langsung dipasang dibelakang *shield* bersamaan dengan pergerakan maju dari mesin bor terowongan (*Tunnel Boring Machine*).

3. Terowongan gali-timbun (*Cut and Cover Tunnels*)

Terowongan ini dibuat dengan cara menggali sebuah *trench* pada tanah, kemudian dinding dan atap terowongan dikonstruksikan di dalam galian. Sesudah itu galian ditimbun kembali dan seluruh struktur berada dibawah timbunan tanah.

2.4 Metode Konstruksi Terowongan

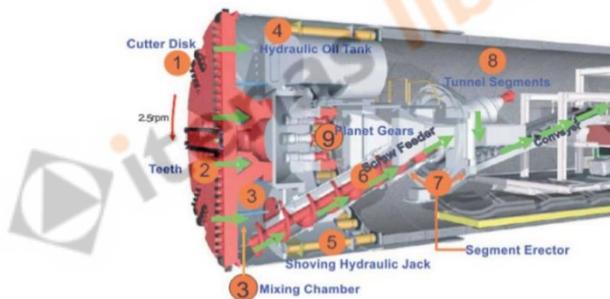
Berdasarkan jenis lapisan tanah dan batuan yang berbeda-beda membuat metode konstruksi untuk pembuatan terowongan menyesuaikan dengan kondisi yang ada di lapangan. Metode konstruksi yang lazim digunakan dalam pembuatan terowongan dibagi dalam beberapa macam, yaitu :

2.4.1 *Tunnel Bore Machine* (TBM)

Pada tahun 1818, Sir Marc Brunel mematenkan penerapan metode konstruksi yang menjadi cikal bakal metode konstruksi dengan alat *tunnel bore machine* (TBM) pada masa itu Sir Marc Brunel menemukan sebuah perisai (*shield*)

untuk menstabilkan tanah pada saat penggalian. Untuk penggunaan perangkat mesin bor pertama kali digunakan pada tahun 1881 di Folkstone, England. Untuk hak paten perangkat mesin bor diberikan kepada Mr. I. Bøhn dari Norwegia pada tahun 1919. Contoh perangkat mesin bor dari Mr. I. Bøhn Pada masa itu lah menjadi awal mula perkembangan metode konstruksi TBM secara terus menerus hingga saat ini.

Tunnel bor machine (TBM) adalah alat penggali terowongan yang bentuk mesinnya berupa silinder, sehingga penmpang terowongan yang terbentuk akan berbentuk lingkaran. Dalam suatu alat *tunnel bor machine* (TBM) terdapat bagian-bagian yang memiliki fungsinya masing-masing. TBM yang lengkap bisa mencapai panjang 300 meter yang terdiri dari alat pemotong, alat penggali, sistem kemudi, *gripper*, pengebor, pengontrol, penyokong tanah, pemasang *lining*, alat pemindah material, sistem ventilasi serta sumber tenaga. Contoh dari alat TBM dapat dilihat pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3 Tunnel Bor Machine

(Sumber : Vishal, 2016)

Prinsip dasar dari cara kerja TBM adalah menggerus tanah dan batuan dengan menggunakan putaran kepala bornya. Pada bagian depan TBM dilengkapi dengan mata bor yang tersebar di permukaan kepala bornya. Kemudian tanah hasil gerusan yang masuk ke dalam silinder yang selanjutnya akan dialirkan ke belakang melalui *screw conveyor* serta *conveyor* lainnya. Setelah penggalian selesai, barulah dilakukan pemasangan *lining* dari beton *precast* yang telah dibuat sebelumnya. Keistimewaan metode konstruksi TBM yaitu dapat bekerja dalam melakukan

pengeboran yang kondisi tanahnya berupa batuan keras (*Hard Rock*) dan juga tanah lunak (*Soft Soils*) (railsystem, 2015).

2.4.2 New Austrian Tunneling Method (NATM)

New austrian tunneling method pertama kali diakui oleh internasional yaitu pada tahun 1964. Berdasarkan kronologis nya 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** (Sauer 1988 & Rabcewicz 1964).

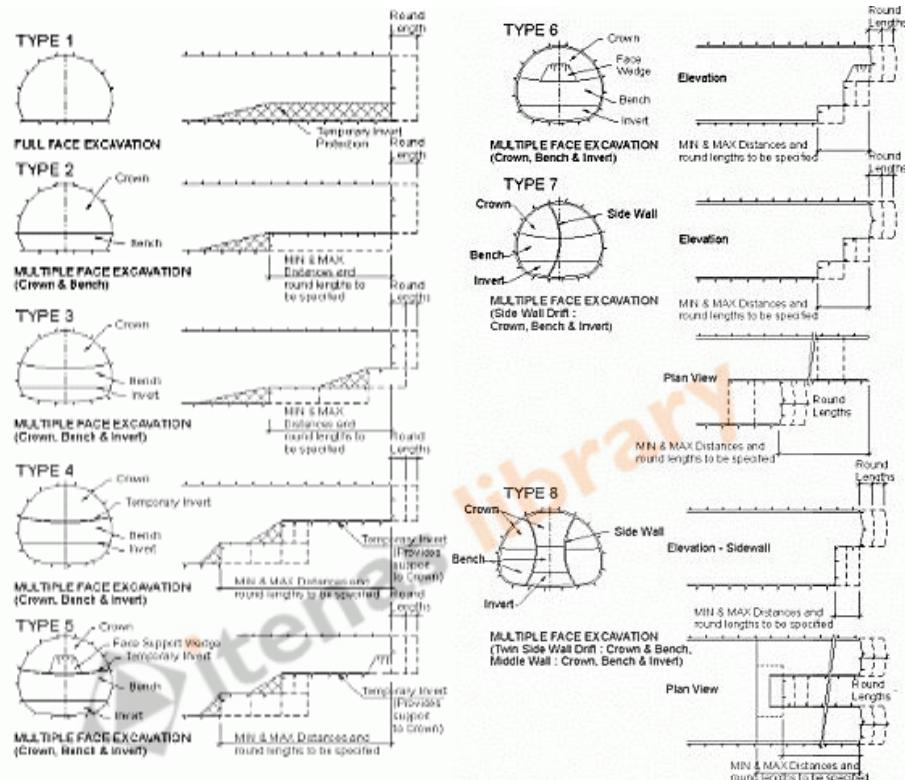
Tabel 2.1 Kronologis Perkembangan NATM

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 2.4**.



Gambar 2.4 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 (Ahmad, 2017), 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 menurut Ahmad, 2019, adalah sebagai berikut :

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 2.5**

3. Penutup *invert*

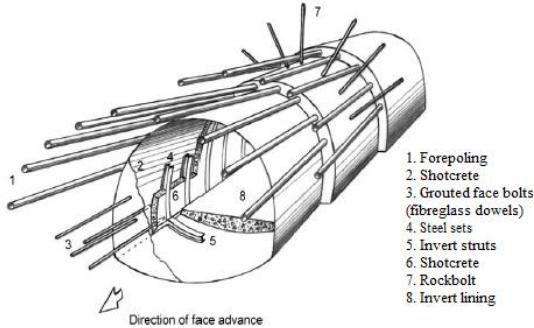
Pembuatan penutup invert dan membuat cincin bantalan beban harus disesuaikan dengan waktu yang tepat serta tergantung pada kondisi tanah di lapangan.

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 2.5 Detail Sistem Pendukung Pada Terowongan

(Sumber : Ahmad, 2017)

Komponen dan urutan eksekusi pengerjaan konstruksi metode NATM :

1. *Sealing shotcrete*

Penyemprotan *shotcrete* atau campuran beton tipis sebagai penahan lubang galian terowongan dengan tebal biasanya berkisar 25 mm hingga 50 mm dapat dilihat pada **Gambar 2.6**

2. Perbaikan *lattice girder*

Lattice girder merupakan 3 bar penguat baja yang perlu diperhatikan dan ditempatkan di tiga sudut segitiga dengan batang baja 8mm untuk koneksi. Mudah dalam menangani perbandingan rusuk baja.



Gambar 2.6 Penggunaan shotcrete

(Sumber : Hamed, 2015)



Gambar 2.7 Penggunaan *lattice girder*

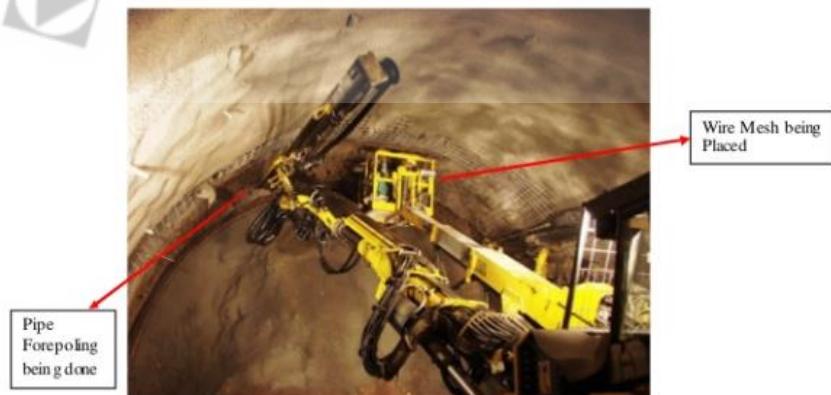
(Sumber : Hamed, 2015)

3. Perbaikan *wire mesh*

Wire mesh atau tumbukan kawat umumnya menggunakan kabel tebal 6mm seperti yang dapat dilihat seperti yang ditunjukkan pada bagian kanan **Gambar 2.8**.

4. Lapisan primer dengan *shotcrete*

Penyemprotan *shotcrete* pada masing-masing lapisan yang tidak lebih tebal dari 150 mm dapat dilihat pada **Gambar 2.9**.



Gambar 2.8 Tahapan perbaikan *wire mesh* dan *pipe forepoling*

(Sumber : Hamed, 2015)



Gambar 2.9 Tahap pemasangan primary lining dengan shotcrete

(Sumber : Hamed, 2015)

5. *Rock bolt*

Pemasangan *rock bolt* dicontohkan pada **Gambar 2.10**, pada tahapan konstruksi dengan metode NATM terdapat berbagai jenis *rock bolt* yang bisa digunakan :

1) Jenis SN

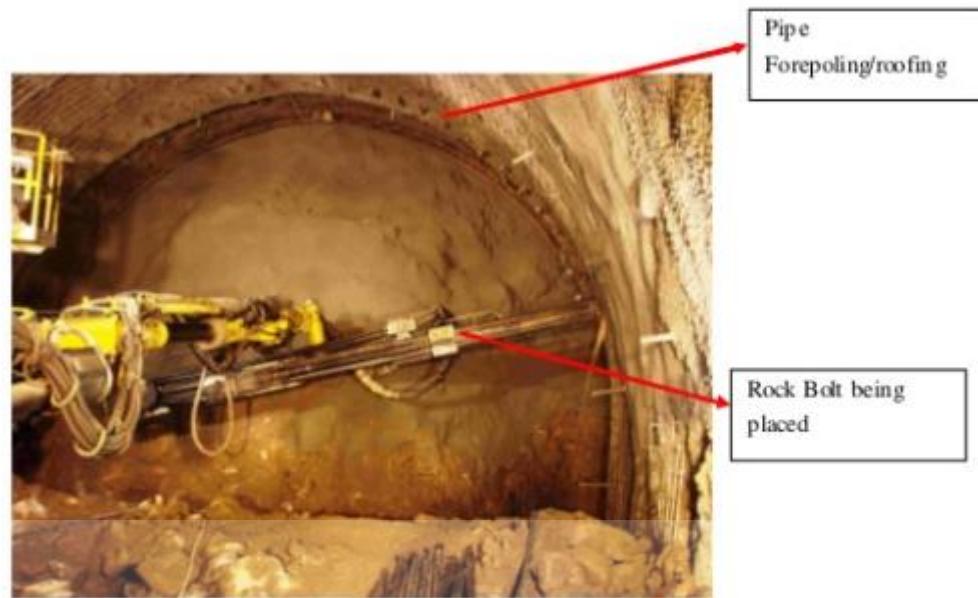
Batang baja normal untuk baja 28mm ke atas (umumnya digunakan sebagai 32mm) biasanya dengan material semen, beberapa saat kantung resin dapat digunakan untuk penjangkaran yang lebih baik.

2) SDR

Ini adalah jenis *self-bolt Rock* pengeboran dengan mengorbankan bit di awal, cocok untuk tanah yang cepat runtuh di mana lubang bor runtuh ketika gigitan bor ditarik.

3) *Rock bolt* ekspansi jenis *swellex*.

Rock bolt meningkat setelah dimasukkan dengan tekanan air untuk penjangkaran yang lebih baik.



Gambar 2.10 Tahap pemasangan *rock bolt*

(Sumber : Hamed, 2015)

6. *Pipe Forepoling*

Digunakan untuk penyangga *crown* dari terowongan untuk siklus penggalian berikutnya, dapat dilihat seperti yang ditunjukkan pada bagian kiri **Gambar 2.8**.

2.5 Parameter Tanah

Parameter tanah adalah bagian penting untuk merancang sebuah struktur bangunan maupun di atas permukaan tanah dan di bawah permukaan 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. Metode untuk menetapkan berat isi tanah dapat dikorelasikan dengan jenis tanah itu sendiri, seperti yang pada **Tabel 2.2.**

Tabel 2.2 Tabel Korelasi Antara Jenis Tanah Dengan Berat Isi Tanah

Soil Type and Unified Soil Classification (See Figure 3.3)	Typical Unit Weight, γ			
	Above Groundwater Table		Below Groundwater Table	
	(lb/ft ³)	(kN/m ³)	(lb/ft ³)	(kN/m ³)
GP—Poorly-graded gravel	110–130	17.5–20.5	125–140	19.5–22.0
GW—Well-graded gravel	110–140	17.5–22.0	125–150	19.5–23.5
GM—Silty gravel	100–130	16.0–20.5	125–140	19.5–22.0
GC—Clayey gravel	100–130	16.0–20.5	125–140	19.5–22.0
SP—Poorly-graded sand	95–125	15.0–19.5	120–135	19.0–21.0
SW—Well-graded sand	95–135	15.0–21.0	120–145	19.0–23.0
SM—Silty sand	80–135	12.5–21.0	110–140	17.5–22.0
SC—Clayey sand	85–130	13.5–20.5	110–135	17.5–21.0
ML—Low plasticity silt	75–110	11.5–17.5	80–130	12.5–20.5
MH—High plasticity silt	75–110	11.5–17.5	75–130	11.5–20.5
CL—Low plasticity clay	80–110	12.5–17.5	75–130	11.5–20.5
CH—High plasticity clay	80–110	12.5–17.5	70–125	11.0–19.5

(Sumber : Ameratunga, 1994)

2.5.2 Modulus Elastisitas Tanah

Modulus elastisitas tanah (E_s) 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* (Alamsyah, 2019). Nilai modulus ini bisa didapatkan dari perhitungan yang dikorelasikan dengan nilai N-SPT ataupun nilai Cu, seperti pada Korelasi Nilai Modulus Elastisitas Terhadap Nilai N-SPT dan Cu (Schmertmann, 1970)

Tanah pasir

$$E_s \text{ (} kN/m^2 \text{) } = 766 N \quad (2.1)$$

 $N = N\text{-SPT}$ $E_s = 2q_c$

Tanah lempung nilai modulus elastisitas pada tanah lempung sangat tergantung pada riwayat pembebanannya

Tanah lempung NC

$$Es = 250 Cu - 500 Cu \quad (2.2)$$

Tanah lempung OC

$$Es = 750 Cu - 1000 Cu \quad (2.3)$$

C_u = undrained cohesion of clayey soil

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 dikorelasikan dengan beberapa persamaan yang berdasarkan nilai N-SPT (Chen, 2004), yaitu :

1. Menurut Hatanaka dan Uchida (1996)

$$\varphi' = \sqrt{15,4(N SPT)} + 20 \quad (2.3)$$

2. Menurut Chen (2004) untuk tanah *overconsolidation*, maka

$$\varphi' = 27,5 + 9,2 \log_{10}(N SPT) \quad (2.4)$$

Keterangan :

φ' = sudut geser tanah efektif

$N SPT$ = nilai standar penetrasi test

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* (Look, 2007). Adapun penentuan nilai kohesi berdasarkan korelasi dengan kepadatan tanah yang dapat dilihat pada **Tabel 2.3**

Tabel 2.3 Tabel Korelasi Antara Kepadatan Tanah Dengan Kohesi

Type	Soil description/state	Effective cohesion (kPa)	Friction angle (degrees)
Cohesive	Soft – organic	5–10	10–20
	Soft – non organic	10–20	15–25
	Stiff	20–50	20–30
	Hard	50–100	25–30

(Sumber : Look, 2007)

2.5.5 Permeabilitas tanah

Permeabilitas tanah adalah kecepatan air menembus tanah pada periode tertentu dan dinyatakan dalam cm/jam (Foth, 1978). Sedangkan menurut Hakim dkk. (1986) permeabilitas tanah adalah menyatakan kemampuan tanah melakukan air yang bisa diukur dengan menggunakan air dalam waktu tertentu.

Faktor-faktor yang mempengaruhi permeabilitas tanah antara lain adalah tekstur tanah, porositas distribusi ukuran pori, stabilitas agregat, stabilitas struktur tanah serta kadar bahan organik (Hillel, 1971). Hubungan yang lebih utama terhadap permeabilitas tanah adalah distribusi ukuran pori sedangkan faktor-faktor yang lain hanya ikut menentukan porositas dan distribusi ukuran pori. Tanah berbutir kasar cenderung mempunyai nilai permeabilitas yang tinggi dibandingkan dengan tanah berbutir halus karena tanah berbutir kasar mempunyai pori dalam jumlah banyak. Contoh tanah berbutir kasar, yaitu tanah berjenis pasir atau gravel sedangkan tanah berbutir halus adalah lempung atau lanau (Das Braja, 2006). Berdasarkan jenis tanah nilai permeabilitas dari suatu lapisan tanah dapat dikorelasikan seperti yang disajikan pada **Tabel 2.4**.

Tabel 2.4 Tabel Korelasi Antara Jenis Tanah Dengan Nilai Permeabilitas Tanah

Soil type	<i>k</i>	
	cm/sec	ft/min
Clean gravel	100–1.0	200–2.0
Coarse sand	1.0–0.01	2.0–0.02
Fine sand	0.01–0.001	0.02–0.002
Silty clay	0.001–0.00001	0.002–0.00002
Clay	<0.000001	<0.000002

(Sumber : Das Braja, 2006)

2.6 Metode Numerik

Melakukan analisis geoteknik terdapat berbagai macam metode analisis khususnya untuk struktur bangunan terowongan yang memerlukan perhitungan deformasi tanah pada saat proses penggalian, gaya-gaya apa saja yang bekerja pada struktur terowongan, serta distribusi arah tegangan tanah.

Salah satu metode numerik yang cukup sering digunakan dan cukup sederhana yang berbasis pemrograman perangkat lunak bidang geoteknik, yaitu perangkat lunak PLAXIS. Perangkat lunak ini pada dasarnya menggunakan metode penyelesaian *finite elemen method* (FEM) yang menghasilkan persamaan dari masalah yang dianalisis dengan pendekatan dari nilai yang tidak diketahui pada titik tertentu dalam sistem perhitungan yang kontinyu (Brinkgreeve, 2018).

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 (Chen dan Baladi, 1985). Peramaan matriksnya dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$[K]\{D\} = \{R\} \quad (2.5)$$

Dengan :

$\{R\}$ = Matriks Gaya Global

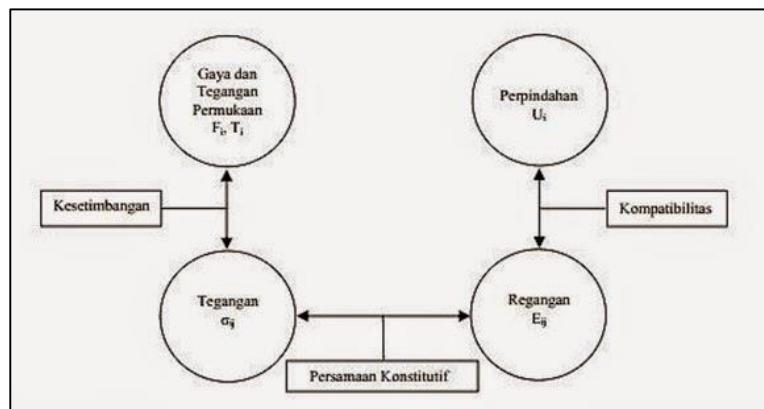
$\{D\}$ = Matriks Perpindahan Global

$[K]$ = 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 2.11**.

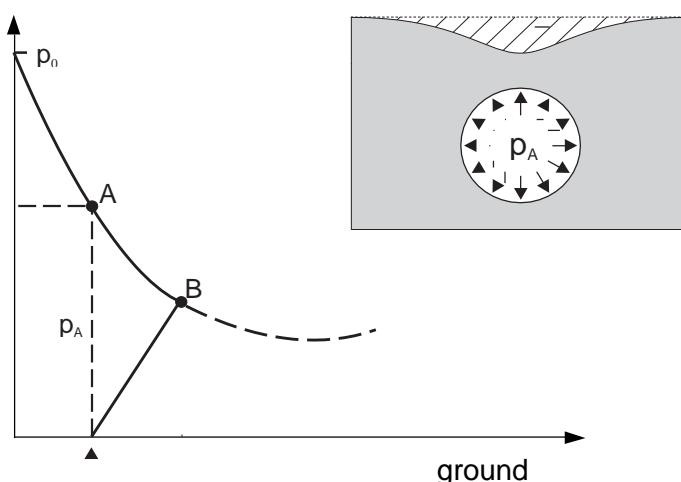


Gambar 2.11 Hubungan antara Variabel-Variabel dalam Penyusunan Persamaan Elemen Hingga

(Sumber : Chen dan Baladi, 1985)

2.7 Stress reduction method (β -Method)

Stress reduction method merupakan nilai faktor untuk mengilustrasikan efek tahapan konstruksi di lapangan (kondisi 3D) untuk dilakukan pemodelan pada *software finite element method 2D*. Karena besaran *stress reduction factor* tidak pasti sehingga (Addenbroke et al, 1997) mempertimbangkan prilaku material tanah kondisi *undrained* dengan mengilustrasikan volume deformasi yang terjadi dimana deformasi yang terjadi pada bagian *arch crown tunnel* sama dengan volume *loss* di permukaan tanah seperti yang di sajikan pada **Gambar 2.12** .



Gambar 2.12 Stress reduction method with ground loss control adopting ground response curve (Sumber : addenbroke et al. 1997)

Untuk memperoleh nilai *stress reduction factor*, beberapa literatur telah menyarankan berbagai nilai yang berbeda, baik berdasarkan pengalaman teknik dan pengukuran, asumsi teoritis atau berasal dari perbandingan perhitungan 2D dan 3D Schikora dan Fink (1982) melaporkan nilai *stress reduction factor* berada dalam kisaran $0,35 < \beta < 0,6$ untuk terowongan dengan $2 < H / D < 4$.

Laabmayr dan Swoboda (1986) memberikan nilai *stress reduction factor* dari persentase deformasi yang terjadi pada tanah di depan muka terowongan dengan persentase yang diukur di belakang muka terowongan, sampai dengan terowongan selesai dibangun. Untuk penggalian terowongan secara bertahap mereka menyarankan *stress reduction factor* $0,2 < \beta < 0,5$ untuk *top heading* dan $0,4 < \beta < 0,8$ untuk area *middle bench*. Tinjauan pustaka ini memperjelas bahwa *stress reduction factor* bervariasi dan sulit untuk mendapatkan angka yang tepat. Karena tidak hanya bergantung pada geometri penampang terowongan, panjang terowongan atau perilaku material, tetapi juga sangat bergantung pada proses konstruksi

2.8 Hardening Soil Model

Model *Hardening Soil (HS-Standard)* dirancang oleh Schanz pada tahun 1998. Menurut Schanz, *Hardening Soil Model* adalah model canggih untuk mensimulasikan perilaku yang berbeda jenis tanah, baik tanah lunak maupun tanah kaku. Saat mengalami pembebanan deviatorik primer, tanah menunjukkan penurunan kekakuan dan secara simultan terjadi peningkatan tegangan plastik. Schanz merancang model ini bertujuan untuk mereproduksi fenomena makroskopik dasar. Menurut Schanz Fenomena makroskopik yang biasa ditunjukkan oleh tanah sebagai berikut :

1. Densifikasi, yaitu penurunan volume rongga di tanah akibat deformasi plastis.
2. Kekakuan akibat tegangan, yaitu mengamati fenomena peningkatan modulus kekakuan dengan meningkatkan tingkat tegangan (tegangan rata-rata).
3. *Soil stress history*, yaitu akuntansi untuk efek prakonsolidasi.

4. *Plastic yielding*, yaitu pengembangan regangan yang tidak dapat diubah dengan mencapai kriteria keruntuhan.
5. Dilatasi, terjadinya volumetrik regangan negatif pada saat geser.

Berlawanan dengan model lain seperti *Mohr-Coulomb model*, besarnya deformasi tanah dapat dimodelkan dengan lebih akurat oleh menggabungkan tiga parameter *stiffness input*, yaitu diantaranya adalah *triaxial loading stiffness* (E_{50}), *triaxial unloading-reloading stiffness* (E_{ur}), dan *oedometer loading modulus* (E_{oed}). Keuntungan dari *Hardening Soil model* dibandingkan *Mohr-Coulomb model* bukan hanya itu penggunaan kurva tegangan-regangan hiperbolik atau kurva bi-linear, tetapi juga kontrol akibat pengaruh tingkat tegangan. Saat menggunakan model Mohr-Coulomb, pengguna harus memilih nilai tetap dari *Modulus Young* sedangkan untuk kondisi tanah sesungguhnya nilai kekakuan tersebut tergantung pada tingkat tegangan. Oleh karena itu perlu untuk memperkirakan tingkat tegangan di dalam tanah dan menggunakannya untuk mendapatkan nilai kekakuan yang sesuai (Schanz, 1998).

Ide dasar untuk formulasi *Hardening Soil model* adalah hubungan hiperbolik antara regangan vertikal (ε_1) dan tegangan deviatorik (q) dalam pembebahan triaksial primer (Bringkgreeve, 2019). Dalam pengujian *standard triaxial drained* cenderung pola keruntuhan dapat dijelaskan oleh persamaan berikut :

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{E_i} \frac{q}{1 - \frac{q}{q_a}} \quad (2.6)$$

Dengan :

q_a = Nilai asimptotik dari kuat geser

E_i = Modulus elastisitas

q = Tegangan deviatorik

Hubungan E_i dengan E_{50} dapat dilihat dilihat dari persamaan berikut :

$$= \frac{2E_{50}}{2-R_f} \quad (2.7)$$

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos\varphi - \sigma'_3 \sin\varphi}{c \cos\varphi - p_{pref} \sin\varphi} \right) m \quad (2.8)$$

Dengan :

E_{50} = Modulus elastisitas tergantung tegangan untuk pembebanan primer

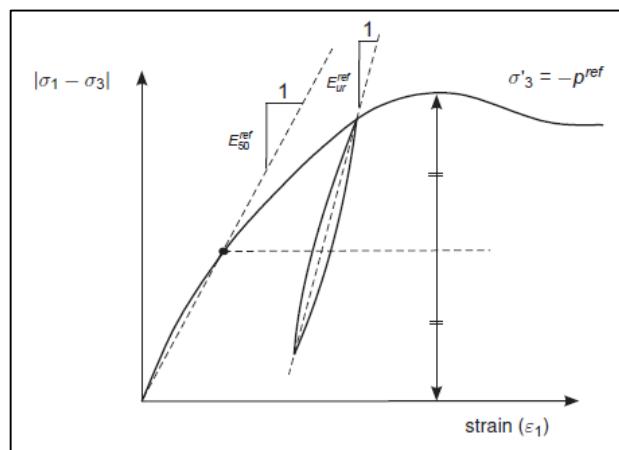
E_{50}^{ref} = Secant stiffness pada pengujian triaxial drained

c = Kohesi tanah

φ = Sudut geser tanah

σ'_3 = Tegangan pada uji triaxial

Pada PLAXIS 3D pengaturan default $P^{ref} = 100$ kN/m². Sebenarnya kekakuan tergantung pada tegangan utama minor σ'_3 , yang merupakan tegangan terbatas pada uji triaxial. Nilai E_{50}^{ref} didefinisikan untuk tegangan efektif minor dari $-\sigma'_3 = P^{ref}$ ini merupakan nilai E_{50}^{ref} pada 50% dari nilai maksimum tegangan deviatorik seperti ditunjukkan kurva pada **Gambar 2.13**. Dari kurva tersebut dapat juga didefinisikan nilai *unloading/reloading stiffness* (E_{ur}^{ref}) atau pada pengaturan awal program PLAXIS 3D mendefinisikan nilai $E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$. Selain itu, nilai tegangan tergantung kepada kekuatan m. Untuk mensimulasikan kompresi logaritmik, sebagaimana diamati untuk lempung lunak, daya harus diambil sama dengan 1. Janbu (1963), melaporkan nilai m sekitar 0,5 untuk pasir dan lumpur Norwegia, sementara Von Soos (1990), melaporkan berbagai nilai yang berbeda dalam kisaran 0,5 < m < 1.



Gambar 2.13 Definisi Nilai E_{50}^{ref} dan E_{ur}^{ref} dari Hasil Uji Triaxial Drained

(Sumber : Bringkgreeve, 2019)

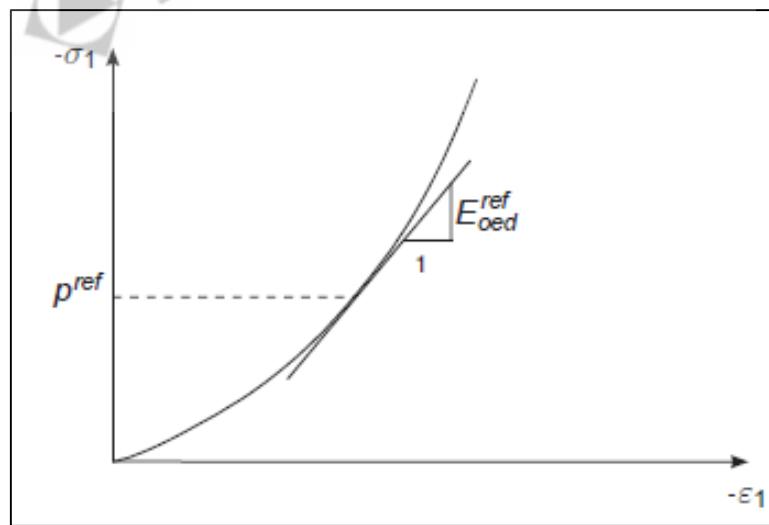
Berbeda dengan model berbasis elastisitas, model *Hardening Soil* elastoplastik tidak melibatkan hubungan tetap antara kekakuan triaksial (*undrained*) E_{50} dan oedometer kekakuan E_{oed} untuk kompresi satu dimensi (Bringkgreeve, 2019). Dengan demikian, nilai kekakuan tersebut dapat dimasukkan secara manual, dengan menggunakan persamaan (2.7) maka nilai E_{oed} dapat menggunakan persamaan berikut :

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cos\varphi - \frac{\sigma'_3}{K_0^{nc}} \sin\varphi}{c \cos\varphi - P^{ref} \sin\varphi} \right) m \quad (2.8)$$

Dengan :

E_{oed}^{ref} = Tangent stiffness dari pembebanan primer oedometer

Persamaan *tangent stiffness* dari pembebanan primer oedometer dapat didefinisikan berdasarkan kurva yang ditunjukkan pada **Gambar 2.14**. Dengan catatan nilai E_{oed}^{ref} merupakan pengaruh dari tegangan vertikal $\frac{-\sigma'_3}{K_0^{nc}} = -\sigma'_1 = P^{ref}$, dimana lebih disarankan menggunakan $-\sigma'_1$ dibandingkan $-\sigma'_3$ dengan pembebanan primer.



Gambar 2.14 Definisi Nilai E_{oed}^{ref} dari Hasil Pengujian Oedometer

(Sumber : Bringkgreeve, 2019)

2.9 Hoek-Brown model

Perilaku material batuan berbeda dengan perilaku tanah dalam arti umumnya lebih kaku dan kuat. Ketergantungan kekakuan pada tingkat tegangan hampir dapat diabaikan, sehingga kekakuan batuan dapat dianggap konstan. Di sisi lain, ketergantungan kekuatan (geser) pada tingkat tegangan adalah signifikan. Dalam hal ini, batuan bersendi berat atau lapuk dapat dianggap sebagai material gesekan. Pendekatan pertama adalah memodelkan kekuatan geser batuan dengan menggunakan kriteria kegagalan Mohr-Coulomb. Namun, dengan mempertimbangkan kisaran besar tingkat tegangan di mana batuan dapat terkena, ketergantungan-tegangan linier, seperti yang diperoleh dari model Mohr-Coulomb, umumnya tidak cukup. Selain itu, batuan juga dapat menunjukkan kekuatan tarik yang signifikan. Itu Kriteria kegagalan Hoek-Brown adalah pendekatan non-linier yang lebih baik dari kekuatan batuan. Ini melibatkan kekuatan geser serta kekuatan tarik dalam formulasi kontinu. Bersama dengan hukum Hooke tentang perilaku elastis linier isotropik, ia membentuk model Hoek-Brown untuk perilaku batuan. Model edisi tahun 2002 ini (Hoek, Carranza-Torres & Corkum, 2002) telah diimplementasikan di PLAXIS untuk mensimulasikan perilaku isotropik material jenis batuan. Implementasi model, termasuk faktorisasi kekuatan material, didasarkan pada Benz, Schwab, Vermeer & Kauther (2007).

2.8.1 Parameter Hoek-Brown

Model *Hoek-Brown* melibatkan total 8 parameter, yang umumnya akrab bagi ahli geologi dan insinyur pertambangan (Bringkgreeve, 2019). Parameter berikut dengan unit standarnya tercantum di bawah ini:

E_{rm}	: <i>The rock mass Young's modulus</i>	[kN/m ²]
ν	: <i>Poisson's ratio</i>	[$-$]
$ \sigma_{ci} $: <i>Uni-axial compressive strength of the intact rock (>0)</i>	[kN/m ²]
m_i	: <i>Intact rock parameter</i>	[$-$]
GSI	: <i>Geological Strength Index</i>	[$-$]
D	: <i>Disturbance factor</i>	[$-$]
ψ_{max}	: <i>Dilatancy angle (at $\sigma'_3 = 0$)</i>	[$^{\circ}$]

σ_ψ : Absolute value of confining pressure σ'_3 at [kN/m²]
 which

$$\psi = 0^\circ$$

m_b	: Rock mass parameter	[-]
s	: Rock mass parameter	[-]
a	: Rock mass parameter	[-]
σ_t	: Rock mass tensile strength	[kN/m ²]
σ_c	: Rock mass uni-axial compressive strength	[kN/m ²]

Kuat tekan batuan (σ_{ci}) dapat di peroleh bedasarkan pengujian batuan di laboratorium dengan diberikan beban tekan arah aksial. Nilai nilai parameter kuat tekan batuan di sajikan pada **Tabel 2.5**

Tabel 2.5 Klasifikasi *Uniaxial Compressive Strength* (σ_{ci})

Grade	Description	Field identification	σ_c or q_u (MPa)	Rock types
S1	Very soft clay	Easily penetrated several inches by fist.	<0.025	
S2	Soft clay	Easily penetrated several inches by thumb.	0.025–0.05	
S3	Firm clay	Can be penetrated several inches by thumb with moderate effort.	0.05–0.10	
S4	Stiff clay	Readily indented by thumb, but penetrated only with great effort.	0.10–0.25 ^a	
S5	Very stiff clay	Readily indented by thumbnail.	0.25 ^a –0.50 ^a	
S6	Hard clay	Indented with difficulty by thumbnail.	>0.5 ^a	
R0	Extremely weak rock	Indented by thumb nail.	0.25–1.0	Stiff fault gouge
R1	Weak rock	Crumbles under firm blows with point of geological hammer; Can be peeled by pocket knife.	1–5	Highly weathered or altered rock
R2	Weak rock	Can be peeled by a pocket knife with difficulty; Shallow indentations made by firm blow with a point of geological hammer.	5–25	Chalk, rock salt, potash
R3	Medium strong rock	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife; Specimen can be fractured with a single firm blow of a geological hammer.	25–50	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone
R4	Strong rock	Specimen requires more than one blow by geological hammer to fracture it.	50–100	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale
R5	Very strong rock	Specimen requires many blows of geological hammer to fracture it.	100–250	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff
R6	Extremely strong rock	Specimen can only be chipped by a geological hammer.	>250	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite

(Ameratunga et. al, 2016)

Parameter modulus batuan diperoleh bedasarkan macam macam jenis dan karakteristik batuan seperti yang di sajikan pada **Tabel 2.6**

Tabel 2.6 Values Modulus Ratios of Rocks

		Texture			
		Coarse	Medium	Fine	Very fine
Sedimentary	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+	
Metamorphic	Marble	Homfels	Quartzite		
	700–1000	400–700	300–450		
		Metasandstone			
		200–300			
	Migmatite	Amphibolites	Gneiss		
	350–400	400–500	300–750 ^a		
		Schists	Phyllites/Mica Schist	Slates	
		250–1100 ^a	300–800 ^a	400–600 ^a	
Igneous	Granite ^b	Diorite ^b			
	300–550	300–350			
	Granodiorite				
	400–450				
	Gabro	Dolerite			
	400–500	300–400			
	Norite				
	350–400				
	Porphyries		Diabase	Peridotite	
	(400) ^c		300–350	250–300	
		Rhyolite	Dacite		
		300–500	350–450		
		Andesite	Basalt		
		300–500	250–450		
	Agglomerate	Volcanic Breccia	Tuff		
	400–600	(500) ^c	200–400		

After Hoek and Diederichs (2006)

^aHighly anisotropic rocks: the modulus ratio will be significantly different if normal strain and/or loading occurs parallel (high modulus ratio) or perpendicular (low modulus ratio) to a weakness plane. Uniaxial test loading direction should be equivalent to field application

^bFelsic Granitoids: Coarse grained or altered (High modulus ratio), fine grained (low modulus ratio)

^cNo data available; Estimated on the basis of geological logic

(Ameratunga et. al, 2016)

Parameter klasifikasi litologi adalah parameter model empiris yang mengacu berdasarkan tipe atau jenis batuan seperti yang di sajikan pada **Tabel 2.7**.

Tabel 2.7 Lithology Classification (m_i)

Rock type	Class	Group	Texture				
			Coarse	Medium	Fine	Very fine	
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates (21±3)	Sandstones 17±4	Siltstones 7±2	Claystones 4±2	
			Breccias (19±5)		Greywackes (18±3)	Shales (6±2) Marls (7±2)	
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12±3)	Sparitic Limestones (10±2)	Micritic Limestones (9±2)	Dolomites (9±3)	
		Evaporites		Gypsum 8±2	Anhydrite 12±2		
		Organic				Chalk 7±2	
METAMORPHIC	Non foliated		Marble 9±3	Hornfels (19±4) Metasandstone (19±3)	Quartzites 20±3		
	Slightly foliated		Migmatite (29±3)	Amphibolites 26±6	Gneiss 28±5		
	Foliated*			Schists 12±3	Phyllites (7±3)	Slates 7±4	
	IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32±3	Diorite 25±5		
				Granodiorite (29±3)			
		Dark	Gabbro 27±3 Norite 20±5	Dolerite (16±5)			
	Hypabyssal		Porphyries (20±5)		Diabase (15±5)	Peridotite (25±5)	
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25±5)	Dacite (25±3)	Obsidian (19±3)	
		Pyroclastic	Agglomerate (19±3)	Andesite 25±5	Basalt (25±5)		
				Breccia (19±5)	Tuff (13±5)		

(Brinkgreeve, 2018)

Geological Strength Index (GSI) merupakan parameter batuan yang dapat diperoleh berdasarkan kondisi permukaan batuan dan kondisi struktur batuan tersebut (Brinkgreeve, 2019). Seperti yang di sajikan pada **Tabel 2.8**.

Tabel 2.8 Klasifikasi *Geological Strength Index* (GSI)

Rock type: General ▾

STRUCTURE	SURFACE CONDITIONS				POOR Slidescinded, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings with angular fragments.	VERY POOR Slidescinded, highly weathered
	VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces.	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces.	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces.			
INTACT OR MASSIVE Intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities.	90 80				N/A	N/A
BLOCKY Well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets.		70 60				
VERY BLOCKY Interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets.			50			
BLOCKY DISTURBED/SEAMY Folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity.			40 30			
DISINTEGRATED Poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces.				20		
LAMINATED/SHEARED Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes.	N/A N/A					10

(Brinkgreeve, 2018)

2.10 Studi Terdahulu

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

2.10.1 Analisis Stabilitas dan Deformasi Terowongan Kreta Cepat Indonesia dengan Pendekatan Numerik Tiga Dimensi

Dengan judul Analisis stabilitas dan deformasi terowongan kreta cepat indonesia dengan pendekatan numerik tiga dimensi ini merupakan penelitian yang ditulis oleh Rinaldi Alamysah yang berasal dari Institut Teknologi Nasional, bandung. Jurnal ini dipublikasikan oleh perpustakaan itenas

Kondisi wilayah perkotaan yang padat dengan pemukiman, perkantoran serta tempat-tempat yang memiliki tingkat kegiatan yang sangat tinggi, terowongan bawah tanah merupakan salah satu solusi yang optimal untuk mendukung perencanaan infrastruktur transportasi. Salah satu terowongan kereta cepat Indonesia dibangun yang berlokasi di Halim, DKI Jakarta dengan panjang terowongan bawah tanah 1885 m, dimensi terowongan 12,8 m dan memiliki jalur ganda (*Double Track Railway*). Analisis geoteknik terowongan kereta cepat Indonesia dilakukan untuk mengetahui stabilitas dan deformasi terowongan pada saat pelaksanaan konstruksi dan kondisi *longterm* dengan analisis dinamik. Metode penggalian terowongan yang digunakan adalah metode menggunakan alat *Tunneling Bore Machine* (TBM) dengan sistem perkuatan *lining precast* dan *grouting*. Pemodelan yang dilakukan adalah model dengan analisis statik dengan hasil deformasi terbesar 0,03056 m dan nilai faktor keamanan 1,869, serta model dengan analisis dinamik memiliki hasil deformasi terbesar 0,01362 m dan nilai faktor keamanan 1,444.

2.10.2 Pemodelan Terowongan Pada Batuan Dengan Metode *Finite Element*, Studi Kasus Terowongan *Diversion Tunnel* Rencana Bendungan Jambu Aye, Nangro Aceh Darussalam

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*.

2.10.3 Analisis Pengaruh Tebal *Lining* dan *Shotcrete* Terhadap Deformasi Pada Perkuatan Konstruksi Terowongan Kereta Cepat Jakarta- Bandung

Penelitian ini dilakukan oleh Gita Kenya yang pada saat itu merupakan mahasiswi di Jurusan Teknik Sipil, institut teknologi nasional, Bandung. Penelitian tersebut dilakukan pada tahun 2020. Terowongan merupakan salah satu moda transportasi di bawah permukaan tanah yang biasanya digunakan sebagai prasarana lalu lintas maupun pejalan kaki. Salah satu metode konstruksi yang digunakan adalah metode NATM. Metode ini sangat erat kaitannya dengan *shotcrete* dan *lining*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh deformasi yang terjadi pada beberapa kondisi dengan menggunakan Metode Elemen Hingga PLAXIS 2D. Variasi untuk mengetahui pengaruh jarak boundary pada pemodelan dilakukan dengan jarak 6D, 8D, dan 10D dimana (D) merupakan diameter dari terowongan. Pemodelan untuk mengetahui pengaruh ketebalan *shotcrete* dilakukan dengan ketebalan 0,03 m, 0,05 m, dan 0,07 m. pemodelan untuk analisis deformasi pada *lining* dilakukan dengan ketebalan 0,25 m, 0,35 m, dan 0,45 m. Deformasi yang diizinkan pada konstruksi terowongan adalah 10-20 mm pada saat konstruksi. Hasil deformasi untuk boundary 6D sebesar -0.001 m dan 0.134 x 10-3 m, sedangkan

untuk 8D sebesar -0.009 m dan $1.221 \times 10^{-3} \text{ m}$. Nilai deformasi untuk variasi ketebalan shotcrete sebesar $0,03 \text{ m}$ yaitu $1.223 \times 10^{-3} \text{ m}$, shotcrete sebesar $0,05 \text{ m}$ yaitu $1.221 \times 10^{-3} \text{ m}$, dan shotcrete sebesar $0,07 \text{ m}$ yaitu $1.219 \times 10^{-3} \text{ m}$. nilai deformasi yang terjadi pada ketiga variasi dengan ketebalan lining $0,25 \text{ m}$ yaitu $1.219 \times 10^{-3} \text{ m}$, ketebalan $0,35 \text{ m}$ yaitu $1.223 \times 10^{-3} \text{ m}$, dan ketebalan $0,45 \text{ m}$ yaitu $1.227 \times 10^{-3} \text{ m}$.

