

## **BAB II**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Terowongan**

Terowongan merupakan struktur yang berupa tembusan di bawah permukaan tanah atau gunung. 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*.

Menurut Asiyanto (2012) terowongan biasanya digunakan untuk untuk lalu-lintas kendaraan, pejalan kaki, atau pengendara sepeda. Namun, ada pula terowongan yang berfungsi mengalirkan air untuk mengurangi banjir, terowongan saluran pembuangan, pembangkit listrik, dan terowongan yang menyambungkan kabel telekomunikasi.

Terowongan umumnya dibuat melalui berbagai jenis lapisan tanah dan bebatuan sehingga metode konstruksi pembuatan terowongan tergantung dari keadaan tanah. Dalam tahap konstruksinya, terowongan memerlukan pengawasan yang lebih karena adanya sedikit kesalahan metode dapat mengakibatkan keruntuhan.

#### **2.2 Klasifikasi Tanah**

Klasifikasi tanah merupakan suatu sistem pengaturan pada beberapa jenis tanah yang berbeda-beda tapi mempunyai sifat yang serupa ke dalam kelompok-kelompok dan subkelompok-subkelompok berdasarkan pemakaiannya. Dengan

adanya sistem klasifikasi ini akan menjelaskan secara singkat sifat-sifat umum tanah yang sangat bervariasi. Klasifikasi ini pada umumnya didasarkan sifat-sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran dan plastisitas. Namun semuanya tidak memberikan penjelasan yang tegas tentang kemungkinan pemakaiannya. Menurut Das Braja (1993) sistem klasifikasi tanah dapat dibagi menjadi dua, yaitu :

a. Klasifikasi berdasarkan tekstur

Sistem klasifikasi ini didasarkan pada keadaan permukaan tanah yang bersangkutan, sehingga tekstur tanah dipengaruhi oleh ukuran tiap butir dalam tanah. Klasifikasi ini sangat sederhana, didasarkan pada distribusi ukuran tanah saja. Pada klasifikasi ini tanah dibagi menjadi kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*) dan lempung (*clay*).

b. Klasifikasi berdasarkan pemakaian

Sistem klasifikasi ini relatif sederhana karena hanya didasarkan pada distribusi ukuran butiran tanah saja. Tetapi, sifat fisis tanah sangat dipengaruhi oleh jumlah dan jenis dari mineral lempung yang dikandung oleh tanah. Oleh karena itu, perlu untuk memperhitungkan sifat plastisitas tanah, yang disebabkan adanya kandungan mineral lempung, agar dapat mengklasifikasi ciri-ciri suatu tanah.

Pada saat ini terdapat dua sistem klasifikasi tanah yang sering dipakai dalam bidang teknik. Kedua sistem klasifikasi ini memperhitungkan distribusi ukuran butir dan batas-batas *Atterberg*. Sistem klasifikasi tanah tersebut yaitu :

a. Sistem Klasifikasi *Unified Soil Classification System*

Pada sistem klasifikasi ini, tanah diklasifikasikan ke dalam tanah berbutir kasar (kerikil dan pasir) jika kurang dari 50% lolos saringan nomor 200, dan sebagai

tanah berbutir halus (lanau/lempung) jika lebih dari 50% lolos saringan nomor 200. Dalam mengklasifikasikannya, dapat dilihat pada tabel berikut :

Divisi Utama		Simbol Kelompok	Nama Jenis	Kriteria laboratorium
Tanah berbutir kasar 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0.075 mm)	Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar ter-tahan saringan no. 4 (4.75 mm)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir - kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ , $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk GW
		GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir - kerikil, atau tidak mengandung butiran halus	
		GM, GC	Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir-lempung Kerikil berlempung, campuran kerikil pasir-lempung	
	Pasir lebih dari 50 % fraksi kasar lolos saringan no. 4 (4.75 mm)	SW, SP	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus Pasir gradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ , $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk SW
		SM, SC	Pasir berlanau, campuran pasir - lanau Pasir berlempung, campuran pasir - lempung	
Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0.075 mm)	Lanau dan lempung batas cair 50 % atau kurang	ML, CL, OL	Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau berlempung Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus ("lean clays") Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah	<p>Diagram plastisitas untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang terandung dalam tanah berbutir halus dan tanah berbutir kasar. Batas Atterberg yang termasuk dalam daerah yang diarsir berarti batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol.</p> <p>Batas Cair LL (%) Garis A : <math>PI = 0,73 (LL - 20)</math></p>
		MH, CH, OH	Lanau tak organik atau pasir halus dialomae, lanau elastis Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk ("fat clays") Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi	
		PI	Gambut ("peat") dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi	
	Lanau dan lempung batas cair > 50 %			
Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488				

Gambar 2.1 Sistem Klasifikasi Unified  
Sumber : Mekanika Tanah Jilid I, 1993.

b. Sistem Klasifikasi AASHTO

Sistem klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials Classification*) bermanfaat untuk menentukan kualitas tanah guna pekerjaan jalan yaitu lapis dasar (*subbase*) dan tanah dasar (*subgrade*). Karena sistem ini ditujukan untuk pekerjaan jalan tersebut, maka penggunaan sistem ini dalam prakteknya harus dipertimbangkan terhadap maksud aslinya. Sistem ini membagi tanah ke dalam 7 kelompok utama yaitu A-1 sampai dengan A-7. Tanah yang diklasifikasikan ke dalam A-1, A-2, dan A-3 adalah tanah berbutir di mana 35% atau kurang dari jumlah butiran tanah tersebut lolos saringan nomor 200. Tanah di mana lebih dari 35% butirannya

lolos saringan nomor 200 diklasifikasikan ke dalam kelompok A-4, A-5 A-6, dan A-7. Butiran dalam kelompok A-4 sampai dengan A-7 tersebut sebagian besar adalah lanau dan lempung. Tanah-tanah dalam tiap kelompoknya dievaluasi terhadap indeks kelompoknya yang dihitung dengan rumus-rumus empiris.

Klasifikasi umum	Material granuler ( < 35% lolos saringan no. 200)						Tanah-tanah lanau-lempung ( < 35% lolos saringan no. 200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5/A-7-6
Klasifikasi kelompok	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Analisis saringan (% lolos) 2,00 mm (no. 10) 0,425 mm (no. 40) 0,075 mm (no. 200)	50maks 30 maks 15 maks	- 50 maks 25 maks	- 51 min 10 maks	- 35 maks	- 35 maks	- 35 maks	- 35 maks	- 36 min	- 36 min	- 36 min	- 36 min
Sifat fraksi lolos saringan no. 40 Batas cair (LL) Indeks plastis (PI)	- 6 maks		- Np	40 maks 10 maks	41 min 10 maks	40 maks 11 min	41 min 11 min	40 maks 10 maks	41 min 10 maks	40 maks 11 min	41 min 11 min
Indeks kelompok (G)	0		0	0		4 maks		8 maks	12 maks	16 maks	20 maks
Tipe material yang pokok pada umumnya	Pecahan batu, kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil berlanau atau berlempung dan pasir				Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian umum sebagai tanah dasar	Sangat baik sampai baik						Sedang sampai buruk				

Catatan :  
Kelompok A-7 dibagi atas A-7-5 dan A-7-6 bergantung pada batas plastisnya (PL)  
Untuk PL > 30, klasifikasinya A-7-5 ;  
Untuk PL < 30, klasifikasinya A-7-6  
Np = Nonplastis

Gambar 2.2 Sistem Klasifikasi AASHTO  
Sumber : Mekanika Teknik I, 2012.

## 2.3 Pembebanan Terowongan

### 2.3.1 Beban Mati

Beban mati merupakan beban-beban yang bekerja secara vertikal ke bawah pada struktur dan mempunyai karakteristik bangunan. Beban mati juga merupakan partisi yang dapat dipindahkan, seperti penutup lantai atau alat mekanis. Metode untuk menghitung beban mati suatu elemen adalah didasarkan peninjauan berat satuan material yang terlihat dan berdasarkan

volume elemen tersebut. Berat satuan material secara empiris telah ditentukan untuk memudahkan perhitungan beban mati.

Dalam perhitungan pembebanan pada bangunan terowongan, terdapat beberapa kondisi pembebanan yang digunakan berdasarkan kondisi mekanika batuan lokasi terowongan.

### 2.3.1.1 Tekanan Batuan Vertikal

Massa batuan yang bekerja secara vertikal di atas terowongan sebagai beban merata sepanjang lebar terowongan.

$$q_{bv} = \gamma_{kuarsit} \cdot H_p \quad (2.1)$$

Dengan :  $\gamma_{kuarsit}$  = berat jenis batuan (t.m<sup>3</sup>)

$H_p$  = tinggi batuan / batuan yang membebani,  
nilai  $H_p$  bergantung pada jenis batuan di atas terowongan (m)

Dalam menentukan besar  $H_p$ , dapat melihat klasifikasi tinggi muatan batuan ( $H_p$ ) menurut Targhazi, di bawah ini :

Tabel 2.1 Klasifikasi Tinggi Muatan Batuan

<i>Rock</i>	<i>Class and Condition</i>	<i>RQD %</i>	<i>Rock load <math>H_p</math></i>
I	<i>Hard and intact</i>	<i>95-100</i>	<i>Zero</i>
II	<i>Hard stratified or schistose</i>	<i>90-99</i>	<i>0-0,5B</i>
III	<i>Massive moderately jointed</i>	<i>85-95</i>	<i>0-0,25B</i>
IV	<i>Moderately blocky and seamy</i>	<i>75-85</i>	<i>0,25B-0,35(B+Ht)</i>

V	<i>Very block and seamy</i>	30-75	$(0,2-0,6)(B+Ht)$
VI	<i>Completely crushed</i>	3-30	$(0,6-1,1)(B+Ht)$
VIa	<i>Sand and gravel</i>	0-3	$(1,1-1,4)(B+Ht)$
VII	<i>Squeezing rock at moderate depth</i>	NA	$(1,1-2,1)(B+Ht)$
VIII	<i>Squeezing rock at great depth</i>	NA	$(2,1-4,5)(B+Ht)$
IX	<i>Swelling rock</i>	NA	<i>Upto 80m irrespective of the value of (B+Ht)</i>

### 2.3.1.2 Tekanan Batuan Horizontal

Massa batuan yang bekerja secara horizontal karena adanya tekanan batuan yang aktif bekerja pada sisi kiri dan sisi kanan melintang terowongan.

$$hp = 0,3 (B + Ht) \quad (2.2)$$

Dengan :

B = lebar terowongan

Ht = tinggi terowongan

Hp = tinggi batuan / batuan yang membebani,  
nilai Hp bergantung pada jenis batuan di atas  
terowongan (m)

Koefisien tekanan tanah aktif (Ka) menggunakan teori Rankine

$$Ka = \tan^2(45 - \varphi/2) \quad (2.3)$$

Dengan :

$\phi$  = sudut geser dalam tanah ( $^{\circ}$ )

Tekanan tanah aktif dengan rumus :

$$P_a = \gamma \cdot h \cdot K_a \quad (2.4)$$

Dengan :

H = tinggi terowongan

$\gamma$  = berat jenis tanah

Dalam memnentukan sudut geser dalam tanah, menggunakan tabel hubungan antara sudut geser dalam tanah dengan jenis tanah berikut :

Tabel 2.2 Hubungan Sudut Geser Dalam dengan Jenis Tanah

Jenis Tanah	Sudut geser dalam ( $^{\circ}$ )
Kerikil kepasiran	35-40
Kerikil kerakal	35-40
Pasir padat	35-40
Pasir lepas	30
Lempung kelanauan	25-30
Lempung	20-25

Sumber : Mekanika Tanah Jilid 2

Tekanan tanah aktif dalam keadaan gempa ( $P_e$ ), dengan menggunakan rumus Seed and Whitman :

$$P_e = \frac{3}{8} \frac{a_{hmax}}{g} \gamma H^2 \quad (2.5)$$

Dengan :

$a_h$  = percepatan gempa

H = tinggi terowongan

### 2.3.1.3 Berat Sendiri Terowongan

Beban akibat berat konstruksi terowongan itu sendiri dianggap sebagai beban merata.

$$q = \gamma_c \cdot t \quad (2.6)$$

Dengan :  $\gamma_c$  = berat isi beton ( $t.m^{-3}$ )

$t$  = tebal terowongan (m)

### 2.3.1.4 Tekanan Air Vertikal

Beban yang diakibatkan oleh tekanan air tanah yang ada di atas terowongan. Rumus yang digunakan sebagai berikut :

$$P_{wv} = \gamma_w \cdot H_w \quad (2.7)$$

Dengan :  $\gamma_w$  = berat jenis air

$H_w$  = tinggi muka air tanah (m)

### 2.3.1.5 Tekanan Air Horizontal

Lokasi terowongan berada dalam batuan yang memiliki air tanah. Air tanah memiliki tekanan yang dapat memengaruhi terowongan. Tekanan air horizontal aktif bekerja pada sisi kanan dan kiri terowongan.

$$P_{w1} = \gamma_w \cdot (H_w + ht) \quad (2.8)$$

$$P_{w2} = \gamma_w \cdot H_w \quad (2.9)$$

Dengan :  $\gamma_w$  = berat jenis air

$H_w$  = tinggi muka air tanah

### 2.3.1.6 Tekanan Air dalam Terowongan

Terowongan ini memiliki fungsi untuk mengalirkan air, sehingga air dalam terowongan juga memberikan tekanan terhadap konstruksi terowongan.

$$P = \gamma_w g h \quad (2.10)$$

Dengan :  $\gamma_w$  = massa jenis air

$g$  = gravitasi ( $m/s^2$ )

$h$  = tinggi muka air tanah (m)

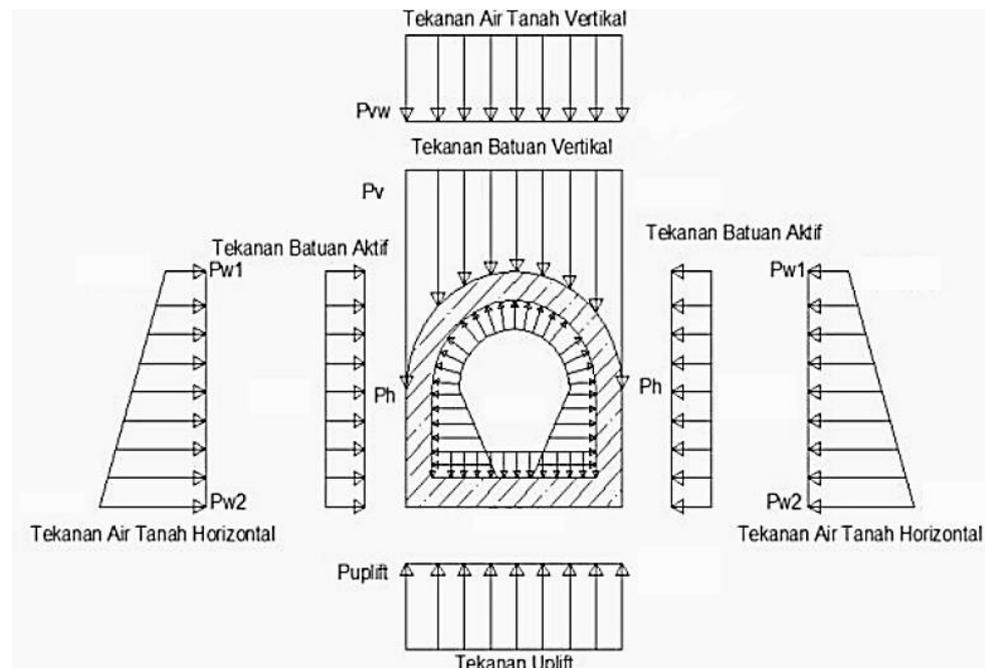
### 2.3.1.7 Tekanan Uplift

Perencanaan terowongan yang berada di batuan yang mengandung air, memiliki gaya angkat air (*uplift*) yang dapat dihitung dengan mengetahui tinggi air di luar terowongan.

$$P_{wv} = \gamma_w (H_w + H_t) \quad (2.11)$$

Dengan :  $\gamma_w$  = berat jenis air

$H_w$  = tinggi muka air tanah



Gambar 2.3 Arah Beban Total Terowongan Tapal Kuda

### **2.3.2 Beban Gempa**

Beban gempa merupakan beban yang bekerja pada suatu struktur akibat pergerakan tanah yang disebabkan karena adanya gempa bumi 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.

Perancangan gempa pada setiap struktur beserta komponennya harus memiliki sistem penahan gaya lateral dan vertikal yang mampu memberikan kekuatan, kekakuan, dan kapasitas energi yang cukup untuk menahan beban gempa rencana sesuai dengan kriteria batas deformasi dan kekuatan yang disyaratkan. Kriteria perancangan gempa rencana untuk tiap-tiap infrastruktur dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2.3 Kriteria Perancangan Gempa Berdasarkan Peruntukan Infrastruktur

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, <i>Safety Evaluation Earthquake (SEE)</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tidak terjadi aliran air yang tidak terkendali</li> <li>• Deformasi tidak melebihi 0,5 dari tinggi jagaan</li> <li>• Deformasi pada filter tidak boleh melebihi 0,5 tebal filter</li> <li>• <i>Spillway</i> tetap berfungsi setelah terjadi gempa rencana</li> </ul>	ICOLD No 148, 2016,
	100	50	145 <i>Operating Basis Earthquake (OBE)</i>	Kerusakan minor setelah terjadi gempa rencana	
Bangunan pelengkap bendungan	50	2	2500	-	
Terowongan	100	10	1.000 tahun		

(Sumber : SNI 8460 : 2017)

Pada proses menentukan beban gempa terdapat beberapa persyaratan spektrum respon desain yang harus dipenuhi, yaitu klasifikasi situs berdasarkan kondisi jenis tanah di sekitar lokasi konstruksi serta faktor amplifikasi berdasarkan kelas situsnya.

Tabel 2.4 Klasifikasi Situs

Klasifikasi Situs	$\bar{v}_s$ (m/detik)	$\bar{N}_{SPT}$ atau $\bar{N}_{SPTch}$	$\bar{s}_u$ (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	$\geq 100$
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 $H \geq 35$ m dengan $\bar{s}_u < 50$ kPa		

Keterangan: N/A = tidak dapat dipakai

(Sumber : SNI 8460 : 2017)

Keterangan :

$\bar{N}_{SPT}$  = 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)

Tabel 2.5 Faktor amplikasi untuk PGA dan periode 0,2 detik (Fpga dan Fa)

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

(Sumber : SNI 8460 : 2017)

Keterangan :

PGA adalah percepatan puncak batuan dasar (SB) engacu pada peta gempa dengan periode ulang rencana sesuai persyaratan infrastruktur yang digunakan

Ss adalah percepatan spektral respons horizontal di batuan dasar (SB) pada periode 0,2 detik dengan periode ulang rencana sesuai persyaratan infrastruktur yang digunakan

SF adalah lokasi yang memerlukan investigasi geoteknik dan analisis respons spesifik-situs

Tabel 2.6 Besarnya nilai faktor amplikasi untuk periode 1 detik (Fv)

Kelas situs	$S_I \leq 0,1$	$S_I = 0,2$	$S_I = 0,3$	$S_I = 0,4$	$S_I \geq 0,5$
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

**CATATAN** - Untuk nilai-nilai antara dapat dilakukan interpolasi linear

(Sumber : SNI 8640 : 2017)

Keterangan :

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

SF adalah lokasi yang memerlukan investigasi geoteknik dan analisis respons spesifik-situs

### **2.3.3 Kondisi Pembebanan**

Kondisi pembebanan yang digunakan dalam perencanaan terowongan ini terbagi dalam dua kondisi, yaitu kondisi normal dan kondisi saat gempa. Kondisi yang ditinjau adalah sebagai berikut :

#### **2.3.3.1 Kondisi 1 (Pembebanan saat setelah selesai dibangun)**

1. Kondisi setelah dibangun (just after completion), beban yang bekerja antara lain :

- Berat sendiri terowongan
- Beban tanah di atas terowongan
- Tekanan tanah aktif di samping terowongan
- Reaksi akibat beban vertikal

2. Kondisi setelah dibangun (just after completion), gempa.

Beban yang bekerja sebagai berikut :

- Berat sendiri terowongan
- Beban tanah di atas terowongan
- Tekanan tanah aktif di samping terowongan
- Reaksi akibat beban vertikal

### **2.3.3.2 Kondisi 2 (Pembebanan saat terowongan berfungsi, keadaan air penuh)**

1. Berfungsi atau beroperasi sebagai terowongan pengelak dan kondisi air penuh, beban yang bekerja antara lain :

- Berat sendiri terowongan
- Beban tanah di atas terowongan
- Tekanan air tanah
- Tekanan tanah aktif di samping terowongan
- Gaya angkat (*uplift*)
- Reaksi akibat beban vertikal
- Tekanan air dalam terowongan

2. Berfungsi atau beroperasi sebagai terowongan pengelak dan kondisi air penuh (gempa), beban yang bekerja antara lain :

- Berat sendiri terowongan
- Beban tanah di atas terowongan
- Tekanan air tanah
- Tekanan tanah aktif di samping terowongan
- Gaya angkat (*uplift*)
- Reaksi akibat beban vertikal
- Tekanan air dalam terowongan

## **2.4 Gaya Dalam pada Terowongan**

Gaya dalam merupakan gaya yang berada di dalam badan struktur yang berusaha menjaga keseimbangan beban-beban luar yang bekerja pada struktur.

- Gaya Tarik adalah gaya yang mempunyai kecenderungan untuk menarik elemen hingga putus. Kekuatan elemen tarik tergantung pada luas penampang elemen atau material yang digunakan. Elemen yang mengalami tarik dapat mempunyai kekuatan yang tinggi, misalnya kabel yang digunakan untuk struktur bentang panjang. Kekuatan elemen tarik umumnya tergantung dari panjangnya. Tegangan tarik terdistribusi merata pada penampang elemen.
- Gaya Tekan cenderung untuk menyebabkan hancur atau tekuk pada elemen. Elemen pendek cenderung hancur, dan mempunyai kekuatan yang relatif setara dengan kekuatan elemen tersebut apabila mengalami tarik. Sebaliknya, kapasitas pikul beban elemen tekan panjang akan semakin kecil untuk elemen yang semakin panjang. Elemen tekan panjang dapat menjadi tidak stabil dan secara tiba-tiba menekuk pada taraf beban kritis. Ketidakstabilan yang menyebabkan elemen tidak dapat menahan beban tambahan sedikitpun bisa terjadi tanpa kelebihan pada material. Fenomena ini disebut tekuk (buckling). Adanya fenomena tekuk ini maka elemen tekan yang panjang tidak dapat memikul beban yang sangat besar.
- Gaya Geser ( $V$ ) secara numerik merupakan jumlah aljabar dari semua komponen vertikal gaya-gaya luar yang bekerja pada segmen yang terisolasi namun dengan arah yang berlawanan.
- Momen Lentur ( $M$ ) adalah keadaan gaya kompleks yang berkaitan dengan melenturnya elemen sebagai akibat adanya beban transversal. Aksi lentur menyebabkan serat-serat pada sisi elemen memanjang,

mengalami tarik dan pada sisi lainnya akan mengalami tekan. Jadi, keadaan tarik maupun tekan terjadi pada penampang yang sama. Tegangan tarik dan tekan bekerja dalam arah tegak lurus permukaan penampang. Kekuatan elemen yang mengalami lentur tergantung distribusi material pada penampang dan juga jenis material. Respon adanya lentur pada penampang mempunyai bentuk-bentuk khusus yang berbeda-beda. Untuk mencari besar dari gaya geser dan momen lentur dapat dihitung dari persamaan keseimbangan, yaitu :

Dalam menentukan besarnya gaya momen yang bekerja pada dinding terowongan, dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$M = k_m \cdot W \cdot r^2 \quad (2.12)$$

Keterangan :

M = momen persatuan panjang pada segmen dinding (ton.m)

$k_m$  = koefisien momen

W = beban yang bekerja (ton.m<sup>-2</sup>)

r = jari-jari terowongan (m)

Untuk menentukan besarnya gaya lintang menggunakan rumus :

$$D = k \cdot W \cdot r \quad (2.13)$$

Keterangan :

D = gaya lintang pada segmen dinding (ton)

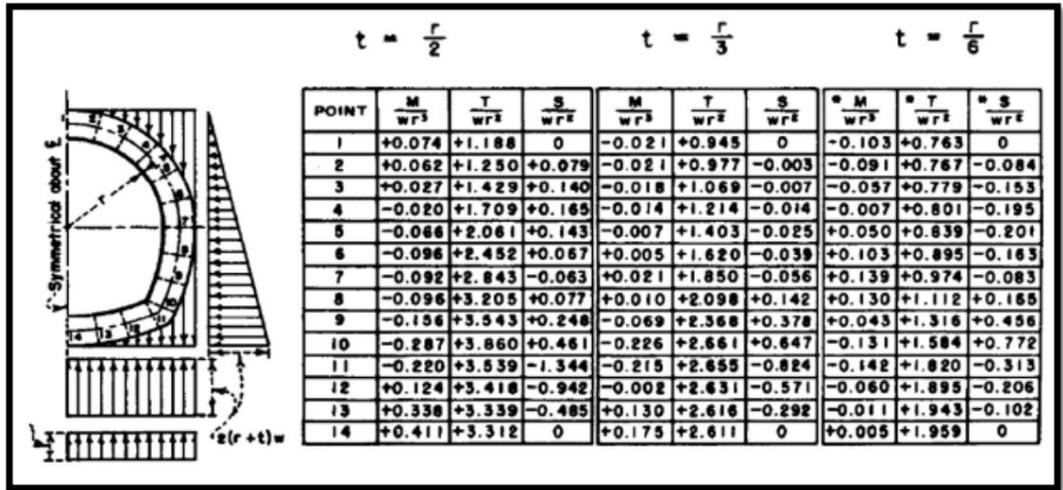
k = koefisien gaya lintang

W = beban yang bekerja (ton.m<sup>-2</sup>)

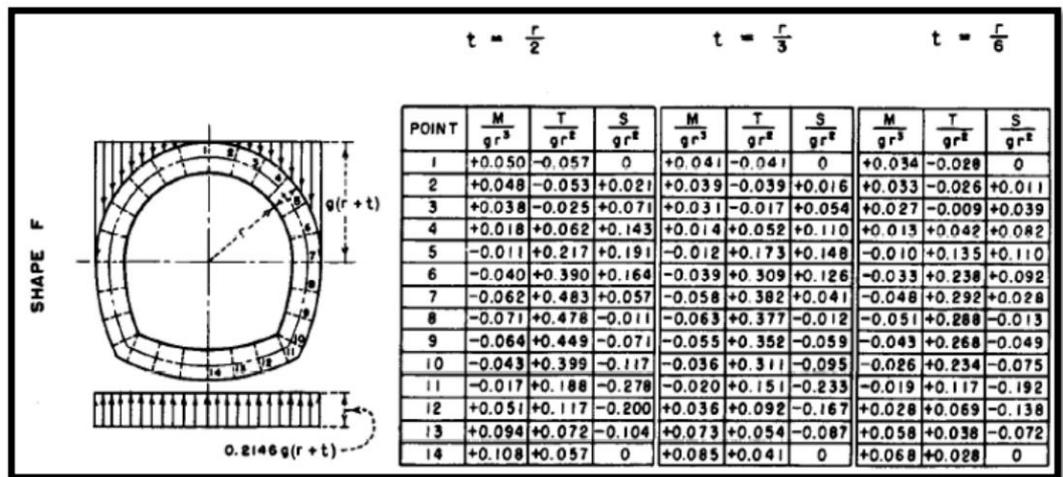
r = jari-jari terowongan (m)

Besarnya koefisien dapat dilihat dari tabel *Beggs Deformation Analysis of*

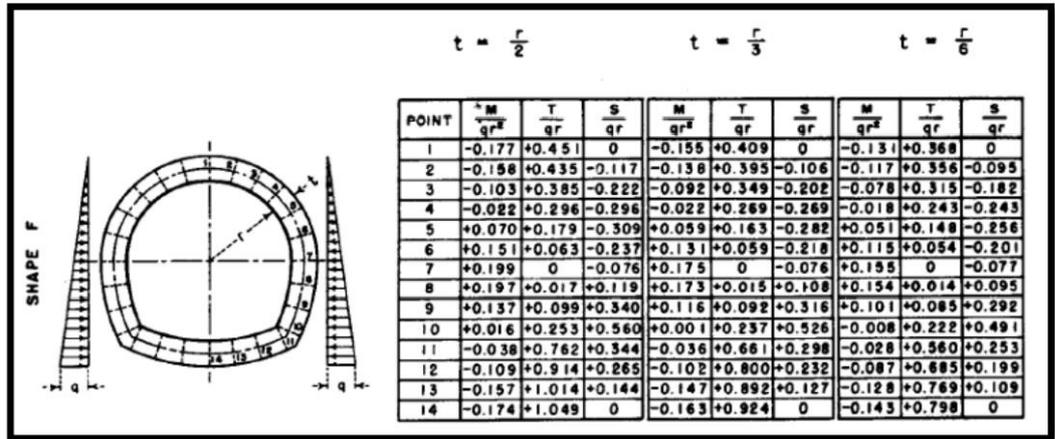
*Single Barrel Conduit* berikut :



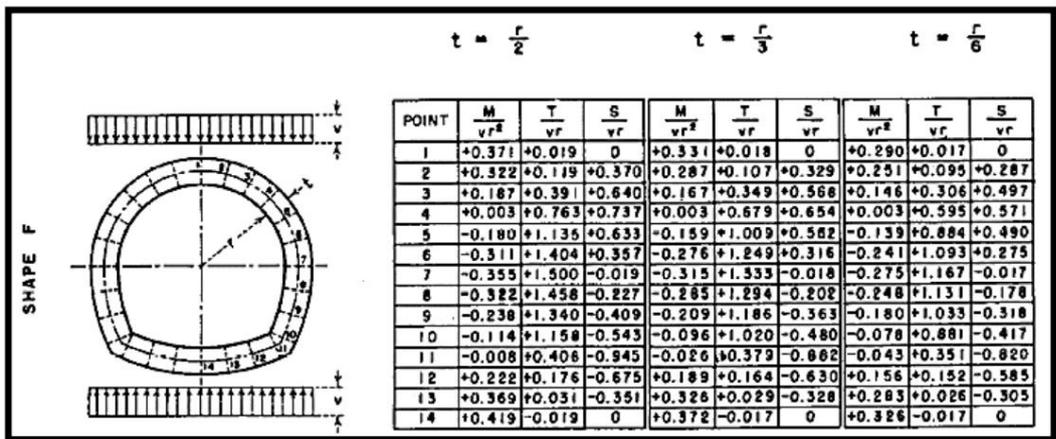
Gambar 2.4 Koefisien Pembebanan Akibat Berat Sendiri  
Sumber : Philips & Allen (1986:39)



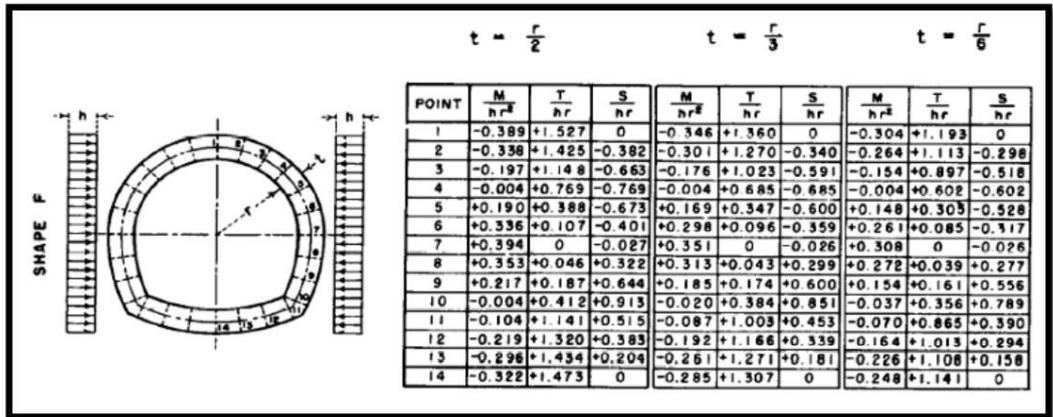
Gambar 2.5 Koefisien Pembebanan Akibat Tekanan Batuan Vertikal  
Sumber : Philips & Allen (1986:31)



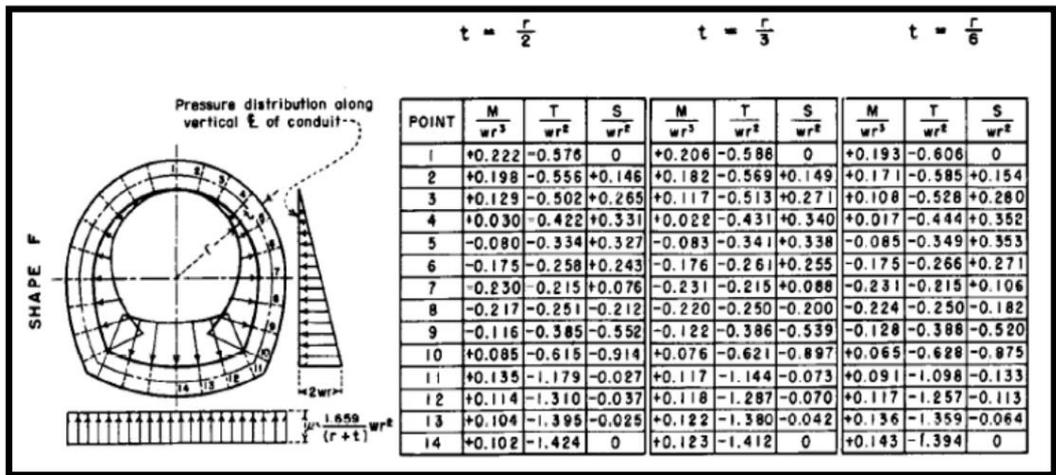
Gambar 2.6 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Air Horizontal  
 Sumber : Philips & Allen (1986:35)



Gambar 2.7 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Air Vertikal  
 Sumber : Philips & Allen (1986:25)



Gambar 2.8 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Batuan Horizontal  
 Sumber : Philips & Allen (1986:34)



Gambar 2.9 Koefisien Pembebanan Beban Akibat Tekanan Air Dalam Terowongan  
 Sumber : Philips & Allen (1986:34)

## 2.5 Penulangan pada Terowongan

Penulangan pada terowongan diperlukan sebagai penekan pada struktur beton untuk memperkuat dan mencegah retak beton. Tulangan juga diperhitungkan untuk menahan gaya tarik dan sebagian gaya tekan. Selain itu, ada pula gaya lainnya seperti gaya puntir dan gaya geser.

Dalam menghitung penulangan, perlu untuk menentukan nilai momen terlebih dahulu. Dengan begitu, selanjutnya menghitung besarnya rasio penulangan dan luas tulangan dengan menggunakan persamaan :

$$\rho_{\min} = \frac{1,4}{f_y} \quad (2.14)$$

$$\rho_{\max} = 0,75 \cdot \frac{\beta \cdot f_c}{f_y} \cdot \beta \cdot \frac{600}{600 + f_y} \quad (2.15)$$

$$R_n = \frac{M_{x \max} 10^6}{\Phi \cdot b \cdot d^2} \quad (2.16)$$

$$\omega = 0,85 \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{2,353 \cdot R_n}{f'_c}} \right) \quad (2.17)$$

$$\rho = \omega \cdot \frac{f'_c}{f_y} \quad (2.18)$$

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d \quad (2.19)$$

Keterangan :

$f'_c$  = mutu beton (MPa)

$f_y$  = mutu baja tulangan (MPa)

$M_u$  = momen yang bekerja

$b$  = panjang plat

$h$  = tebal beton

$d$  = tebal efektif beton

$R_n$  = momen per satuan luas

$A_s$  = luasan tulangan ( $\text{mm}^2$ )

$\rho$  = rasio tulangan yang direncanakan ( $\text{mm}^2$ )

$\rho_{\min}$  = rasio tulangan minimum ( $\text{mm}^2$ )

$\rho_{\max}$  = rasio tulangan maksimum ( $\text{mm}^2$ )

$\Phi$  = faktor reduksi beton

## **2.6 Analisis Stabilitas Terowongan**

### **2.6.1 Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*)**

Metode elemen hingga merupakan salah satu metode numerik yang dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah struktural, termal, dan elektromagnetik. Dalam metode ini seluruh masalah yang kompleks seperti variasi bentuk, kondisi batas dan beban dapat diselesaikan dengan metode pendekatan.

Konsep dasar dari metode elemen hingga adalah apabila suatu sistem diberikan gaya luar, maka gaya luar tersebut diserap oleh sistem dan akan menimbulkan gaya dalam dan perpindahan. Untuk mengetahui besarnya gaya dalam dan perpindahan akibat gaya luar tersebut, ada beberapa kondisi yang saling berhubungan dan harus dipenuhi sebagai berikut :

1. Keseimbangan, yaitu keseimbangan gaya-gaya yang bekerja pada setiap elemen dan keseluruhan material.
2. Kompabilitas, berkaitan dengan geometri dari material yaitu hubungan perpindahan dan regangan.
3. Persamaan konstitutif dari material, mengenai hubungan tegangan regangan yang merupakan karakteristik dari material.

Untuk analisis masalah yang melibatkan elemen satu dimensi dalam geometri dua dan tiga dimensi, matriks elemen harus ditransformasikan menjadi ruang dimensi tinggi yang relevan.

### **2.6.2 Metode Elemen Hingga Menggunakan Midas GTS NX**

Pada perhitungan analisis stabilitas terowongan menggunakan metode elemen hingga yaitu menggunakan program GTS NX. Program ini

merupakan program elemen hingga yang dikembangkan untuk dapat menganalisis stabilitas dalam geoteknik.

Dalam penggunaan GTS NX, diperlukan beberapa data untuk diinput, adapun prosedur dari program ini adalah sebagai berikut :

- a. Menentukan judul, tipe, dan satuan ukur pada kotak yang akan dipakai.
- b. Menuliskan dimensi tanah dari kasus yang akan dipelajari, yaitu sepanjang ke kiri, ke kanan, ke atas, dan ke bawah
- c. Menentukan parameter tanah seperti  $\gamma$ , kohesi, dan lainnya

Program Midas GTX NS memiliki kemampuan untuk membuat model tipe-tipe tanah yang heterogen. Analisis dapat ditampilkan dengan menggunakan beberapa input parameter.