

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*. (Paulus P. Rahardjo, 2004).

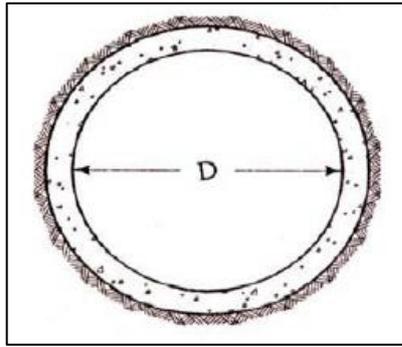
Pada umumnya bangunan terowongan dibuat untuk keperluan transportasi yang terhalang oleh kondisi alam yang ada, misalnya pada kondisi lahan perkotaan atau kondisi bawah tanah yang terdiri dari berbagai jenis lapisan hal tersebut merupakan titik lemah dalam mendesain suatu terowongan. Transportasi yang dimaksud dapat digunakan untuk keperluan khusus, misalnya untuk angkutan hasil tambang yang dieksploitasi 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.

2.2 Macam-macam Bentuk Terowongan

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

1. Terowongan lingkaran.

Terowongan bentuk ini cocok untuk menahan efek tekanan internal atau eksternal yang tinggi serta cocok untuk saluran atau terowongan air. Contoh seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2. 1 Bentuk terowongan lingkaran

(Sumber : Balasubramanian, 2017)

2. Terowongan persegi.

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

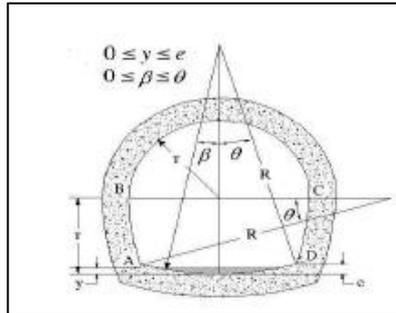


Gambar 2. 2 Bentuk terowongan persegi

(Sumber : Wally, 2014)

3. Terowongan tapal kuda.

Terowongan bentuk ini cocok dibangun pada lapisan tanah berjenis *soft soils*, lebih cocok untuk terowongan kereta api karena memiliki dimensi yang lebar. Contoh seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.3**.

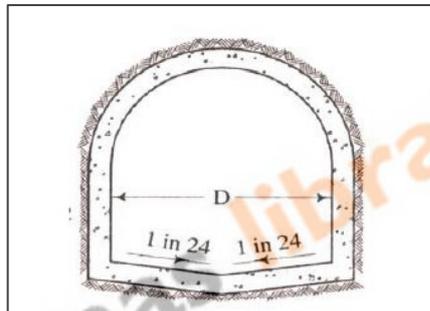


Gambar 2. 3 Bentuk terowongan tapal kuda

(Sumber : Bahmanikashkooli, 2013)

4. Terowongan berbentuk huruf “D”

Terowongan bentuk ini cocok untuk terowongan kereta bawah tanah (*Sub-ways*) dan terowongan navigasi. Contoh seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.4**.

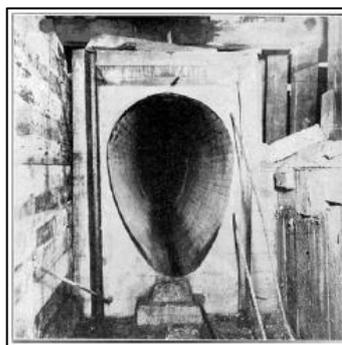


Gambar 2. 4 Terowongan bentuk huruf “D”

(Sumber : Balasubramanian, 2017)

5. Terowongan bentuk telur.

Terowongan bentuk ini sama dengan terowongan bentuk lingkaran yang mampu menahan tekanan yang tinggi dari dalam maupun dari luar terowongan. Contoh seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2. 5 Terowongan bentuk telur

(Sumber : Springer, 1916)

2.3 Klasifikasi Terowongan

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

2.3.1 Terowongan Berdasarkan Kegunaan

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

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

a. Terowongan kereta api

Terowongan kereta api merupakan terowongan yang paling penting diantara terowongan lalu-lintas lainnya.

b. Terowongan jalan raya

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

c. Terowongan pejalan kaki

Terowongan pejalan kaki 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 navigasi dibuat untuk kepentingan lalu-lintas air di kanal-kanal dan sungai-sungai yang menghubungkan satu kanal atau sungai ke kanal lainnya. Disamping itu juga dibuat untuk menembus daerah pegunungan untuk memperpendek jarak dan memperlancar lalu-lintas air.

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 dengan menggunakan teknik serupa seperti jenis terowongan lainnya, namun harganya lebih murah untuk dibangun.

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 yang letaknya lebih rendah. Terowongan ini dapat dikategorikan pada suatu grup utama berdasarkan kegunaannya.

b. Terowongan penyediaan air

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

c. Terowongan saluran air kotor

Terowongan ini dibuat untuk membuang air kotor dari kota atau pusat industri ke tempat pembuangan yang sudah disediakan.

d. Terowongan yang bisa digunakan untuk kepentingan umum

Terowongan ini biasanya dibuat di daerah perkotaan untuk menyalurkan kabel listrik dan telepon, pipa gas dan 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 kalau ada kerusakan.

2.3.2 Terowongan Berdasarkan Lokasi

Terowongan berdasarkan lokasinya dibagi menjadi beberapa macam, yaitu :

1. Terowongan pegunungan (*Mountain Tunnels*)

Terowongan jenis ini adalah salah satu terowongan yang mempunyai peran penting ketika suatu daerah memiliki topografi yang beragam, sehingga perlu adanya terowongan yang dibangun menembus sebuah bukit maupun gunung.

2. Terowongan bawah air (*Underwater Tunnels*)
Terowongan yang dibangun dibawah dasar muka air. Pada umumnya dibangun dibawah dasar dan sungai atau laut. Perhitungannya lebih kompleks, selain ada tekanan tanah juga terdapat tekanan air yang besar.
3. Terowongan bawah tanah perkotaan (*Tunnels at Shallow Depth and Water City Streets*)
Jaringan transportasi di Negara-negara maju seperti Amerika, Inggris, dan Jepang banyak yang menerapkan tipe terowongan ini. Terowongan jenis ini sangat cocok untuk dibangun di perkotaan. Baik itu untuk transportasi maupun saluran drainase kota.

2.3.3 Terowongan Berdasarkan Material di Lapangan

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

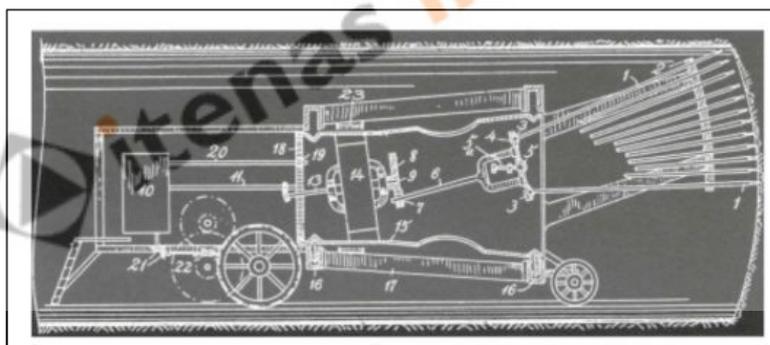
1. Terowongan batuan (*Rock Tunnels*)
Terowongan batuan dibuat langsung pada batuan massif dengan cara pemboran atau peledakan. Terowongan batuan umumnya lebih mudah dikonstruksikan daripada terowongan melalui tanah lunak karena pada umumnya batuan dapat berdiri sendiri kecuali pada batuan yang mengalami *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 sehingga metode konstruksi pembuatan terowongan menyesuaikan dengan kondisi tanah yang ada di lapangan. Metode konstruksi yang lazim digunakan dalam pembuatan terowongan dibagi dalam beberapa macam, yaitu :

2.4.1 *Tunnel Bore Machine (TBM)*

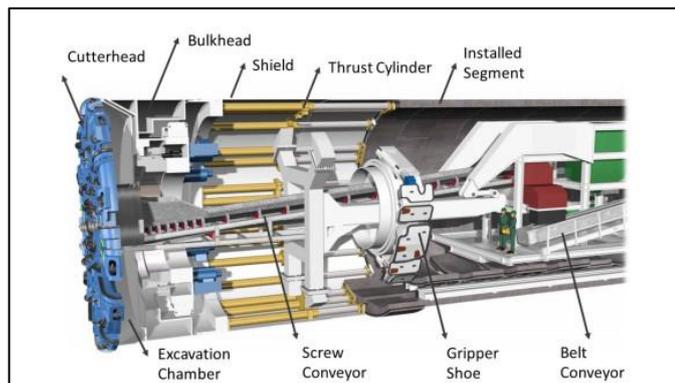
Pada tahun 1818, Sir Marc Brunel mematenkan penerapan metode konstruksi yang menjadi cikal bakal metode konstruksi dengan alat *tunnel bore machine (TBM)* pada masa itu Sir Marc Brunel menemukan sebuah perisai (*shield*) untuk menstabilkan tanah pada saat penggalian. Untuk penggunaan perangkat mesin 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 dapat dilihat pada **Gambar 2.6**. Pada masa itu lah menjadi awal mula perkembangan metode konstruksi TBM secara terus menerus hingga saat ini.



Gambar 2. 6 Perangkat mesin bor Mr. I. Bøhn

(Sumber : Bruland, 2000)

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 2.7**.



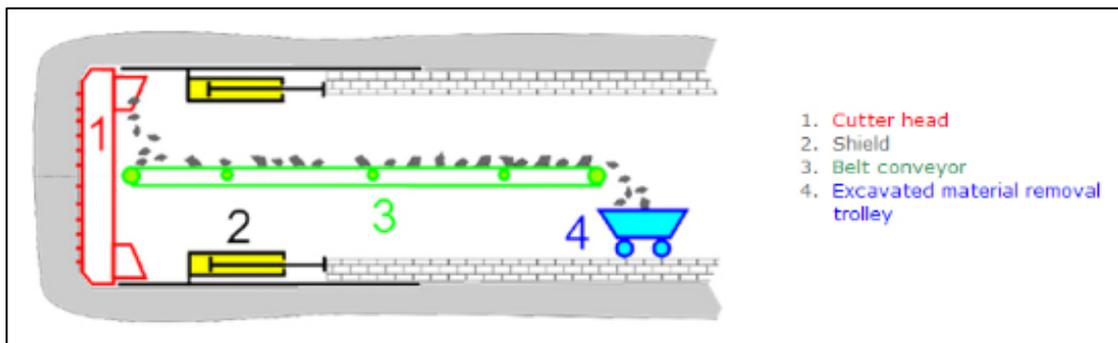
Gambar 2. 7 Tunnel Bor Machine

(Sumber : Railsystem, 2015)

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*), berikut adalah perbedaan sistem alatnya :

1. *Hard Rock Tunnel Bore Machine*

Prinsip dasar TBM dari penggalian jenis tanah batuan keras adalah penggunaan *cutting head* yang dilengkapi dengan *cutters* yang sesuai di bagian *tunnel face*. *Cutting head* diputar dengan kecepatan konstan dan dorongan ke *tunnel face* yang dilakukan oleh system pendorong hidrolik yang dijangkarkan ke sisi-sisi tunnel dengan *hydraulic rams*. *Cutting head* membuat tegangan tekan sehingga terjadi retakan pada dinding batu, yang akhirnya menyebabkan batu terlepas dari dinding galian. Batu yang digali ditransfer melalui bukaan di *cutting head* ke conveyor belt untuk dialihkan keluar terowongan. Gambaran dari alur galian *hard rock* TBM dapat dilihat pada **Gambar 2.8**.



Gambar 2. 8 Alur galian *hard rock* TBM

(Sumber : Railsystem, 2015)

Pada tanah keras Tipe TBM dapat menggunakan dua tipe yaitu, tipe terbuka atau tidak memiliki perisai (*shield*) dan tipe terlindung atau dengan perisai (*shield*). Untuk tipe TBM terbuka membiarkan area di belakang *cutting head* terbuka tanpa menggunakan perisai. Sebagai gantinya, batu ini dipegang dengan menggunakan metode pendukung tanah seperti balok cincin, *rockbolt*, sabuk *shotcrete*, tali baja, *ring steel* dan *wire mesh* (Stack 1995). Contoh alat TBM yang digunakan pada tanah batuan keras dapat dilihat pada **Gambar 2.9**.



Gambar 2. 9 *Hard rock tunnel bore machine*

(Sumber : Terratec, 2014)

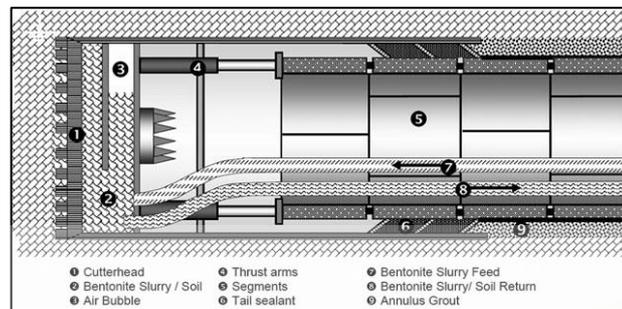
2. *Softground Tunnel Bore Machine*

Pada pengeboran dengan alat TBM pada tanah lunak ada dua tipe utama yang digunakan dalam pelaksanaannya, yaitu :

a. *Slurry Shield Bore Machine*

Mesin bor dengan jenis *slurry shield* ini menggunakan campuran air dan bentonit (*slurry mixture*) yang bertekanan tinggi dengan cara meng-

injeksikan bahan tersebut kedalam ruang yang menutupi *working face*. Besarnya tekanan dapat diatur dari pengukur tekanan dan keran kontrol dalam sistem per-pipa. Akibat dari tekanan yang disalurkan, tanah yang berada di depan *tunnel face* terpenetrasi oleh *slurry mixture* dan menjadi cukup padat. Kemudian, hasil dari galian material tanah akan terkumpul dibagian bawah lalu selanjutnya dipompa keluar. Tampak dari jenis mesin bor tipe *slurry shield bore machine* dapat dilihat pada **Gambar 2.10**.

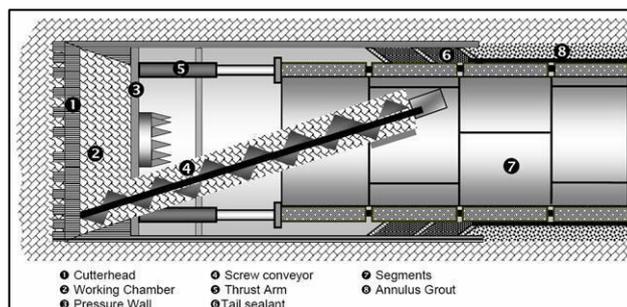


Gambar 2. 10 Mesin TBM dengan tipe *slurry shield bore machine*

(Sumber : Najafi, 2016)

b. *Earth Pressure Balance Shield Machine* (EPB)

Mesin bor dengan jenis ini digunakan pada tanah lunak di bawah muka air tanah tanpa menggunakan *slurry mixture*. Prinsip kerja dari alat ini adalah dengan cara menyeimbangkan antara tekanan tanah (*earth pressure*) dan air tanah pada dinding galian dengan tekanan pada *excavation chamber*. Tekanan pada *excavation chamber* dikendalikan dengan mengatur kecepatan pergerakan penggalian mesin TBM dan kecepatan *screw conveyor* dalam mengalihkan tanah galian dari dalam *excavation chamber* untuk dikeluarkan. Tampak dari mesin bor jenis EPB ini dapat dilihat pada **Gambar 2.11**.



Gambar 2. 11 Mesin TBM dengan tipe *earth pressure balance*

(Sumber : Najafi, 2016)

2.4.2 New Austrian Tunneling Method (NATM)

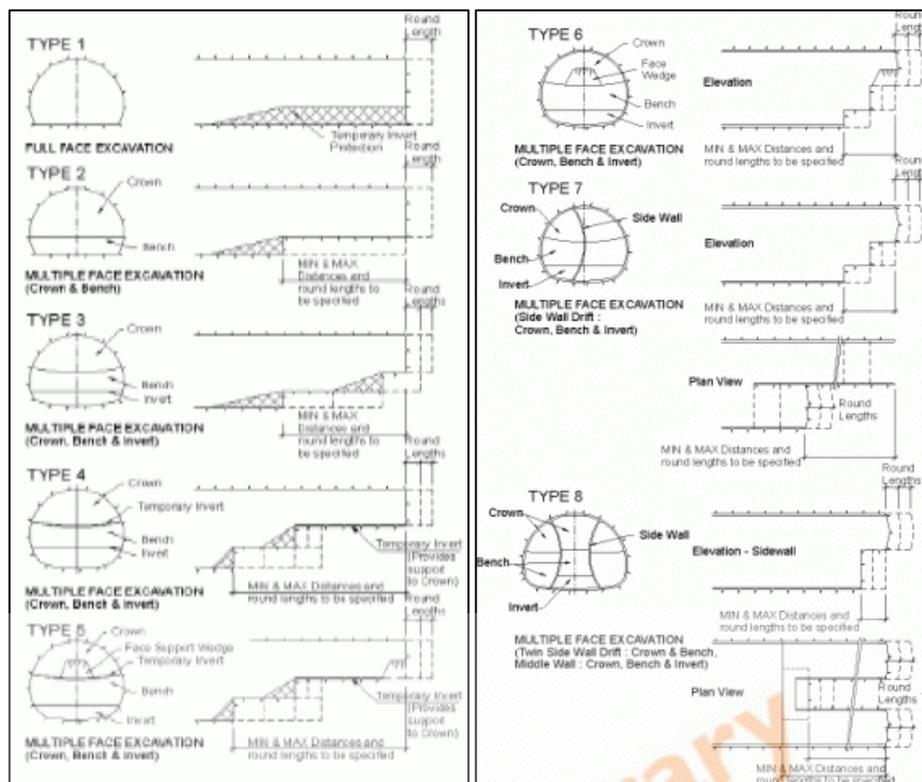
New austrian tunneling method pertama kali diakui oleh internasional yaitu pada tahun 1964. Berdasarkan kronologis nya metode NATM ini mengembangkan dari beberapa perintis yang berkontribusi penting dalam dunia terowongan. Seperti, pada abad ke-18 Sir Marc Brunel menemukan sebuah *shield* untuk menstabilkan 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**

Tabel 2. 1 Kronologis perkembangan NATM

(Sumber : Sauer 1988 & Rabcewicz 1964)

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 Brunel.
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

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 2.12**.



Gambar 2. 12 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**.

3. Penutup *invert*

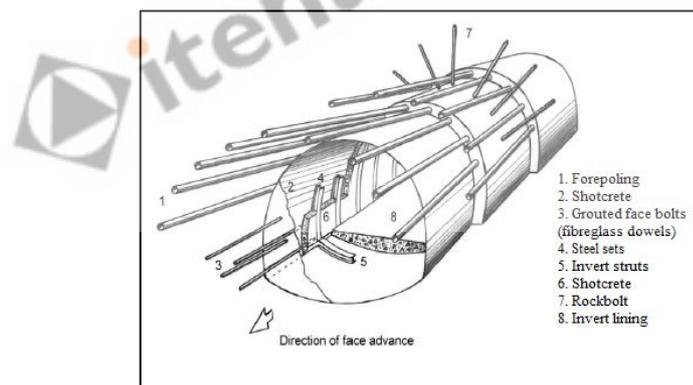
Pembuatan penutup invert dan membuat cincin bantalan beban harus disesuaikan dengan waktu yang tepat serta tergantung pada kondisi tanah di lapangan.

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. 13 Detail sistem pendukung pada terowongan dengan metode NATM

(Sumber : Ahmad, 2017)

2.5 Parameter Tanah

Parameter tanah merupakan suatu bagian yang penting dalam merancang ataupun menganalisis struktur yang akan dibangun baik dipermukaan 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/cm^3 . 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 2.2**.

Tabel 2. 2 Tabel korelasi antara jenis tanah dengan berat isi tanah
(Sumber : Conduto, 1994)

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

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*. Selain itu, nilai modulus ini bisa didapatkan dari perhitungan yang dikorelasikan dengan nilai N-SPT ataupun nilai Cu, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2**.

- Tanah Pasir
 $E_s \text{ (kN/m}^2\text{)} = 766 N \quad ; N = \text{N-SPT}$
 $E_s = 2q_c$
- Tanah Lempung
 Nilai modulus elastisitas pada tanah lempung sangat tergantung pada riwayat pembebanannya.
Tanah Lempung NC
 $E_s = 250 Cu - 500 Cu$
Tanah Lempung OC
 $E_s = 750 Cu - 1000 Cu \quad ; Cu = \text{Undrained cohesion of clayey soil}$

Gambar 2. 14 Korelasi nilai modulus elastisitas terhadap nilai N-SPT dan Cu
 (Sumber : Schmertmann, 1970)

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 beberapa persamaan yang berdasarkan nilai N-SPT, yaitu :

1. Menurut Hatanaka dan Uchida (1996)

$$\varphi' = \sqrt{15,4(N - SPT)} + 20 \dots\dots\dots(2.1)$$

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

$$\varphi' = 27,5 + 9,2 \log_{10}(N - SPT) \dots\dots\dots(2.2)$$

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 **Tabel 2.3**

Tabel 2.3 Tabel korelasi antara kepadatan tanah dengan kohesi

(Sumber : Look, 2007)

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

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 melalukan 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. 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
(Sumber : Das Braja, 2006)

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

2.6 Metode Numerik (PLAXIS 3D)

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 3D. 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.

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. Peramaan matriksnya dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$[K]\{D\} = \{R\} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dengan :

$\{R\}$ = Matriks Gaya Global

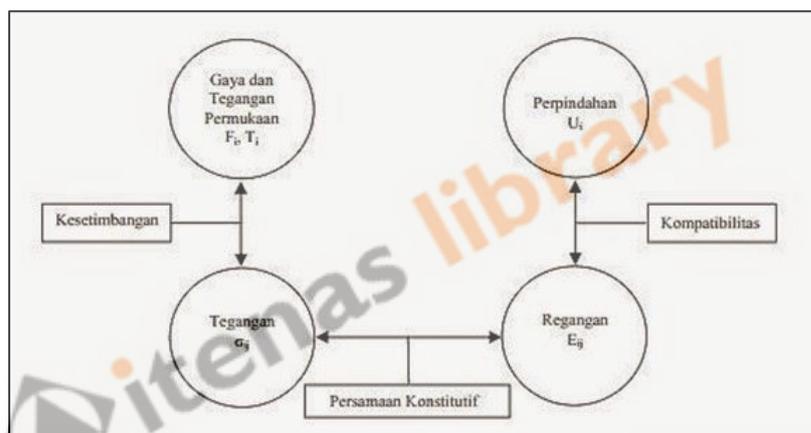
$\{D\}$ = Matriks Perpindahan Global

$[K]$ = 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 2.15**.



Gambar 2. 15 Hubungan antara variabel-variabel dalam penyusunan persamaan elemen hingga

(Sumber : Chen dan Baladi, 1985)

2.7 *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. 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.

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

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{E_i} \frac{q}{1 - \frac{q}{q_a}} \dots \dots \dots (2.5)$$

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 :

$$E_i = \frac{2E_{50}}{2-R_f} \dots \dots \dots (2.6)$$

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos\varphi - \sigma'_3 \sin\varphi}{c \cos\varphi - P^{ref} \sin\varphi} \right)^m \dots \dots \dots (2.7)$$

Dengan :

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

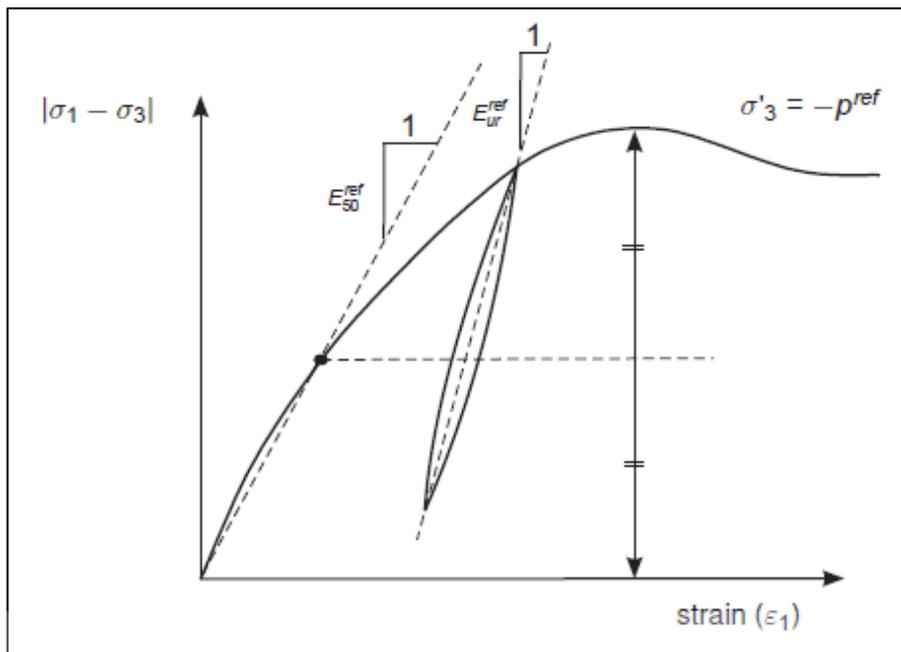
E_{50}^{ref} = *Secant stiffness* pada pengujian *triaxial drained*

c = Kohesi tanah

φ = Sudut geser tanah

σ'_3 = Tegangan pada uji *triaxial*

Pada PLAXIS 3D pengaturan default $P^{ref} = 100 \text{ kN/m}^2$. 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 2.16**. 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. 16 Definisi nilai E_{50}^{ref} dan E_{ur}^{ref} dari hasil uji *triaxial drained*
 (Sumber : Bringkgreeve, 2019)

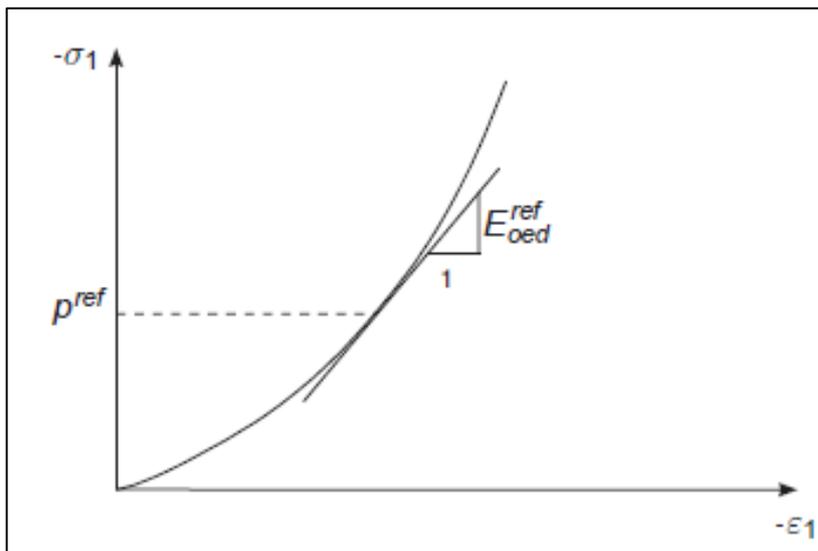
Berbeda dengan model berbasis elastisitas, model *Hardening Soil* elastoplastik tidak melibatkan hubungan tetap antara kekakuan triaksial (*undrained*) E_{50} dan oedometer kekakuan E_{oed} untuk kompresi satu dimensi. Dengan demikian, nilai kekakuan tersebut dapat dimasukkan secara manual, dengan menggunakan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

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

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 2.17**. 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. 17 Definisi nilai E_{oed}^{ref} dari hasil pengujian oedometer

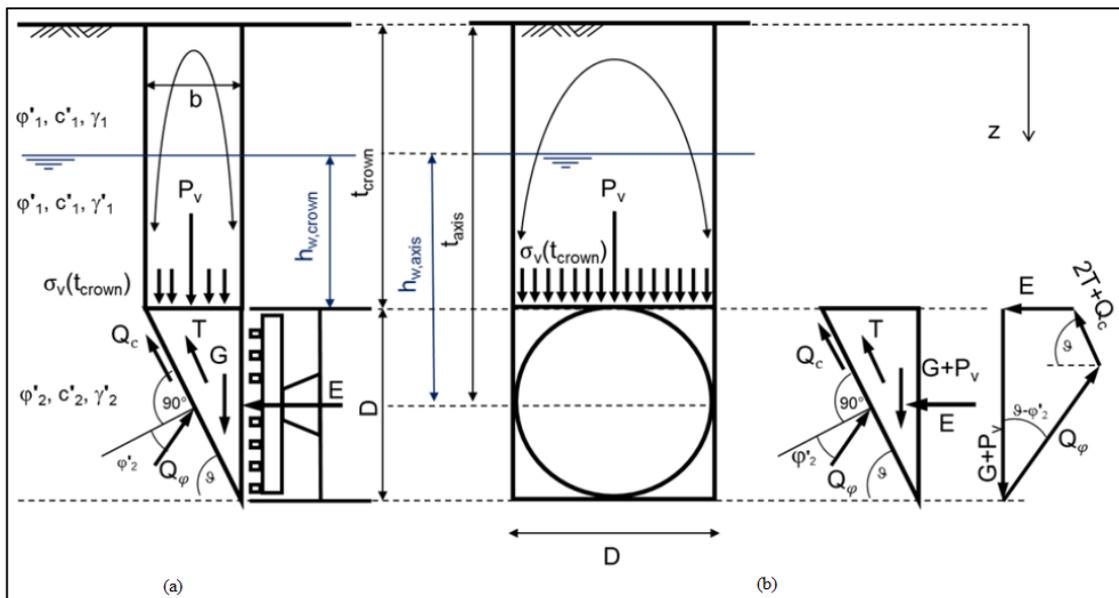
(Sumber : Bringkgreeve, 2019)

2.8 Face Support Pressure for Shield Tunneling

Perhitungan *face support pressure* dalam praktek biasanya dilakukan dengan menggunakan metode kesetimbangan batas (LEM) ketika tanah pada muka galian tidak kohesif atau dengan lapisan kohesif dan non-kohesif. Pada perhitungan ini parameter efektif kuat geser tanah diasumsikan dalam kondisi *drained*.

Menurut Janeczcz dan Steiner (1994), langkah pertama perhitungan *face support pressure* diwakili oleh definisi mekanisme keruntuhan yang ditunjukkan pada **Gambar 2.18**. Muka galian terowongan yang berbentuk lingkaran dapat diperkirakan dengan bentuk persegi yang panjang tepinya sama dengan diameter muka galian. Dengan demikian, bidang keruntuhan tanah pada muka galian terowongan diasumsikan seperti pada **Gambar 2.18a**. Setelah mengetahui bidang keruntuhan pada muka galian terowongan, gaya-gaya yang bekerja di atas muka galian terowongan dapat dihitung termasuk beban-beban yang bekerja di atas permukaan tanah.

Seluruh gaya-gaya yang terjadi harus berada dalam kondisi keseimbangan batas, yang berarti bahwa dalam memperhitungkan *face support pressure* sepenuhnya harus dimobilisasi. Kekuatan pendukung dan tahanan geser tanah yang telah dimobilisasi berperan sebagai kekuatan yang menstabilkan, sementara gaya-gaya yang terjadi di atas muka galian menyebabkan kekuatan yang meruntuhkan atau tidak stabil.



Gambar 2. 18 Mekanisme keruntuhan galian terowongan arah memanjang (a), arah melintang (b)
 (Sumber : Zizka and Thewes, 2016)

Kondisi keseimbangan diformulasikan pada permukaan geser yang miring dalam arah tegak lurus dan secara paralel seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.18b**. Dengan menjumlahkan dua kondisi keseimbangan, gaya *face support pressure* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$E_{re}(\vartheta) = \frac{(G+P_v) \cdot (\sin(\vartheta) - \cos(\vartheta) \cdot \tan(\varphi_2')) - 2 \cdot T - c_2' \cdot \frac{D^2}{\sin(\vartheta)}}{\sin(\vartheta) \cdot \tan(\varphi_2') + \cos(\vartheta)} \dots \dots \dots (2.9)$$

Dengan :

E_{re} = *Face support pressure* dengan bentuk penampang galian persegi (kN)

P_v = Berat pada irisan penampang galian akibat tekanan *overburden* (kN)

G = Berat tanah pada irisan penampang galian (kN)

T = Gaya geser pada permukaan slip vertikal (kN)

φ_2' = Sudut geser tanah (°)

ϑ = Sudut geser bidang keruntuhan galian (°)

c_2' = Kohesi tanah (kN/m²)

D = Diameter terowongan (kN)

Nilai P_V yang bekerja pada muka galian berdasarkan berat tanah di atasnya dapat dihitung dengan mengalikan area di atas muka galian dengan tegangan efektif vertikal yang bekerja pada bagian atas muka galian dengan menggunakan persamaan (2.10) sedangkan untuk berat tanah pada irisan penampang galian menggunakan persamaan (2.11).

$$P_V = D \frac{D}{\tan \vartheta} \sigma_v(t_{crown}) \dots \dots \dots (2.10)$$

Dengan :

P_V = Berat tanah pada elevasi bagian atas muka galian (kN)

ϑ = Sudut geser bidang keruntuhan galian (°)

D = Diameter terowongan (kN)

$\sigma_v(t_{crown})$ = *Overburden pressure* pada elevasi bagian atas muka galian (kN/m²)

$$G = \frac{1}{2} \frac{D^3}{\tan \vartheta} \gamma_{2,av} \dots \dots \dots (2.11)$$

Dengan :

G = Berat tanah pada irisan penampang galian terowongan (kN)

ϑ = Sudut geser bidang keruntuhan galian (°)

D = Diameter terowongan (kN)

$\gamma_{2,av}$ = Berat isi tanah rata-rata pada penampang galian (kN/m³)

Titik yang paling penting dalam pendekatan perhitungan kesetimbangan batas (LEM) adalah penentuan gaya tahanan geser pada bidang segitiga seperti yang ditunjukkan **Gambar 2.18a**. Gaya tahanan geser terdiri dari dua komponen, gaya gesek dan gaya kohesi berikut merupakan persamaannya :

$$T = T_C + T_R \dots \dots \dots (2.12)$$

$$T_C = \frac{c'_2 D^3}{2 \tan \vartheta} \dots \dots \dots (2.13)$$

$$T_R = \tan(\varphi'_2) K_2 \left(\frac{\sigma_v(t_{crown}) D^3}{2 \tan \vartheta} + \frac{\gamma_{2,av} D^3}{6 \tan \vartheta} \right) \dots \dots \dots (2.14)$$

Dengan :

T = Kuat geser pada bidang keruntuhan muka galian (kN)

T_C = Gaya gesek akibat kohesi tanah (kN)

T_R = Gaya gesek akibat sudut geser tanah (kN)

$\gamma_{2,av}$ = Berat isi tanah rata-rata pada penampang galian (kN/m³)

φ'_2 = Sudut geser tanah (°)

c'_2 = Kohesi tanah (kN/m²)

K_2 = Koefisien gaya lateral tanah

ϑ = Sudut geser bidang keruntuhan galian (°)

Rekomendasi untuk nilai koefisien gaya lateral tanah menggunakan persamaan dari Jancsecz & Steiner (1994) karena mengasumsikan konsistensi redistribusi tegangan selama penggalian. Seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 2.5**. Dengan menggunakan persamaan K_0 dan K_a sebagai berikut :

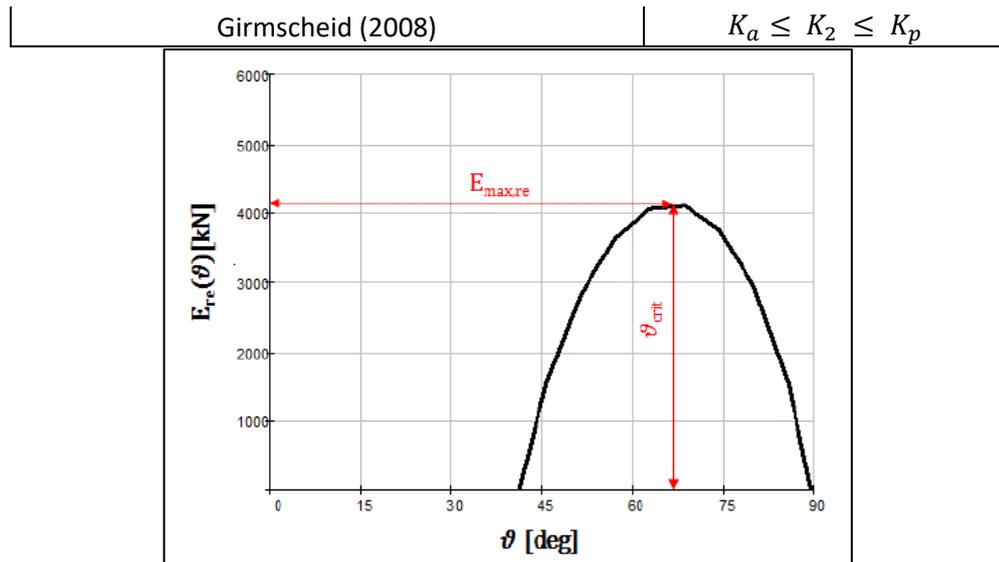
$$K_0 = 1 - \sin(\varphi'_2) \dots \dots \dots (2.15)$$

$$K_a = \left(\tan \left(45 - \frac{\varphi'_2}{2} \right) \right)^2 \dots \dots \dots (2.16)$$

Selanjutnya nilai dari E_{re} pada persamaan (2.9) dinyatakan tergantung pada sudut geser bidang keruntuhan galian (ϑ). Sudut geser kritis (ϑ_{crit}) dari bidang keruntuhan galian harus ditemukan untuk menentukan nilai *face support pressure* tertinggi ($E_{max,re}$) diperlukan. Dengan demikian, dalam menentukan nilai maksimum gaya *face support pressure* dilakukan oleh variasi sudut geser (ϑ) dengan menggunakan grafik seperti yang dicontohkan pada **Gambar 2.19**.

Tabel 2. 5 Referensi nilai koefisien gaya lateral tanah

Author	Assumed coefficient of the lateral earth pressure
Anagnostou & Kovári (1994)	$K_2 = 0,4$
Jancsecz & Steiner (1994)	$K_2 = \frac{K_0 + K_a}{2}$



Gambar 2. 19 Grafik contoh variasi sudut geser (θ)

(Sumber : Zizka and Thewes, 2016)

Face support pressure selain disebabkan oleh tekanan tanah, dalam menentukan nilai *face support pressure* perlu memperhitungkan akibat tekanan air tanah apabila jika dalam proses penggalian tidak dilakukan proses *dewatering* terlebih dahulu. Perhitungan gaya yang disebabkan oleh tekanan air tanah dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$W_{re} = \gamma_w \cdot \left(h_{w,crown} + \frac{D}{2} \right) D^2 \dots\dots\dots(2.17)$$

Dengan :

W_{re} = *Groundwater pressure* bentuk penampang galian persegi (kN)

$h_{w,crown}$ = Elevasi muka air tanah dari bagian atas terowongan (m)

D = Diameter terowongan (m)

γ_w = Berat isi air (kN/m³)

Setelah memperoleh gaya *face support pressure* perlu dilakukan konversi dari penampang galian bentuk persegi menjadi penampang galian bentuk lingkaran serta dilakukan pengalian terhadap koefisien keselamatan parsial, persamaannya adalah sebagai berikut :

$$E_{max,ci} = E_{max,re} \left(\frac{\pi D^2}{4 D^2} \right) \dots\dots\dots(2.18)$$

$$W_{ci} = W_{re} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \dots \dots \dots (2.19)$$

$$S_{ci} = \eta_E E_{max,ci} + \eta_W W_{ci} \dots \dots \dots (2.20)$$

Dengan :

η_E = Koefisien untuk tekanan akibat tanah (1,5)

$E_{max,ci}$ = *Groundwater pressure* bentuk penampang galian lingkaran (kN)

η_W = Koefisien untuk tekanan akibat air tanah (1,05)

W_{ci} = *Groundwater pressure* bentuk penampang galian lingkaran (kN)

S_{ci} = *Total face support pressure* bentuk penampang galian lingkaran (kN)

2.9 Kegempaan

Gempa bumi adalah suatu sentakan asli dari dalam bumi kemudian merambat ke permukaan bumi (Katili, 1996). Gempa bumi dalam dunia struktur memiliki kaitan yang sangat penting dalam perancangan suatu bangunan struktur khususnya bangunan yang terletak pada lokasi yang memiliki tingkat kegempaan yang tinggi. Oleh karena itu, gempa bumi merupakan salah satu kriteria penting dalam mendesain suatu bangunan struktur dengan mengistilahkannya sebagai beban gempa.

Beban gempa adalah beban yang bekerja pada suatu struktur akibat dari pergerakan tanah yang disebabkan karena adanya gempa bumi (baik gempa tektonik atau vulkanik) yang mempengaruhi struktur tersebut. Analisis perancangan struktur bangunan terhadap pengaruh beban gempa secara statis, pada prinsipnya adalah menggantikan gaya-gaya horizontal yang bekerja pada struktur akibat pergerakan tanah dengan gaya-gaya statis yang ekuivalen, dengan tujuan penyederhanaan dan kemudahan di dalam perhitungan. Suatu metode mengasumsikan bahwa gaya horizontal akibat gempa yang bekerja pada suatu elemen struktur, besarnya ditentukan berdasarkan hasil perkalian antara suatu konstanta berat atau massa dari elemen struktur tersebut. Metode ini disebut *Equivalent Lateral Force Method* (SNI 03-1726-2003).

Dalam melakukan perancangan gempa rencana untuk setiap jenis infrastruktur struktur dan komponennya harus memiliki sistem penahan gaya lateral dan vertikal yang

mampu memberikan kekuatan, kekakuan, dan kapasitas disipasi energi yang cukup untuk menahan beban gempa rencana sesuai dengan kriteria batas deformasi dan kekuatan yang disyaratkan. Kriteria perancangan gempa untuk setiap jenis infrastrukturnya dapat dilihat pada **Tabel 2.6**.

Tabel 2. 6 Kriteria perancangan gempa berdasarkan peruntukannya

(Sumber : SNI 8460:2017)

Peruntukan	Umur rencana (tahun)	Probabilitas terlampaui (%)	Periode ulang (tahun)	Kriteria keamanan	Referensi
Bangunan gedung dan non-gedung	50	2	2.500	-	SNI 1726:2012
Jembatan konvensional	75	7	1.000	-	SNI 2833:201x AASHTO (2012)
Dinding penahan Abutmen Jembatan	75	7	1.000	FK>1,5 (terhadap geser saat mengalami beban statik) FK>2 (terhadap guling saat mengalami beban statik) FK>1,1 (terhadap beban pseudostatik)	WSDOT, FHWA-NJ-2005-002
Timbunan oprit				FK>1,1	
Bendungan	100	1	10.000, Safety Evaluation Earthquake (SEE)	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak terjadi aliran air yang tidak terkendali • Deformasi tidak melebihi 0,5 dari tinggi jagaan • Deformasi pada filter tidak boleh melebihi 0,5 tebal filter • Spillway tetap berfungsi setelah terjadi gempa rencana 	ICOLD No 148, 2016,
	100	50	145 Operating Basis Earthquake (OBE)	Kerusakan minor setelah terjadi gempa rencana	
Bangunan pelengkap bendungan	50	2	2500	-	
Terowongan	100	10	1.000 tahun		

Pada proses menentukan beban gempa ada beberapa persyaratan spektrum respon desain yang harus dipenuhi, yaitu dengan persyaratan berdasarkan faktor amplifikasi seperti pada **Tabel 2.7** dan **Tabel 2.8** serta klasifikasi situs seperti pada **Tabel 2.9** dari suatu kondisi jenis tanah di sekitar lokasi konstruksi.

Tabel 2. 7 Faktor amplifikasi untuk PGA dan periode 0,2 detik (F_{pga} dan F_a)

(Sumber : SNI 8460:2017)

Kelas situs	$PGA \leq 0,1$	$PGA = 0,2$	$PGA = 0,3$	$PGA = 0,4$	$PGA \geq 0,5$
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s \geq 1,25$
Batuan keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan (SB)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Tanah keras (SC)	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
Tanah sedang (SD)	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
Tanah lunak (SE)	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
Tanah khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

Keterangan: Untuk nilai-nilai antara dapat dilakukan interpolasi linear

Tabel 2. 8 Besarnya nilai faktor amplifikasi untuk periode 1 detik (F_v)

(Sumber : SNI 8460:2017)

Kelas situs	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 \geq 0,5$
Batuan keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan (SB)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Tanah keras (SC)	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
Tanah sedang (SD)	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5
Tanah lunak (SE)	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
Tanah khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

Dengan :

PGA = Percepatan puncak batuan dasar (SB) mengacu pada peta gempa dengan periode ulang rencana sesuai persyaratan infrastruktur yang digunakan;

S_s = Percepatan spektral respons horizontal di batuan dasar (SB) pada periode 0,2 detik dengan periode ulang rencana sesuai persyaratan infrastruktur yang digunakan;

S_1 = Percepatan spektral respons horizontal di batuan dasar (SB) pada periode 1,0 detik dengan periode ulang rencana sesuai persyaratan infrastruktur yang digunakan;

SF = Lokasi yang memerlukan investigasi geoteknik dan analisis respons spesifik-situs.

Tabel 2. 9 Klasifikasi situs

(Sumber : SNI 8460:2017)

Klasifikasi Situs	\bar{v}_s (m/detik)	\bar{N}_{SP} atau $\bar{N}_{SP}E_h$	\bar{s}_u (kPa)
SA (batuan keras)	>1.500	N/A	N/A
SB (batuan dasar)	750 sampai 1.500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m dengan karakteristik sebagai berikut: 1. Indeks Plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $(w) \geq 40\%$, dan 3. Kuat geser niralir, $\bar{s}_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan penyelidikan geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik seperti: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan, $H > 3$ m) - Lempung berplastisitas tinggi (ketebalan, $H > 7,5$ m dengan Indeks Plastisitas, $PI > 75$) - Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{s}_u < 50$ kPa		

Keterangan: N/A = tidak dapat dipakai

Dengan :

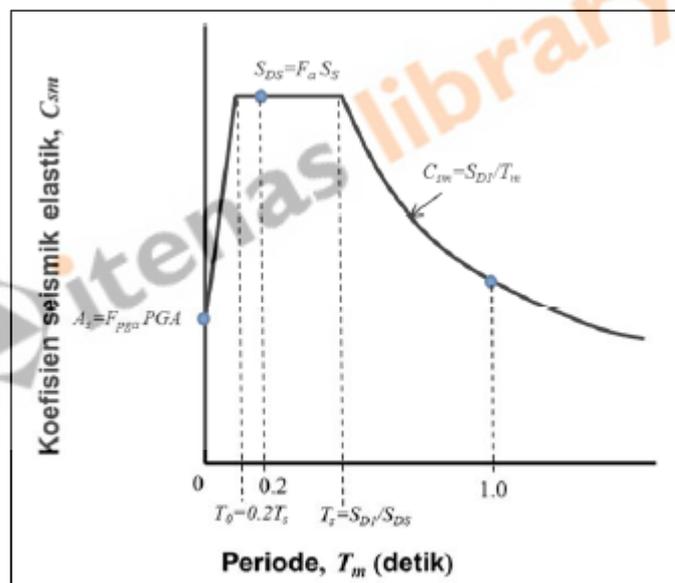
\bar{N}_{SPT} = Nilai rata rata tahanan penetrasi standar lapangan rata-rata;

\bar{N}_{SPTch} = Nilai rata rata tahanan penetrasi standar untuk lapisan tanah non kohesif;

\bar{v}_s = Nilai rata rata kecepatan gelombang geser (m/detik);

\bar{s}_u = Nilai rata rata kuat geser niralir lapisan (kPa).

Khusus untuk bangunan terowongan dalam mendesain spektrum respon desain dengan menggunakan rasio redaman sebesar 5% dan tidak memasukkan penyesuaian getaran tanah (*ground motion*) di sekitarnya. Untuk proses penentuan spektrum respon desain di permukaan tanah, yaitu dengan membuat kurva hubungan antara periode dengan koefisien seismik elastik yang menggunakan metode tiga titik seperti pada yang ditunjukkan pada **Gambar 2.20**.



Gambar 2. 20 Kurva spektrum respon desain

(Sumber : SNI 8460:2017)

Dengan :

F_{pga} = Koefisien situs untuk percepatan puncak di batuan dasar mengacu klasifikasi situs seperti diperlihatkan pada **Tabel 2.7**;

PGA = Percepatan puncak horizontal di batuan dasar (SB);

F_a = Koefisien situs untuk percepatan spektral periode 0,2 detik seperti diperlihatkan pada **Tabel 2.7**;

S_s = Percepatan spektral respons horizontal di batuan dasar (SB) pada periode 0,2 detik;

F_v = Koefisien situs untuk percepatan spektral periode 1,0 detik seperti diperlihatkan pada **Tabel 2.8**;

S_1 = Percepatan spektral respons horizontal di batuan dasar (SB) pada periode 1,0 detik.

Untuk menentukan koefisien seismik elastik (C_{sm}) dengan periode waktu kurang dari atau sama dengan T_0 dapat menggunakan persamaan :

$$C_{sm} = A_s + (S_{DS} - A_s) \frac{T_m}{T_0} \dots \dots \dots (2.21)$$

$$T_0 = 0,2T_s \dots \dots \dots (2.22)$$

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \dots \dots \dots (2.23)$$

$$S_{D1} = F_v T_1 \dots \dots \dots (2.24)$$

Untuk menentukan koefisien seismik elastik (C_{sm}) dengan periode waktu lebih dari atau sama dengan T_0 dapat menggunakan persamaan :

$$C_{sm} = S_{DS} \dots \dots \dots (2.25)$$

Dan untuk menentukan koefisien seismik elastik (C_{sm}) dengan periode waktu lebih dari T_s dapat menggunakan persamaan :

$$C_{sm} = \frac{S_{D1}}{T_m} \dots \dots \dots (2.26)$$

Dengan :

A_s = Koefisien percepatan puncak gempa rencana;

S_{DS} = Koefisien percepatan respons spektral rencana periode 0,2 detik;

S_{D1} = Koefisien percepatan periode 1,0 detik;

T_m = Periode getar fundamental struktur (detik);

T_0 = Periode referensi yang digunakan untuk menentukan bentuk spektral (detik).

2.10 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.

2.11 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 3D. 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 3D :

$$\eta = \frac{\tan \varphi'}{\tan \varphi'_{failure}} = \frac{c'}{c'_{failure}} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dengan :

φ' = Sudut geser tanah

$\varphi'_{failure}$ = Sudut geser tanah saat mengalami keruntuhan

c' = Kohesi

$c'_{failure}$ = Kohesi saat mengalami keruntuhan

2.12 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.

2.12.1 *Tunnels, Types & Importance*

Jurnal dengan judul penelitian *Tunnels, Types, & Importance* ditulis oleh Prof. A. Balsubramanian yang berasal dari *Centre For Advanced Studies In Earth Science, University Of Mysore, Karnataka, India*. Jurnal ini dipublikasikan melalui *ResearchGate* pada tahun 2017.

Hasil dari penelitian ini menyimpulkan bahwa pada proyek terowongan, kondisi geologis sangat memengaruhi waktu dan biaya konstruksi. Pada dasarnya, membangun terowongan yang panjang adalah proyek yang memakan waktu dan memerlukan biaya sangat mahal. Kondisi terowongan yang buruk akan menambah biaya dan waktu konstruksi karena meningkatnya kebutuhan akan dukungan alat dan perbaikan. Maka

bagian utamanya terletak pada kondisi geologis dan struktur terowongan yang harus disesuaikan terhadap bentuk, dan metode konstruksi terowongan.

2.12.2 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-Samarrae 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 Tunneling 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.

2.12.3 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*.

2.12.4 Pertimbangan Geoteknik Pada Konstruksi *Subway* Untuk Jakarta Metro

Penelitian yang berjudul Pertimbangan Geoteknik Pada Konstruksi *Subway* Untuk Jakarta Metro ditulis oleh Prof. Paulus P.Raharjo yang merupakan Guru Besar Ilmu Geoteknik Universitas Parahyangan, Bandung. Penelitian ini dipublikasikan pada tahun 2007 yang dalam rangka acara Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTekS vol.1) di Universitas Atma Jaya, Yogyakarta.

Hasil dari penelitian ini menyimpulkan bahwa moda transportasi Jakarta Metro menjadi alternatif solusi dari kebutuhan lalu lintas, tetapi bila penempatan posisi moda tersebut berada di atas permukaan tanah akan menjadi masalah yang serius dalam pembebasan lahan dan kemacetan lalu lintas yang ditimbulkan, namun apabila penempatannya berada dibawah tanah akan memiliki persoalan teknis yang cukup berat. Dalam keputusan menempatkan jalur kereta baik diatas permukaan tanah ataupun bawah tanah perlu memperhitungkan aspek geoteknik termasuk kondisi tanah, pengaruh konstruksi pada bangunan sekitar, metode konstruksi serta keamanan pada saat pelaksanaan.