

BAB II

DASAR TEORI

2.1. Pengertian Umum

2.1.1 Pengertian 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, dan yang lebih pendek dari itu dinamakan *underpass*. Terowongan biasa digunakan untuk lalu-lintas kendaraan (umunya mobil atau kereta api) maupun para pejalan kaki atau pengendara sepeda. Selain itu, ada pula terowongan yang berfungsi mengalirkan air untuk mengurangi banjir atau untuk dikonsumsi, terowongan untuk saluran pembuangan, pembangkit listrik, dan terowongan yang menyalurkan kabel telekomunikasi. (<http://id.wikipedia.org/wiki/Terowongan>)

Terowongan umumnya dibuat melalui berbagai jenis lapisan tanah dan bebatuan sehingga metode konstruksi pembuatan terowongan tergantung dari keadaan tanah. Metode konstruksi yang lazim digunakan dalam pembuatan terowongan antara lain : *Cut and Cover System*, *Pipe Jacking System (Micro Tunneling)*, *Tunneling Bor Machine (TBM)*, *New Austrian Tunneling Method (NATM)*, dan *Immersed-Tube Tunneling System*.

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

Menurut Paulus P Raharjo (2004) bahwa terowongan transportasi bawah kota merupakan grup tersendiri diantara terowongan lalu – lintas, dapat berupa terowongan kereta api maupun terowongan jalan raya.

Dalam tahap konstruksinya, terowongan memerlukan pengawasan yang lebih, karena adanya sedikit kesalahan metode atau *sequence of work* dapat mengakibatkan keruntuhan *tunnel*. Pelaksanaan galian terowongan dapat dikerjakan dengan bantuan alat-alat berat (*excavator* dengan perlengkapan-perengkapan *clampshell*, *backhoe*, *shovel*, dan juga *crawler loader*), sehingga pekerjaan dapat diselesaikan dalam waktu relatif cepat dan memperkecil kemungkinan runtuh.

2.2. Klasifikasi Terowongan

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

1. Terowongan lalu – lintas (*traffic tunnel*)

a. Terowongan kereta api

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

b. Terowongan jalan raya

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

c. Terowongan pejalan kaki

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

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

d. Terowongan navigasi

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

e. Terowongan transportasi dibawah kota

f. 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.

2. Terowongan angkutan

a. Terowongan stasiun pembangkit listrik air

Air dialihkan atau dialirkan dari sungai atau reservoir untuk digunakan sebagai pembangkit listrik disebuah stasiun pembangkit yang letaknya lebih rendah. Terowongan ini dapat dikategorikan pada suatu grup utama berdasarkan kegunaannya.

b. Terowongan penyediaan air

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

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 untuk saluran air kotor

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

d. Terowongan yang 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.

Berdasarkan lokasinya terowongan dibagi menjadi beberapa bagian sebagai berikut:

1. *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.

2. *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.

3. *Tunnels at Shallow Depth and Water City Streets*

Jaringan transportasi di Negara-negara maju seperti Amerika, Inggris, Perancis, 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.

Berdasarkan material yang dipakai, Paulus P Raharjo (2004) menjelaskan terdapat 3 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 ini, *lining* langsung dipasang dibelakang *shield* bersamaan dengan pergerakan maju dari mesin pembor terowongan (*Tunnel Boring Machine*).

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

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.

(Sumber : Rai Made Astawa Rai : *Teknik Terowongan: 1988*)

2.2.1 Metode Penggalian Terowongan

Dalam penggalian terowongan ada beberapa metode yang umum digunakan, akan tetapi metode penggalian terowongan yang akan dipilih disesuaikan oleh keadaan alam sekitar dengan segala pertimbangan dan analisis, Rai Made Astawa Rai (1988), membagi beberapa metode penggalian terowongan yang biasa diterapkan dilapangan sebagai berikut :

a. Metode “*full face*”

Metode “*full face*” adalah suatu cara dimana seluruh penampang terowongan digali secara bersamaan. Metode ini sangat cocok untuk terowongan yang mempunyai ukuran penampang melintang kecil hingga terowongan dengan diameter 3 meter.

Keuntungan :

- Pekerjaan akan lebih cepat karena penampang permukaan terowongan digali secara bersamaan,
- Proses *tunneling* dapat dilakukan dengan kontinyu.

Kerugian :

Ramadani, 2012

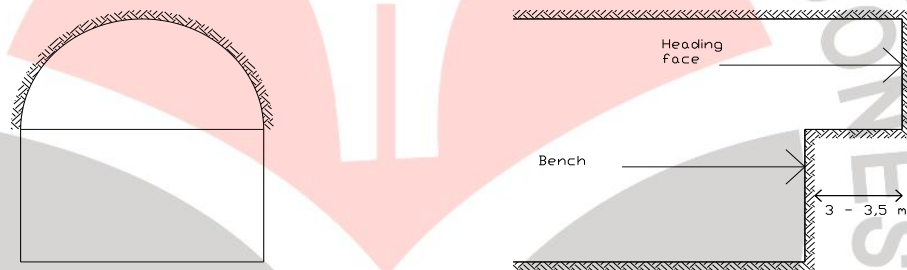
Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

- Banyak membutuhkan alat – alat mekanis,
- Metoda ini tidak dapat digunakan apabila kondisi tanah tidak stabil,
- Hanya untuk terowongan dengan lintasan pendek.

a. Metode “ *Heading*” and “ *Bench*”

Metode “ *Heading*” and “ *Bench*” adalah cara penggalian dimana bagian atas penampang terowongan digali terlebih dahulu sebelum bagian bawah penampangnya. Setelah penggalian bagian atas mencapai panjang 3 – 3,5 meter (*heading*), penggalian bawah penampang dikerjakan (*bench cut*) sampai membentuk penampang terowongan yang diinginkan.



Gambar 2. 1. Metoda “*heading*” dan “*bench*”

Keuntungan :

- Memungkinkan pekerjaan pengeboran dan pembuangan sisa peledakan dilakukan secara simultan,
- Metoda ini efektif untuk pekerjaan terowongan dengan penampang besar dan dengan lintasan yang relative panjang.

b. Metoda “ *Drift*”

Metode “*drift*” adalah suatu metode yang menggali terlebih dahulu sebuah lubang bukaan berukuran kecil sepanjang lintasan terowongan yang kemudian diperbesar sampai membentuk penampang yang direncanakan.

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

c. Metode “*center drift*”

Metode ini dimulai dengan penggalian lubang berukuran 2,5m x 2,5m – 3m x 3m dari portal ke portal. Perluasannya dimulai setelah penggalian “*center drift*” selesai.

Keuntungan :

- Metoda ini menguntungkan karena memberikan sistem ventilasi yang baik,
- Tidak memerlukan penyangga sementara yang rumit karena ukurannya cukup kecil,
- *Mucking* dapat dilakukan bersamaan dengan penggalian.

Kerugian :

- Pekerjaan perluasannya harus menunggu *center drift* selesai secara keseluruhan,
- Alat bor harus dipasang dengan pola tertentu.

a. Metode “*Side drift*”

Pada metode ini dua “*drift*” digali sekaligus pada sisi-sisi penampang, sepanjang lintasan terowongan. Proses selanjutnya adalah penggalian bagian “*arch*” yang diikuti dengan pemasangan penyangga sementara.

Keuntungan :

- Proses pekerjaan *lining* dapat dilakukan sebelum penggalian bagian tengah selesai,

Ramadani, 2012

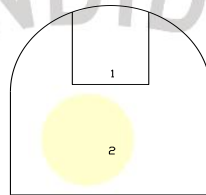
Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

- Cocok untuk penggalian terowongan besar dan dengan kondisi tanah yang buruk.

b. Metode “*top drift*”

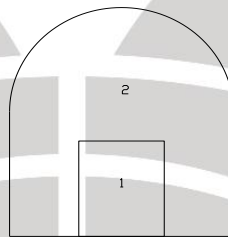
Metode ini banyak digunakan pada penggalian endapan di tambang. Metode ini tidak jauh berbeda dengan metode “*heading and bench*”.



Gambar 2. 2. Metoda “*Top Drift*”

c. Metode “*bottom drift*”

Pada metode ini, penggalian dimulai dengan membuka bagian bawah penampang. Pembuatan lubang – lubang bahan peledak untuk membuka bagian atas penampang dilakukan dengan mem-bor dari *bottom drift* vertikal ke atas.



Gambar 2. 3. metoda “*bottom drift*”

d. Metode sumuran vertikal

Metode ini dilaksanakan dengan membuat lubang vertikal tegak lurus sampai pada terowongan yang akan digali. Dengan dibuatnya satu lubang yang memotong lintasan terowongan akan didapatkan paling sedikit tiga buah “*heading face*”

e. Metode “*pilot tunnel*”

“*Pilot tunnel*” digali paralel pada jarak kurang lebih 25 meter dari sumbu terowongan yang akan direncanakan dengan ukuran $2 \times 2 \text{ m}^2 - 3 \times 3 \text{ m}^2$. Penggalian pada terowongan utama sendiri dilakukan dengan metode “*drift*”.

(Sumber : Rai Made Astawa Rai : Teknik Terowongan: 1988)

2.3. Teori Mekanika Tanah

Tanah dalam bidang mekanika tanah dimaksudkan untuk mencakup semua bahan dari tanah lempung (*clay*) sampai berangkal (batu – batu yang besar), jadi semua endapan alam yang bersangkutan dengan teknik sipil kecuali batuan tetap. Batuan tetap menjadi ilmu tersendiri, yaitu mekanika batuan.(L.D Wesley,1997)

Tanah terdiri dari 3 bahan, tanah itu sendiri, air dan udara. Dari sudut pandangan teknis, tanah – tanah itu dapat digolongkan kedalam macam pokok berikut ini :

1. Batu kerikil (*Gravel*)
2. Pasir (*Sand*)
3. Lanau (*Silt*)
4. Lempung (*clay*)

2.3.1. Jenis Tanah

Berat Volume atau berat isi (γ) merupakan berat tanah per satuan volume, jadi:

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

$$\gamma = \frac{\text{Berat (W)}}{\text{Volume (V)}} \quad (2.1)$$

Hubungan antara densitas dan berat volume

$$\gamma \left(\frac{\text{kN}}{\text{M}^3} \right) = \frac{g \cdot \rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{1000} \quad (2.2)$$

$$\text{Dimana : } \rho = \frac{\text{massa (m)}}{\text{Volume (V)}} \quad (2.3)$$

Untuk parameter berat jenis berbagai jenis tanah sebagai pendekatan jika data lapangan dan data laboratorium tidak ada.

Tabel 2.1 Hubungan antara nilai N-SPT dengan properti tanah

N	Consistensi	Field Identification Hubungan antara nilai N-SPT dengan properti tanah	γ_{sat} (kN/m ²)
<2	very soft	Easily penetreated several centimeter by first	16 - 19
2 - 4	soft	Easily penetreated several centimeter by thumb	16 - 19
4 - 8	medium	Moderate effort required to penetrate several centimeter with thumb	17 - 20
8 - 16	stiff	Readily indented by thumb	19 - 22
16 - 32	very stiff	Readily indented by thumbnail	19 - 22
>32	hard	Difficult to ident with thumbnail	19 - 22

Sumber : Tuncer B Edil (1982)

Apabila data lapangan tersedia, dapat digunakan sebagai pendekatan tabel korelasi dari N-SPT terhadap nilai sudut geser (ϕ) dan berat volume (γ) untuk pasir dan tabel korelasi dari N-SPT dan berat volume untuk tanah lempung.

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

Tabel 2.2 Korelasi dari N-SPT terhadap nilai sudut geser (ϕ) dan berat volume (γ) pada pasir

Granular Soil Properties (after Teng (1962))

Compactness	Passive Density (%)	SPT N (blows per ft)	Angle of Internal Friction (deg)	Unit Weight	
				Moist (pcf)	Submerged (pcf)
Very Loose	0-15	0-4	<28	<100	<60
Loose	16-35	5-10	28-30	95-125	55-65
Medium	36-65	11-30	31-36	110-130	60-70
Dense	66-85	31-50	37-41	110-140	65-85
Very Dense	86-100	>50	>41	>130	>75

Keterangan : 1pcf=0.157087 kN/m³

Sumber :after Teng 1962

Tabel 2.3 korelasi dari N-SPT terhadap berat volume (γ) pada tanah lempung

Correlation of Undrained Shear Strength of Clay ($q_u < 2c$)

Consistency	q_u (psf)	SPT N (blows/ft)	Saturated Unit Weight (psf)
Very Soft	0-500	0-2	<100-110
Soft	500-1.000	2-4	100-120
Medium	1.000-2.000	5-6	110-125
Stiff	2.000-4.000	9-16	115-130
Very Stiff	4.000-8.000	16-32	120-140
Hard	>8.000	>32	>130

Sumber : Meyerhoff, 1956

2.3.2. Parameter Kekakuan (E dan ν)

Parameter kekakuan dinyatakan dalam modulus elastisitas (E) dan *poisson ratio* (ν). Modulus Elastisitas (E) adalah Perbandingan antara tegangan dan regangan dari

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

suatu benda. Besarnya modulus elastisitas dinyatakan dalam N/m^2 atau kN/m^2 . *Poisson ratio* (ν) merupakan regangan arah horizontal dibagi dengan regangan arah vertikal.

$$\text{Regangan horizontal: } \varepsilon_h = \frac{\delta_h}{H_h} \quad (2.4)$$

$$\text{Regangan vertikal: } \varepsilon_v = \frac{\delta_v}{H_v} \quad (2.5)$$

$$\text{Jadi, Poisson ratio } (\nu) = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_v} \quad (2.6)$$

Angka *poisson ratio* dapat didekati dengan melihat jenis tanah dan nilai modulus elastisitas tanah tersebut. Secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut:

Tabel 2.4 Korelasi Modulus Elastisitas (E_s) dengan Nilai N-SPT

Jenis Tanah	N-SPT (kN/m^2)
Sand (Normally consolidated)	$E_s = 500 (N + 15)$
	$E_s = 7000.N.0,5$
	$E_s = 6000.N$
	$E_s = (15000 \text{ to } 22000) \ln N$
Sand (saturated)	$E_s = 250 (N + 15)$
Sand, all (normally consolidated)	$E_s = (2600 \text{ to } 2900) N$
Sand (overconsolidated)	$E_s = 4000 + 1050 N$
	$E_{s(ocr)} = E_{s(ocr)(ocr)} 0,5$
Gravelly sand	$E_s = 1200 (N + 6)$
	$E_s = 600 (N + 6), N < 15$
Clayey Sand	$E_s = 320 (N + 15)$
Silt, sandy silt or clayey silt	$E_s = 300 (N + 6)$

Sumber : Bowles (1991)

Tabel 2.5 Hubungan tipe tanah dengan Modulus Young dan Poisson Ratio

Type of soil	Young's modulus, E_s		Poisson's ratio
	MN/m^2	lb/in^2	
Loose sand	10.35 - 24.15	1500 - 3500	0.20 - 0.40
Medium dense sand	17.25 - 27.60	2500 - 4000	0.25 - 0.40
Dense sand	34.50 - 55.20	5000 - 8000	0.30 - 0.45

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

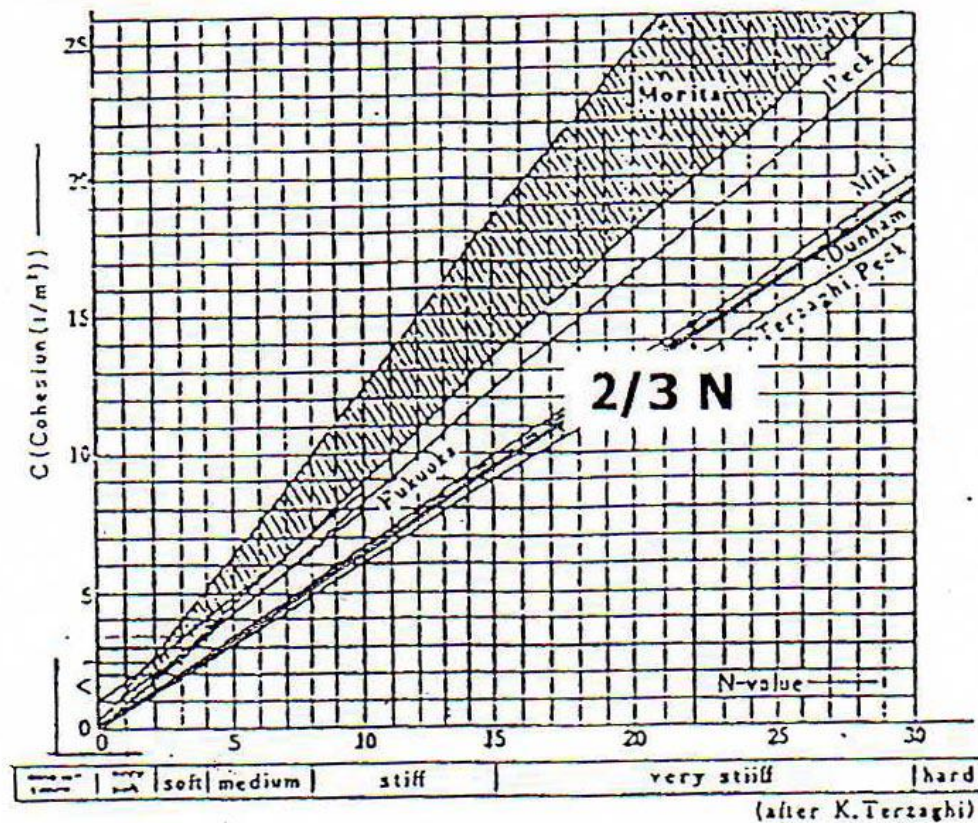
Silty sand	10.35 - 17.25	1500 - 2500	0.20 - 0.40
Sand and Gravel	69.00 - 172.50	10000 - 25000	0.15 - 0.35
soft clay	2.07 - 10.35	300 - 750	0.20 - 0.50
Medium clay	5.18 - 10.35	750 - 1500	
Stiff clay	10.35 - 24.15	1500 - 3500	

Sumber : Braja M.Das, 1996

2.3.3. Parameter Kekuatan (c , ϕ dan ψ)

- Kohesi (c)

Kohesi merupakan nilai yang timbul akibat adanya lekatan/ikatan antar butiran tanah. Parameter kohesi (c) dapat ditentukan dari nilai N-SPT.

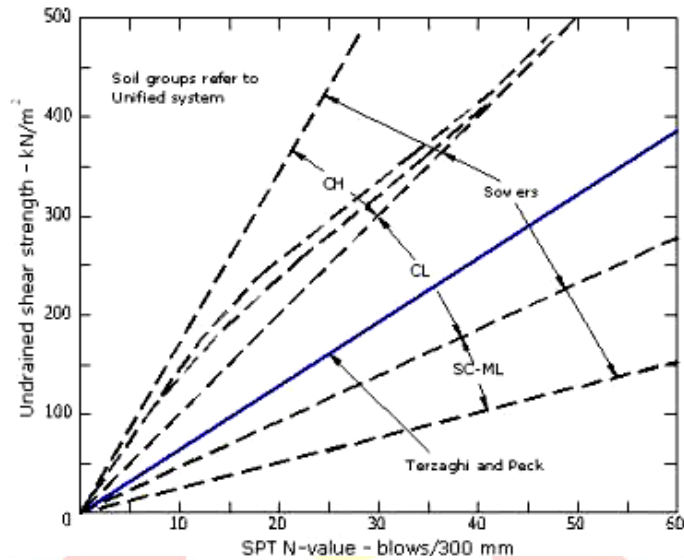


Gambar 2.4. Grafik Korelasi Antara Kohesi (c) Dengan N-SPT

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu



Gambar 2.5. Grafik Korelasi Antara S_u Dengan N -SPT

- Sudut geser / *friction angle* (ϕ)

Sudut geser / *friction angle* diperoleh dari kekasaran antar butiran tanah. Sudut geser atau sudut geser dalam merupakan penambahan dari *shear strength* dengan *stress level*. Sudut geser yang besar ditemui pada tanah yang berbutir. Contohnya pada *dense sand*.

Harga sudut geser dalam untuk berbagai jenis tanah dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.6 Sudut Geser Dalam untuk Tanah Bukan Lempung

Jenis Tanah	Sudut Geser efektif (ϕ')	
	Loose	Dense
Gravel, crushed	36 – 40	40 – 50
Gravel, bank run	34 – 38	38 – 42
Sand, crushed (angular)	32 – 36	35 – 45
sand, bank run (sub angular)	30 – 36	34 – 40
Sand, beach (well rounded)	28 – 32	32 – 38

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

Silty sand	25 – 35	30 – 36
Silt, inorganik	25- 35	30 – 35

Sumber: Bowles (1991)

Tabel 2.7 Sudut Geser Dalam untuk Berbagai Jenis Tanah

Jenis Tanah	Jenis Tes		
	UU (unconsolidated - Undrained)	CU (Consolidated - Undrained)	CD (Consolidated - Drained)
Gravel			
Medium Size	40 – 55		40 - 55
Sandy	35 – 50		35 - 50
Sand			
Loose dry	28 – 34		
Loose saturated	28 – 34		
Dense dry	35 – 46		43 - 50
Dense saturated	1 - 2 less than dense dry		43 - 50
Silty or silty sand			
Loose	20 – 22		27 - 30
Dense	25 – 30		30 - 35
Clay	0 (if saturated)		20 - 42

Sumber : Bowles (1991)

- Dilatasi (ψ)

Lempung cenderung tidak menunjukkan dilatasi sama sekali atau sama dengan 0. Dilatasi dari pasir tergantung dari ϕ nya. Untuk pasir kwarsa kurang lebih adalah $\psi \approx \phi - 30^\circ$. Walaupun demikian dalam kebanyakan kasus ψ adalah 0. Untuk $d < 30^\circ$, nilai negatif yang kecil untuk ψ hanya realistis untuk tanah pasir yang sangat lepas.

2.3.4. Kekuatan Geser Tanah (*Shear Strength of Soil*)

Keruntuhan geser (*shear failure*) dalam tanah adalah akibat gerak relatif antara butirnya, bukanlah karena butirnya sendiri hancur. Oleh karena itu kekuatan tanah tergantung kepada gaya – gaya yang bekerja antara butirnya. Dengan demikian kekuatan geser tanah dapat dianggap terdiri dari dua bagian (*components*) :

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

1. Bagian yang bersifat kohesi yang tergantung kepada macam tanah dan kepadatan butirnya.
2. Bagian yang mempunyai sifat gesekan (*frictional*) yang sebanding dengan tegangan efektif yang bekerja pada bidang geser.

Maka dari itu kekuatan geser tanah dapat dinyatakan dengan rumus berikut :

$$S = c + \sigma \cdot \tan \phi$$

Dimana :

S = Kekuatan geser (kN/m^2)

c = kohesi (kN/m^2)

σ = tegangan vertikal (kN/m^2)

(Sumber : L.D. Wesley : *Mekanika Tanah* : 1977)

2.4. Prinsip Tegangan

2.4.1 Tegangan Vertikal

Tegangan vertikal merupakan tegangan pada lapisan tanah yang diakibatkan oleh beban dari tanah yang di atasnya tanpa memperhitungkan tegangan pori yang diakibatkan oleh air (u). Semakin jauh kedalaman tanah maka semakin besar tegangan vertikal nya.

Tegangan vertikal dapat dihitung dengan rumus :

$$\sigma_v = \gamma \cdot H$$

Dimana

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

σ_v = Tegangan vertikal

γ = berat isi lapisan tanah (kN/m^3)

h = Tebal lapisan tanah (m)

2.4.2. Tegangan Horizontal

Sedangkan tegangan horizontal adalah tegangan yang terjadi dalam kondisi jika terdapat suatu dinding yang terletak di dekat dengan elemen tanah yang akan ditinjau. Tegangan horizontal dapat dinyatakan dengan rumus :

$$\sigma_h = \sigma_v \cdot K_o$$

Dimana :

σ_h = Tegangan horizontal (kN/m^2)

σ_v = Tegangan vertikal (kN/m^2)

K_o = Koefisien tekanan tanah diam

2.4.3. Tekanan Tanah Aktif

Bila dinding tembok menerima suatu gaya akibat tekanan tanah dalam kondisi diam, agar dinding tetap stabil maka diperlukan suatu gaya yang sama besar dengan tekanan tanah tersebut serta berlawanan arah.

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

Seandainya gaya yang dikerjakan lebih kecil dari pada tekanan tanah, maka dinding/tembok itu akan bergerak dan tanah akan ikut bergerak/melendut. Ini dikatakan tanah adalah dalam keadaan aktif pada keseimbangan plastis.

Tekanan aktif dapat dinyatakan dalam rumus :

$$P_a = K_a \cdot \gamma \cdot h$$

Dimana :

$$P_a = \text{Tegangan tanah aktif (kN/m}^2\text{)}$$

$$K_a = \text{Koefisien tanah aktif}$$

$$\gamma = \text{Berat isi lapisan tanah (kN/m}^3\text{)}$$

$$h = \text{Tebal lapisan tanah (m)}$$

(Sumber : Sunggono : *Mekanika Tanah* : 1982)

2.5 Penyelidikan Tanah Lapangan

Dalam perencanaan suatu bangunan gedung, dinding penahan tanah, bendungan, jalan, jembatan dll, data tanah sangatlah dibutuhkan sebagai dasar awal perencanaan pondasi bangunan tersebut. Salah satu penyelidikan tanah lapangan adalah SPT (*Standard Penetration Test*).

Dalam SNI 4153,2008 dijelaskan bahwa SPT adalah suatu uji yang dilaksanakan bersamaan dengan pemboran untuk mengetahui baik perlawanan dinamik tanah maupun pengambilan contoh terganggu dengan teknik penumbukan. Uji SPT

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

terdiri atas uji pemukulan tabung belah dinding tebal ke dalam tanah, disertai pengukuran jumlah pukulan untuk memasukkan tabung belah sedalam 300 mm vertikal. Dalam sistem beban jatuh ini digunakan palu dengan berat 63,5 kg, yang dijatuhkan secara berulang dengan tinggi jatuh 0,76 m. Pelaksanaan pengujian dibagi dalam tiga tahap, yaitu berturut-turut setebal 150 mm untuk masing-masing tahap. Tahap pertama dicatat sebagai dudukan, sementara jumlah pukulan untuk memasukkan tahap ke-dua dan ke-tiga dijumlahkan untuk memperoleh nilai pukulan N atau perlawanan SPT (dinyatakan dalam pukulan/0,3 m).

2.5.1 Ketentuan dan Persyaratan Dalam Pelaksanaan SPT

Dalam SNI 4253 – 2008 dijelaskan ketentuan dan persyaratan dalam pelaksanaan SPT, antara lain :

1. Peralatan

Peralatan yang diperlukan dalam uji penetrasi dengan SPT adalah sebagai berikut :

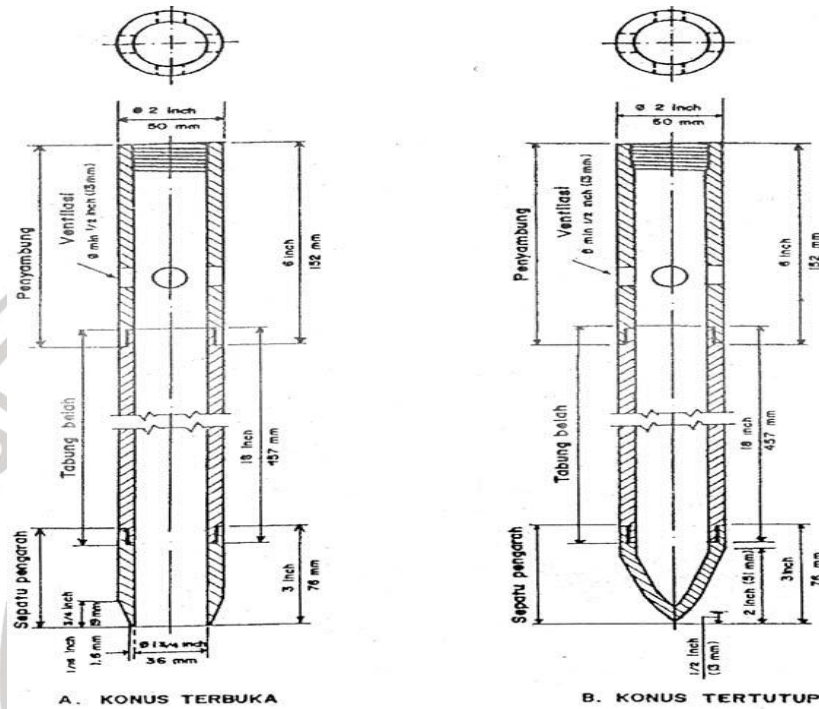
- a. Mesin bor yang dilengkapi dengan peralatannya,
- b. Mesin pompa yang dilengkapi peralatannya,
- c. *Split barrel sampler* yang dilengkapi dengan dimensi seperti diperlihatkan pada Gambar (ASTM D 1586-84),
- d. Palu dengan berat 63,5 kg dengan toleransi meleset 1%,
- e. Alat penahan (*tripod*),
- f. Rol meter,
- g. Alat penyipat datar,
- h. Kerekan,
- i. Kunci-kunci pipa,

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

- j. Tali yang cukup kuat untuk menarik palu,
- k. Perlengkapan lain.



Gambar 2.6. Alat Pengambilan Contoh Tabung Belah

2. Bahan dan perlengkapan

Bahan penunjang pengujian yang dipergunakan adalah :

- a. Bahan bakar (bensin, solar),
- b. Bahan pelumas,
- c. Balok dan papan,
- d. Tali atau selang,
- e. Kawat,
- f. Kantong plastik,
- g. Formulir untuk pengujian,

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

h. Perlengkapan lain.

3. Pengujian

Pengujian penetrasi dengan SPT

Hal – hal yang perlu diperhatikan dalam pengujian penetrasi dengan SPT adalah :

- a. Peralatan harus lengkap dan layak pakai,
- b. Pengujian dilakukan dalam lubang bor,
- c. Interval pengujian dilakukan dalam kedalaman 1,50 s.d 2,00 m (untuk lapisan tanah tidak seragam dan pada kedalaman 4,00 m kalau lapisan seragam,
- d. Pada tanah berbutir halus digunakan ujung split barrel berbentuk konus terbuka (*open cone*), dan pada pada lapisan pasir dan kerikil, digunakan ujung *split barrel* berbentuk konus tertutup (*close cone*),
- e. Contoh tanah tidak asli diambil dari *split barrel sampler*,
- f. Sebelum pengujian dilakukan, dasar lubang bor harus dibersihkan terlebih dahulu,
- g. Jika ada air tanah harus dicatat,
- h. Pipa untuk jalur palu harus berdiri tegak lurus untuk menghindari terjadinya gesekan antara palu dengan pipa,
- i. Formulir – fomulir isian hasil pengujian

2.5.2 Cara Pengujian Pelaksanaan SPT

Dalam SNI 4253 – 2008 dijelaskan pula cara pengujian pelaksanaan SPT, antara lain :

1. Persiapan pengujian

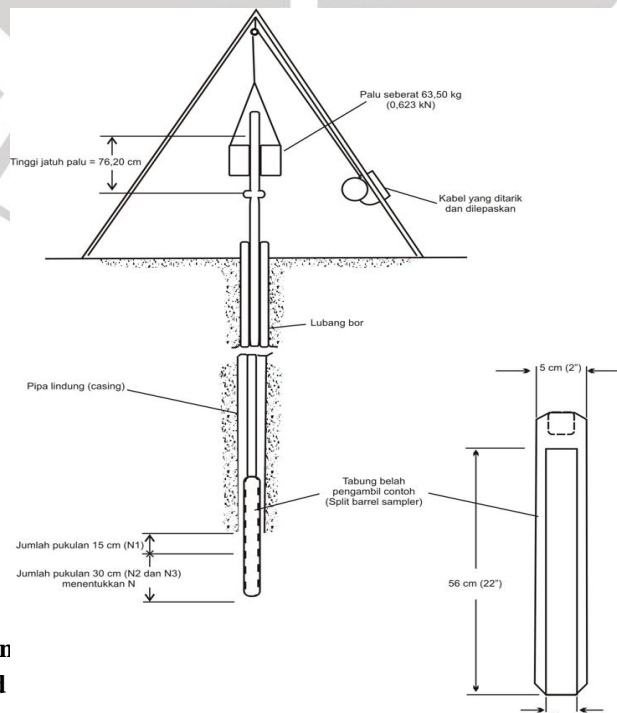
Lakukan persiapan pengujian SPT di lapangan dengan tahapan sebagai berikut :

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

- a. Pasang blok penahan (*knocking block*) pada pipa bor,
- b. Beri tanda pada ketinggian sekitar 75 cm pada pipa bor yang berada di atas penahan,
- c. Bersihkan lubang bor pada kedalaman yang akan dilakukan pengujian dari bekas – bekas pengeboran,
- d. Pasang *split baller sampler* pada pipa bor, dan pada ujung lainnya disambungkan dengan pipa bor yang telah dipasangi blok penahan,
- e. Masukkan peralatan uji SPT kedalam dasar lubang bor atau sampai kedalaman pengujian yang diinginkan,
- f. Beri tanda pada batang bor mulai dari muka tanah sampai ketinggian 15 cm, 30 cm dan 45 cm.

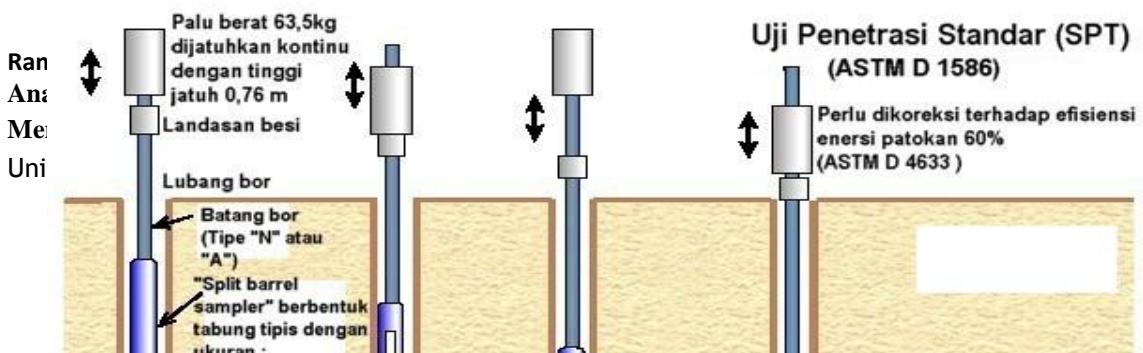


Gambar 2.7. Penetrasi Dengan SPT

2. Prosedur Pengujian

Lakukan pengujian dengan tahapan sebagai berikut :

- a. Lakukan pengujian pada setiap tahapan perubahan lapisan tanah atau pada interval sekitar 1,50 m s.d 2,00 m sesuai dengan keperluan,
- b. Tarik tali pengikat palu (*hammer*) sampai pada tanda yang telah dibuat sebelumnya (kira-kira 75 cm)
- c. Lepaskan tali sehingga palu jatuh bebas menimpa penahan
- d. Ulangi c dan d berkali – kali sampai mencapai penetrasi 15 cm
- e. Hitung jumlah pukulan atau tumbukan N pada penetrasi 15 cm yang pertama
- f. Ulangi b,c, d dan e sampai pada penetrasi 15 cm yang kedua dan ketiga
- g. Catat jumlah pukulan N pada setiap penetrasi 15 cm
15 cm pertama dicatat N_1
15 cm kedua dicatat N_2
15 cm ketiga dicatat N_3
Jumlah pukulan yang dihitung adalah $N_2 + N_3$, nilai N_1 tidak diperhitungkan karena masih kotor bekas pengeboran
- h. Bila nilai N lebih besar daripada 50 pukulan, hentikan pengujian dan tampah pengujian sampai minimum 6 meter,
- i. Catat jumlah pukulan pada setiap penetrasi 5 cm untuk jenis tanah batuan.

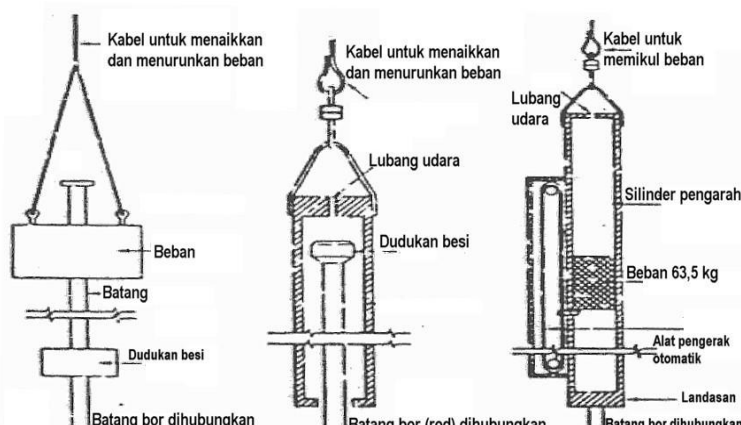


Gambar 2.8. Skema Urutan Uji Penetrasi Standar

2.5.3 Koreksi Hasil Uji SPT

Dalam pelaksanaan uji SPT di berbagai negara, digunakan tiga jenis palu (*donut hammer, safety hammer, dan otomatis*, periksa Gambar 2.15) dan empat jenis batang bor (N, NW, A, dan AW), lihat Pedoman penyelidikan geoteknik untuk fondasi bangunan air”, Vol.1 (Pd.T-03.1- 2005-A). Ternyata uji ini sangat bergantung pada alat yang digunakan dan operator pelaksana uji. Faktor yang terpenting adalah efisiensi tenaga dari sistem yang digunakan. Secara teoritis tenaga sistem jatuh bebas dengan massa dan tinggi jatuh tertentu adalah 48 kg-m (350 ft-lb), tetapi besar tenaga sebenarnya lebih kecil karena pengaruh friksi dan eksentrisitas beban. Adapun koreksi hasil uji SPT adalah sebagai berikut :

Ramadani, 2012
Analisis Stabilit
Menggunakan P
Universitas Penc



Dukuh Atas

Gambar 2.9. Contoh palu yang biasa digunakan dalam uji SPT

Menurut ASTM D-4633 setiap alat uji SPT yang digunakan harus dikalibrasi tingkat efisiensi tenaganya dengan menggunakan alat ukur strain gauges dan aselerometer, untuk memperoleh standar efisiensi tenaga yang lebih teliti. Di dalam praktek, efisiensi tenaga sistem balok derek dengan palu donat (*donut hammer*) dan palu pengaman (*safety hammer*) berkisar antara 35% sampai 85%, sementara efisiensi tenaga palu otomatis (*automatic hammer*) berkisar antara 80% sampai 100%. Jika efisiensi yang diukur (E_f) diperoleh dari kalibrasi alat, nilai N terukur harus dikoreksi terhadap efisiensi sebesar 60%, dan dinyatakan dalam rumus

$$N_{60} = (E_f / 60) N_M$$

N_{60} : efisiensi 60%

E_f : efisiensi yang terukur

N_M : nilai N terukur yang harus dikoreksi.

Nilai N terukur harus dikoreksi pada N_{60} untuk semua jenis tanah. Besaran koreksi pengaruh efisiensi tenaga biasanya bergantung pada lining tabung, panjang batang, dan diameter lubang bor (Skempton (1986) dan Kulhawy & Mayne (1990)).

Oleh karena itu, untuk mendapatkan koreksi yang lebih teliti dan memadai terhadap

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

N_{60} , harus dilakukan uji tenaga Ef. Efisiensi dapat diperoleh dengan membandingkan pekerjaan yang telah dilakukan :

$W = F \times d = \text{ gaya } \times \text{ alihan } ;$

tenaga kinetik ($KE = \frac{1}{2} mv^2$)

tenaga potensial : $PE = mgh ;$

dengan :

m : massa (g) ;

v : kecepatan tumbukan (m/s);

g : konstanta gravitasi ($= 9,8 \text{ m/s}^2 = 32,2 \text{ ft/s}^2$);

h : tinggi jatuh (m).

Jadi rasio tenaga (ER) ditentukan sebagai rasio $ER = W/PE$ atau $ER = KE/PE$.

Semua korelasi empirik yang menggunakan nilai NSPT untuk keperluan interpretasi karakteristik tanah, didasarkan pada rasio tenaga rata-rata $ER \sim 60\%$. Dalam beberapa hubungan korelatif, nilai tenaga terkoreksi N_{60} yang dinormalisasi terhadap pengaruh tegangan efektif vertikal (overburden), dinyatakan dengan $(N1)_{60}$, seperti dijelaskan dalam persamaan (2), (3) dan Tabel 1. Nilai $(N1)_{60}$ menggambarkan evaluasi pasir murni untuk interpretasi kepadatan relatif, sudut geser, dan potensi likuifaksi.

$$(N1)_{60} = N_M \times C_N \times C_E \times C_B \times C_R \times C_S$$

$$C_N = 2,2 / (1,2 + (\sigma'_{vo}/Pa))$$

dengan :

$(N1)_{60}$: nilai SPT yang dikoreksi terhadap pengaruh efisiensi tenaga 60%;

N_M : hasil uji SPT di lapangan;

C_N : faktor koreksi terhadap tegangan vertikal efektif (nilainya $\leq 1,70$);

C_E : faktor koreksi terhadap rasio tenaga palu (Tabel 1);

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

C_B : faktor koreksi terhadap diameter bor (Tabel 1);

C_R : faktor koreksi untuk panjang batang SPT (Tabel 1);

C_S : koreksi terhadap tabung contoh (samplers) dengan atau tanpa pelapis (liner)
(Tabel 1);

σ'_{vo} : tegangan vertikal efektif (kPa);

P_a : 100 kPa.

Tabel 2.8.
Koreksi – koreksi yang digunakan dalam uji SPT
(Youd, T.L. & I.M., 2001)

Faktor	Jenis Alat	Parameter	Koreksi
Tegangan vertikal efektif		C_N	$2,2 / (1,2 + (\sigma'_{vo}/P_a))$
Tegangan vertikal efektif		C_N	$C_N \leq 1,7$
Rasio tenaga	Palu donat (<i>Donut hammer</i>)	C_E	0,5 s.d 1,0
Rasio tenaga	Palu pengaman (<i>Safety hammer</i>)	C_E	0,7 s.d 1,2
Rasio tenaga	Palu otomatis (<i>Automatic-trip Donut-type hammer</i>)	C_E	0,8 s.d 1,3
Diameter bor	65 s.d 115 mm	C_B	1,0
Diameter bor	150 mm	C_B	1,05
Diameter bor	200 mm	C_B	1,15
Panjang batang	< 3 m	C_R	0,75
Panjang batang	3 s.d 4 m	C_R	0,8
Panjang batang	4 s.d 6 m	C_R	0,85
Panjang batang	6 s.d 10 m	C_R	0,95
Panjang batang	10 s.d 30 m	C_R	1,0
Pengambilan contoh	tabung standar	C_S	1,0
Pengambilan contoh	tabung dengan pelapis (<i>liner</i>)	C_S	1,1 s.d 1,3

(Sumber SNI 4253:2008. Cara Uji Penetrasi Lapangan dengan SPT, 2008)

2.6. Konstruksi Terowongan Pada Tanah Lunak

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

2.6.1. Analisis Stabilitas dan Deformasi Pada Terowongan

Paulus P Rahardjo (2004) menyatakan dalam rekayasa terowongan, pengertian tanah lunak adalah material yang dapat digali secara manual. Tanah yang lunak di sekitar lokasi yang akan dibuat terowongan tentunya sangat menguntungkan jika dilihat dari segi pelaksanaan pembuatan terowongan, karena penggalian yang dilakukan tentunya akan semakin mudah dengan hampir tidak menemui material lain yang sedikit menyulitkan proses penggalian. Akan tetapi, tanah yang lunak juga memberikan beberapa kerugian. Tanah yang lunak tentunya sedikit banyak akan mengalami keruntuhan yang jika tidak diperhitungkan dan tidak segera diatasi akan membahayakan keselamatan pekerja.

Tanah yang lunak dan kokoh pada dasarnya mempunyai kekurangan dan kelebihan masing – masing dalam pembuatan terowongan, tanah yang lunak akan memberikan kemudahan dalam proses penggalian sehingga pekerjaan dapat dikatakan ringan karena tidak harus menggali batuan yang tentunya akan menyulitkan proses penggalian. Sebaliknya tanah yang kokoh akan memberikan keuntungan berupa lubang bukaan dapat dibiarkan kosong dengan artian dapat dibiarkan tanpa penyokong untuk beberapa waktu.

Untuk memudahkan para pelaksana terowongan, Terzaghi membuat tabel klasifikasi tanah dengan tujuan membedakan tanah yang akan digali sebagai gambaran para pelaksana terowongan dalam melaksanakan pekerjaannya.

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

Tabel 2.9.
Klasifikasi Tanah untuk Terowongan (Terzaghi, 1950)

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

Dalam bukunya yang berjudul Teknik Terowongan (1988), Made Astawa Rai menjelaskan bahwa analisis kestabilan terowongan dapat dikategorikan menjadi beberapa metoda. berikut ini adalah beberapa metoda rancangan untuk menilai kestabilan terowongan yang dikategorikan menjadi beberapa bagian sebagai berikut :

1. Metoda analitik (*analytical method*)

Metoda analitik adalah sebuah cara untuk menganalisis tegangan dan deformasi disekitar lubang bukaan. Teknik yang biasa dipergunakan adalah :

- a. Perhitungan numerik seperti : metoda elemen hingga (*finite element methods*), metoda perbedaan hingga (*finite difference methods*), metoda unsur batas (*boundary elements methods*).
- b. Simulasi analogi (*analog simulation*) seperti analogi listrik dan fotoelastik,
- c. Model fisik (*physical modeling*) yaitu penggunaan maket seperti pekerjaan – pekerjaan teknik sipil lainnya seperti bendungan.

Metoda analitik yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah persamaan – persamaan yang dikeluarkan oleh *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration* dan *Standard Specifications for Tunneling* yang dikeluarkan oleh Jepang tahun 2006. Metoda analitik sekaligus dimaksudkan sebagai kriteria desain. Kriteria desain tersebut antara lain :

1. Stabilitas dan Deformasi Terowongan

- Stabilitas terowongan harus memiliki nilai rasio < 6

Untuk menghitung nilai rasio dapat menggunakan persamaan :

$$N_{crit} = \frac{(P_z - P_a)}{c_u}$$

Dimana :

P_z = Tekanan total vertikal pada kedalaman z pada tengah terowongan

(kN/m^2)

P_a = Tekanan atmosfer (kN/m^2)

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

C_u = Kekuatan geser tak terdrainase (kN/m^2)

Nilai yang didapat digunakan untuk memprediksi perilaku tanah terhadap struktur yang dimana nilai – nilai yang dihasilkan memiliki sifat perilaku tersendiri pada setiap nilainya. Seperti yang digambarkan pada tabel :

Tabel 2.10.
Perilaku Terowongan pada Clayey dan Silty Sand (after Bickel al,1996)

Stability factor, N_{crit}	Soft Ground Tunnel Behaviour
Cohesive Soil	
1	Stable
2-3	Small creep
4-5	Creeping, usually slow enough to permit Tunneling
6	May produce general shear failure. Clay likely to invade tail space too quickly to handle
Silty Sand Above Water Table (with some apparent cohesion)	
1/4 - 1/3	Firm
1/3 - 1/2	Slow Raveling
1/2 - 1	Raveling

- Deformasi dinding terowongan dibatasi hanya hingga 6% dari diameter terowongan.

2. Penurunan Pada Permukaan Bawah Tanah

Seperti dijelaskan dalam *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration : Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnel – Civil Elements* bahwa penurunan yang terjadi pada permukaan tanah pada pekerjaan terowongan pada tanah lunak besarnya diasumsikan dengan jumlah kehilangan tanah pada saat proses penggalian. Dalam praktek pengerjaan terowongan dengan

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

menggunakan *Tunnel Boring Machine* (TBM) volume kehilangan tanah akan semakin kecil dikarenakan prinsip kerja TBM yang menekan permukaan tanah. Pekerjaan penggalian dengan menggunakan alat – alat modern akan semakin memperkecil nilai kehilangan tanah akibat proses penggalian. Berikut adalah korelasi kehilangan tanah dengan cara penggalian dan kondisi tanah:

*Tabel 2.11.
Hubungan Volume Loss dan Cara Penggalian dan Kondisi tanah*

Case	VL (%)
Good practice in firm good ; tight control of face pressure within closed face machine in slowly raveling or squeezing ground	0,5
Usual practice with closed face machine in slowly raveling or squeezing Ground	1,0
Poor practice with closed face in raveling ground	2
Poor practice with closed face machine in poor (fast raveling) ground	3
Poor practice with little face control in running ground	4.0 or more

Untuk ketentuan penurunan adalah harus memiliki nilai $< 10\text{mm}$ sesuai dengan USSR code.

*Tabel 2.12.
Penurunan izin bangunan sesuai dengan USSR CODE untuk kondisi frozen dan unfrozen*

Structure	On sand or hard clay	On Plastic	Avreage max, settlement,mm
Crane runway	0.003	0.003	
Steel snd concrete frames	0.002	0.002	100
End rows of brick - clad frame	0.0007	0.001	150
Where strain does not occur	0.005	0.005	
Multistory brick wall			25 L/H \geq 2.5
L/H to 3	0.0003	0.0004	100 L/H \geq 1.5
Multistory brick wall			
L/H to 5	0.0005	0.0007	
One story mill buildings	0.001	0.001	

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

Smokestack, water towers, ring foundation	0.004	0.004	300
-------------------------------------------	-------	-------	-----

(Bowles,1997).

Adapun untuk perhitungan penurunan terowongan di formulasikan kedalam persamaan sebagai berikut (Schmidt,1974) :

Dimana, $W = W_{max} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right)$

w = Settlement, x is distance from tunnel or pipeline centerline

i = Distance to point of inflection on the settlement trough

Hubungan penurunan dengan jarak :

$$i = KZ_0$$

Dimana,

K = Parameter penurunan tanah (*function of soil*)

Z₀ = Kedalaman dari permukaan tanah ke titik pusat terowongan

Penurunan maksimum

$$W_{max} = \frac{V_L \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2}{2,5 \cdot i}$$

Dimana,

V_L = Kehilangan tanah saat penggalian

D = diameter terowongan

Ramadani, 2012

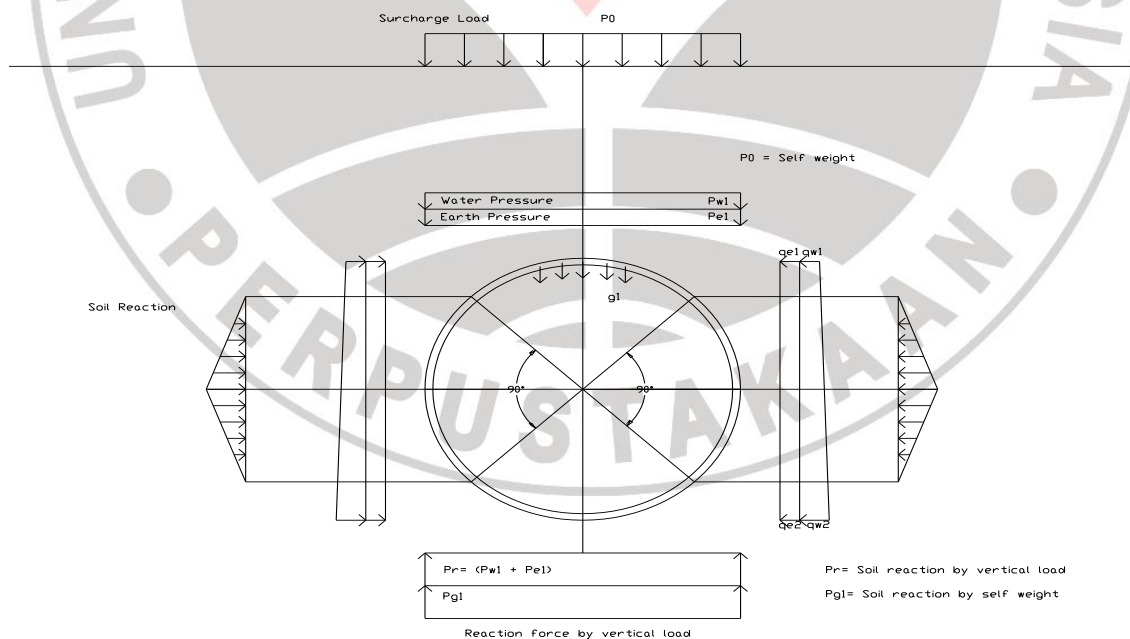
Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

(Sumber : U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration :Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnel – Civil Elements : 2009)

3. Perhitungan Manual Deformasi Terowongan

Perhitungan dimulai dari menghitung gaya – gaya yang bekerja pada *lining* atau dinding terowongan dan mencari momen yang bekerja pada dinding terowongan. Berikut adalah diagram gaya yang bekerja pada terowongan (*Japan Standard Specification for Tunneling, 2006*) :



Gambar 2.10. Diagram gaya pada circular tunnel

Berdasarkan diagram pada gambar 2.3 diatas, maka didapat persamaan – persamaan sebagai berikut untuk mencari beban – beban yang bekerja:

1. Vertikal

- Vertikal load

$$VL = P_{e1} + P_{w1}$$

- Bending moment

$$M = \frac{1}{4}(1 - 2\sin^2 \theta)(P_{e1} + P_{w1})Rc^2$$

- Axial force

$$N = (P_{e1} + P_{w1})Rc.\sin^2 \theta$$

- Shear force

$$Q = -(P_{e1} + P_{w1})Rc.\sin \theta.\cos \theta$$

2. Horizontal

- Horizontal load

$$HL = q_{e1} + q_{w1}$$

- Bending moment

$$M = \frac{1}{4}(1 - 2\cos^2 \theta)(q_{e1} + q_{w1})Rc^2$$

- Axial force

$$N = (q_{e1} + q_{w1})Rc.\cos^2 \theta$$

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

- Shear force

$$Q = (q_{e1} + q_{w1})Rc.\sin\theta.\cos\epsilon$$

3. Horizontal Triangular

- Horizontal triangular load

$$HT = q_{e2} + q_{w2} - q_{e1} - q_{w1}$$

- Bending moment

$$M = \frac{1}{48}(6 - 3\cos\theta - 12\cos^2\theta + 4\cos^3\theta)(q_{e2} + q_{w2} - q_{e1} - q_{w1})Rc^2$$

- Axial force

$$N = \frac{1}{16}(\cos\theta + 8\cos^2\theta - 4\cos^3\theta)(q_{e2} + q_{w2} - q_{e1} - q_{w1})Rc$$

- Shear force

$$Q = \frac{1}{16}(\sin\theta + 8\sin.\cos\theta - 4\sin\theta.\cos^2\theta)(q_{e2} + q_{w2} - q_{e1} - q_{w1})Rc$$

4. Dead weight

- Load

$$P_{g1} = \pi. g_1$$

- Bending moment

$$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

$$M = \left(\frac{3}{8}\pi - \theta.\sin\theta - \frac{5}{6}\cos\theta \right)g.Rc^2$$

- Axial force

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

$$N = (-\pi \cdot \sin\theta + \theta \cdot \sin\theta + \pi \cdot \sin^2\theta - \frac{1}{6} \cdot \cos\theta) \cdot g \cdot Rc$$

- Shear force

$$Q = \{(\pi \cdot \theta) \cos\theta - \pi \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta - \frac{1}{6} \sin\theta\} \cdot g \cdot Rc$$

5. Soil reaction

- Load

$$q_r = k \cdot \delta$$

- Bending moment

$$\frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

$$M = (-0.3487 + 0.5 \sin^2\theta + 0.2357 \cos^2\theta) k \cdot \delta \cdot Rc^2$$

- Axial force

$$\frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

- Shear force

$$\frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

6. Springline deformation

- Without considering soil reaction derived from dead weight of lining

$$\delta = \frac{\{2(P_{e1} + P_{w1}) - (q_{e1} + q_{w1}) - (q_{e2} + q_{w2})\} Rc^4}{24(\eta \cdot EI + 0.0454k \cdot Rc^4)}$$

- Considering soil reaction derived from dead weight of lining

$$\delta = \frac{\{2(P_{e1} + P_{w1}) - (q_{e1} + q_{w1}) - (q_{e2} + q_{w2}) + \pi \cdot g\} Rc^4}{24(\eta \cdot EI + 0.0454k \cdot Rc^4)}$$

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

Setelah didapat momen dari hasil perhitungan – perhitungan maka perlu untuk dikaji kekuatan struktur terowongan itu sendiri, hasil yang didapat dikomparasikan dengan spesifikasi struktur perencanaan dengan berpedoman pada kekuatan ijin beton yang dikeluarkan oleh *Standard Specifications for Tunneling* sebagai berikut :

Tabel 2.13.
Tegangan izin untuk beton bertulang cast – in – situ (N/mm²)

Specified compressive strength	σ_{ck}	18	21	24	27	30
Allowable compressive stress for bending moment	σ_{ca}	7	8	9	10	11
Allowable standard shearing stress	τ_a	0.55	0.58	0.6	0.63	0.65
Shearing stress by bending	τ_a	0.55	0.58	0.6	0.63	0.65
Allowable bond stress (deformed bar)	τ_0	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
Allowable bearing stress						
Overall loading	σ_{ba}	6	7	8	9	10
Local area loading	σ_{ba}	$\sigma_{ba} \leq 1/3 \cdot \sigma_{ck} \sqrt{A/A_a}$				

4. Metoda pengamatan (*observational method*)

Adalah metoda yang mengadakan analisis berdasarkan pada data pemantauan pergerakan massa tanah atau batuan sewaktu penggalian untuk mengamati ketidakmampuan dan analisis interaksi penyangga terhadap massa batuan.

5. Metoda empiric (*empirical method*)

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

Metoda empirik adalah salah satu metoda untuk menilai kestabilan sebuah terowongan dengan menggunakan analisis statistik. Biasanya kegiatan – kegiatan yang dilaksanakan dengan cara melakukan pendekatan – pendekatan berdasarkan pada pengalaman beberapa pekerjaan terowongan sebelumnya.

(Sumber : Japan Society of Civil Engineering : Standard Specification for Tunneling : Shield Tunnel, 2006)

2.6.2. Pengendalian Air Tanah

Pembuatan terowongan (*tunnel*) merupakan pekerjaan yang memiliki karakteristik unik, yang harus mempertimbangkan pengendalian air tanah. Masalah dewatering baru timbul, bila letak terowongan berada di bawah muka air tanah (*ground water level*).

Bila tanah di sekitar *tunnel* cukup kohesif atau *well graded* maka air tanah mudah dikendalikan, tapi bila tanah di sekitar *tunnel* terdiri dari *uniform fine sand* atau *silty sand* maka rembesan air yang kecil pun dapat menyebabkan keruntuhan tanah. Untuk itu perlu tambahan pekerjaan dewatering. Beberapa metode dewatering yang dapat digunakan pada tunnel adalah :

1. Dewatering dengan *Predrainage*

Metode ini paling mudah dan sederhana, tetapi bila *tunnel* cukup dalam atau melalui banyak bangunan di atasnya, maka akan sangat mahal. Bila pelaksanaan *tunnel* mengalami masalah maka akan langsung berpengaruh kepada biaya *predrainage*

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

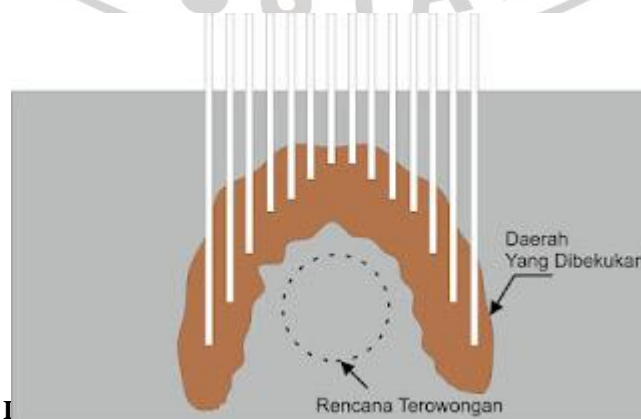
perharinya. Keputusan penggunaan sistem ini harus dipikirkan masak – masak sebelum pelaksanaan *tunnel* dimulai.

2. Dewatering dengan Tekanan Udara (*Compressed Air*)

Konsep dewatering dengan metode ini sederhana, yaitu tekanan udara di dalam tunnel dijaga agar lebih besar daripada tekanan rembesan air tanah. Secara sederhana pertimbangan hidrostatik dapat dijelaskan bahwa setiap tekanan 1 psi dapat mengatasi tekanan tinggi air sebesar 2,31 ft atau setiap tekanan 1kg/cm^2 dapat mengatasi tekanan tinggi air sebesar 10 meter. Analisis hidrostatik ini hanya digunakan sebagai pedoman kasar saja, karena pada kenyataannya tekanan udara pada tunnel dipengaruhi oleh hubungan yang kompleks antara beberapa faktor.

3. Dewatering dengan Pembekuan (*Freezing*)

Pada daerah dingin, ada kemungkinan alternatif menggunakan dewatering dengan teknik pembekuan air tanah. Tempat atau daerah yang akan dibangun terowongan, air tanahnya harus dibekukan dengan proses elektrik, sehingga pada waktu dilakukan penggalian terowongan tidak terjadi kesulitan air tanah. Setelah proses pemasangan steel support galian, proses pembekuan dapat dihentikan.



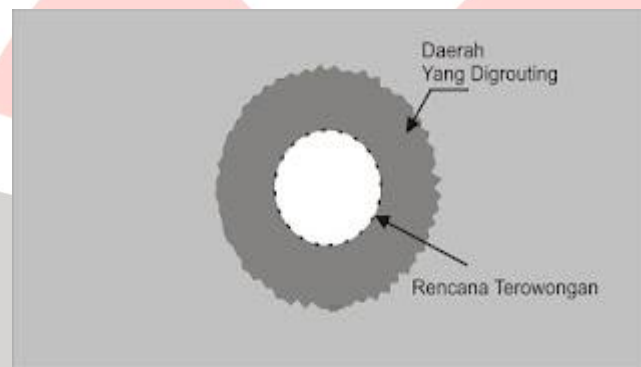
Ramadani, 2012
Analisis Stabilitas I
Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Jilir – Dukuh Atas

Gambar 2.11. Freezing

4. Dewatering dengan *Grouting*

Bila proses pembekuan air tanah tidak dapat diambil sebagai alternatif, maka dapat digunakan dewatering dengan metode *grouting*. Prosesnya adalah daerah sekitar terowongan dilakukan *grouting*, sehingga pada saat penggalian air tanah tidak akan mengganggu.



Gambar 2.12. Grouting

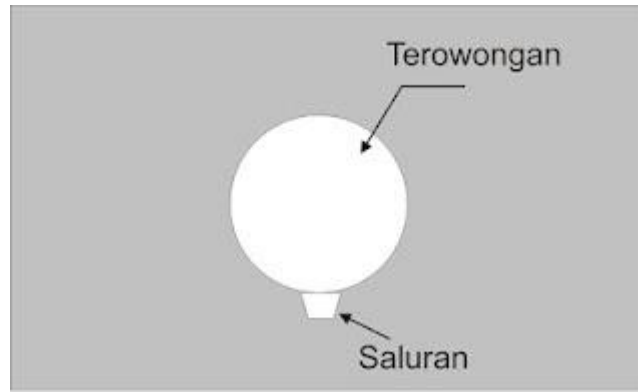
5. Dewatering dengan Saluran (*Subdrainage*)

Untuk tanah yang kecepatan rembesannya kecil, air tanah tidak akan banyak mengganggu pelaksanaan pekerjaan. Namun demikian kumpulan air tanah tersebut harus dapat disalurkan keluar melalui saluran di dasar terowongan.

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu



Gambar 2.13. Subdrainage

(Sumber : <http://belajarsipil.blogspot.com/2012/06/tunnel-dewatering.html>)

2.7 Perencanaan Metoda Penggalian

2.7.1 Tunnel Boring Machine (TBM)

Tunnel Boring Machine (TBM) adalah suatu alat penggali terowongan yang biasa digunakan pada kasus pembuatan terowongan pada batuan maupun tanah lunak. *Tunnel Boring machine* bukan suatu alat yang terdiri dari beberapa komponen, jadi TBM adalah suatu alat kesatuan yang terdiri atas beberapa komponen, bukan suatu alat tunggal yang dinamakan *Tunnel Boring Machine*.

TBM terdiri dari beberapa perangkat pendukung antara lain alat pemotong (*cutter head*), alat pengambilan material, system pengemudi, *gripping*, penggali, pembor, pengontrol dan penyokong tanah, pemasangan *lining*, alat pemindah material, sistem ventilasi. Dengan demikian, terlihat dari perangkat atau komponen yang terdapat pada TBM bahwa itu sangat mendukung proses penggalian terowongan dengan hasil yang dapat dikatakan lebih baik dari proses penggalian secara manual. Selain itu, TBM adalah perangkat otomatis yang minim sumberdaya sehingga dapat mengurangi resiko kecelakaan dalam proses penggalian secara manual. Berikut adalah kelebihan dan

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

kekurangan penggalian terowongan dengan menggunakan *Tunnel Boring Machine* (TBM) :

kelebihan:

1. Sesuai penggalian profil,
2. Proses otomatis dan terus-menerus bekerja,
3. Rendah personil dan pengeluaran,
4. kondisi kerja yang lebih baik dan aman,

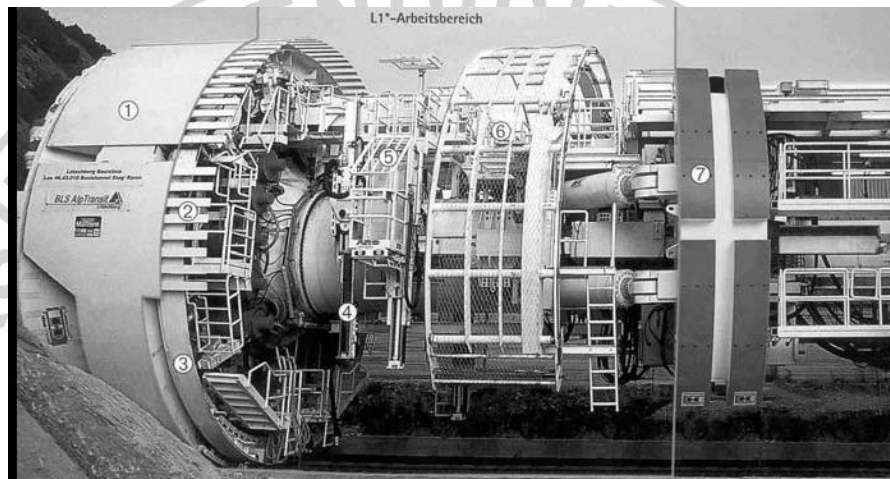
kekurangan:

1. penyelidikan geologi yang lebih baik dan informasi yang diperlukan dari untuk pengeboran dan peledakan,
2. Investasi yang tinggi,
3. Memerlukan waktu yang lama untuk merangkai alat,
4. Profile penggalian yang dibuat berupa lingkaran,
5. Keterbatasan pada jari-jari kurva dan pembesaran,
6. Diperlukan perencanaan yang detail,
7. Adaptasi terhadap berbagai jenis batuan dan air yang tinggi dalam arus hanya mungkin sampai batas yang terbatas,
8. Transportasi untuk mendatangkan alat ke lapangan memerlukan usaha ekstra.

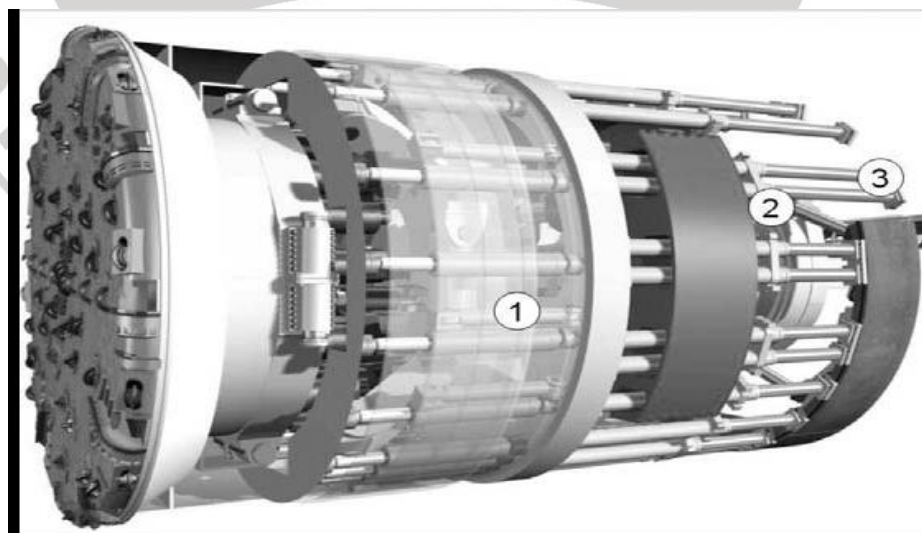
Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu



Gambar 2.14. Tunnel Boring Machine



Gambar 2.15. Tunnel Boring Machine

Meskipun lebih banyak item kekurangan dibanding kelebihan, akan tetapi keuntungan teknis, faktor keamanan dan ekonomi dan sumber daya dan hasil yang sesuai dengan harapan merupakan titik berat keuntungan penggalian dengan menggunakan *Tunnel Boring Machine* (TBM).

2.7.2 Sistem Penggalian

Sistem penggalian adalah yang paling penting dan menentukan kinerja sebuah TBM. TBM pada umumnya terdiri dari *cutter housing with disc cutter* yang terdapat pada bagian depan mesin tersebut.

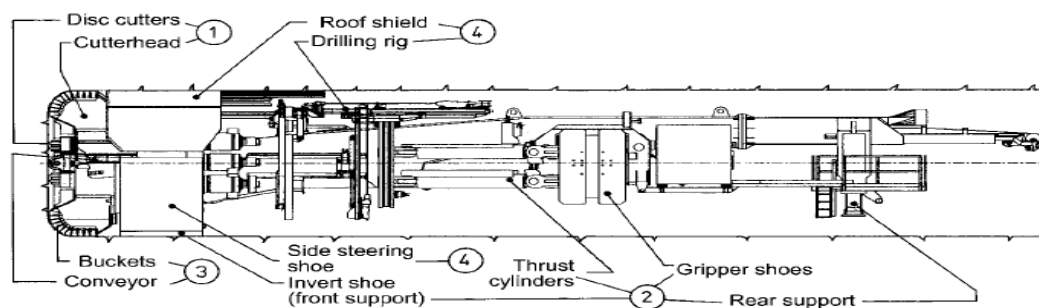


Figure 2-1
System groups of a tunnel boring machine
① Boring system
② Thrust and clamping system
③ Muck removal system
④ Support system

Gambar 2.16. Konstruksi TBM

Seperti gambar 2.14 bahwa cara kerja TBM adalah ketika cakram diatur untuk memotong seluruh bagian penampang terowongan di trek konsentris maka mesin akan menekan bagian kepala pemotong (*cutterheads*) dengan tekanan tinggi terhadap penampang terowongan.

Cakram akan membuat gerakan mengiris pada penampang terowongan dikarenakan tekanan pada *disc cutter* melebihi kekuatan tekan batu atau tanah.

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

Dikarenakan *disc cutter* memiliki efek tersendiri maka penampang yang dihasilkan setelah pemotongan akan lebih rapih dan halus.

a. Sistem Penjepit dan Pendorong (*Thrust and Clamping Sistem*)

Tunnel Boring Machine adalah suatu alat penggali terowongan dengan cara memotong dan membelah, oleh karena itu cara kerja untuk memotong dan membelah sangat dipengaruhi oleh kemampuan mesin untuk mendorong *cutterheads* agar dapat menjepit elemen yang akan digali. Kemampuan piston sebagai alat pendorong dan penjepit sangat bertanggung terhadap proses penggalian dikarenakan pada prosesnya *cutterheads* dengan *driveunit* harus sampai pada penampang terowongan, oleh sebab itu dibutuhkan daya dorong yang dibantu oleh silinder hidrolik.

Kekuatan sistem pendorong adalah dibatasi, dikarenakan sistem pendorong harus menyesuaikan daya dorongnya berdasarkan kemampuan *disc cutter* untuk memotong bagian dari terowongan. Jadi, ketika kapan sistem pendorong harus dalam keadaan maksimum untuk mendorong adalah berdasarkan hasil galian yang diperoleh oleh *disc cutter* terhadap kondisi alami galian.

Sedangkan fungsi penjepit (*grippers*) adalah ketika *cutterheads* telah berhasil menggali dan masuk kedalam galian, maka *grippers* akan menjepitkan mesin ke bagian terowongan sehingga TBM memiliki kemampuan untuk menggali lebih dalam.

b. *Muck Removal Sistem*

Ketika proses penggalian, maka material galian harus segera dikeluarkan dari terowongan agar tidak mempersulit kegiatan penggalian yang lebih jauh. TBM dengan

Ramadani, 2012

Analisis Stabilitas Dan Deformasi Tunnel Subway Ruas Bendungan Hilir – Dukuh Atas Menggunakan Plaxis 3d Tunnel

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu

mesin yang canggih didukung oleh *muck removal system* yang bekerja secara terus – menerus yang memastikan material galian dapat dikeluarkan dari terowongan dengan sistem *conveyor*.

Proses ini tidaklah tanpa masalah, terkadang material yang harus dikeluarkan dapat menyumbat *conveyor* dikarenakan material yang terlalu banyak atau mengandung air hingga dapat menghambat atau menyumbat *conveyor*.

c. **Komponen pendukung**

Dengan berbagai komponen yang ada, tentunya TBM memerlukan beberapa perangkat pendukung untuk menjamin kelancaran operasi *Tunnel Boring Machine* dalam proses penggalian terowongan. Perangkat tersebut antara lain adalah ventilasi sebagai sistem sirkulasi udara sumber daya manusia yang berada di dalam TBM, kereta yang berfungsi sebagai alat transportasi lokal untuk mengangkut mesin yang rusak ataupun logistik yang diperlukan dalam proses pengoperasian *Tunnel Boring Machine*.

(Sumber : B.Maidl et.al : *Hard Rock Tunnel Boring Machine*, 2008)