BAB II
KAJIAN PUSTAKA

2.1 Definisi Terowongan

Terowongan adalah struktur bawah tanah yang panjangnya berbanding jauh dengan lebar penampang galiannya dan memiliki gradien memanjang. Terowongan umumnya tertutup di seluruh sisi dindingnya, kecuali di kedua ujungnya yang terbuka pada bagian lingkungan luar. Terowongan merupakan salah satu rekayasa infrastruktur yang memanfaatkan ruang bawah tanah untuk keperluan transportasi, keairan, penyimpanan barang, energi, pertahanan, bangunan utilitas dan aktivitas lainnya, terutama untuk menghadapi masalah keterbatasan ruang dan lahan di daerah perkotaan yang cenderung sangat padat, akibat banyaknya bangunan gedung dan infrastruktur lainnya.

2.2 Klasifikasi Terowongan

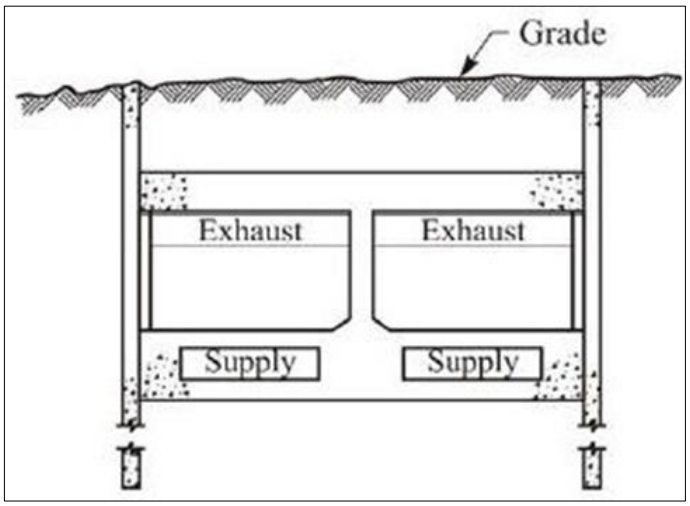
2.2.1 Berdasarkan material penyusunnya

Rahardjo (2004) menjelaskan terdapat 3 (tiga) jenis terowongan yang dibedakan berdasarkan media material yang dilalui dalam kegiatan konstruksi pembangunan terowongan.

1. Terowongan Gali-Tutup (*Cut and Cover*)

   Terowongan ini dibangun dengan cara menggali satu parit besar, membangun struktur terowongan di dalam parit galian, dan ditimbun kembali dengan material timbunan saat pemasangan struktur telah selesai. Untuk material penyusun terowongan ini, digunakan beton pra-cetak yang disebut *box culvert*. Metode ini hanya dapat digunakan apabila terowongan dibangun pada kedalaman tanah yang dangkal dan penggalian dari permukaan tanah memungkinkan.

irenas library



Gambar 2. 1 Terowongan cut and cover

2. Terowongan Batuan (*Rock Tunnels*)

   Konstruksi terowongan batuan dikerjakan pada batuan masif dengan metode pengeboran atau peledakan (*drill and blast*). Konstruksi terowongan batuan umumnya lebih mudah dikerjakan dibandingkan dengan terowongan tanah lunak karena batuan memiliki kekakuan dan kestabilan yang lebih tinggi, sehingga perkuatan yang dibutuhkan lebih sederhana.

Gambar 2. 2 Terowongan batuan

3. Terowongan Tanah Lunak (*Soft Ground Tunnels*)

   Terowongan ini melalui lapisan tanah lunak seperti lempung, pasir, atau batuan lunak. Jenis material ini cenderung mengalami keruntuhan saat

proses penggalian berlangsung, sehingga dibutuhkan suatu dinding atau atap yang kuat sebagai pelindung bersamaan dengan proses penggalian. Umumnya digunakan pelindung (*shield*) untuk melindungi galian tersebut agar tidak runtuh. Teknik yang umum digunakan pada saat ini adalah *shield tunneling*, yang menggunakan *Tunnel Boring Machine* (TBM).

Gambar 2. 3 Terowongan melalui media tanah lunak

2.2.2 Berdasarkan Fungsinya

Szechy (1967) mengklasifikasikan terowongan berdasarkan fungsinya menjadi 3 (tiga) klasifikasi utama, yaitu:

1. Terowongan Lalu Lintas

   Terowongan lalu lintas meliputi terowongan kereta api, terowongan jalan raya, terowongan pejalan kaki, terowongan bawah laut, dan terowongan kereta api bawah tanah.

2. Terowongan angkutan

   Terowongan angkutan meliputi terowongan pembangkit listrik, terowongan penyedia air, terowongan *intake*, terowongan drainase, dan terowongan industri.

3. Terowongan tambang

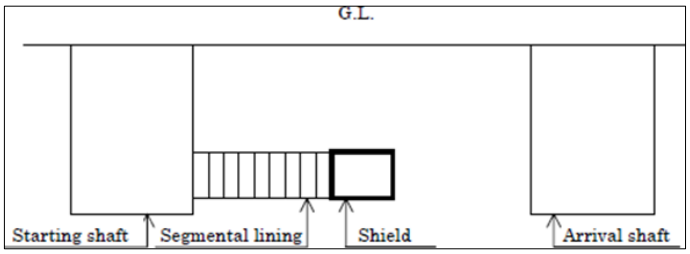
   Terowongan tambang meliputi terowongan utama dan akses, terowongan eksplorasi, terowongan eksploitasi, terowongan pelayanan rute, dan terowongan darurat.

2.3 *Tunnel Boring Machine* (TBM)

Di masa lampau, penggalian terowongan pada tanah lunak (*soft ground tunneling*) tidak dapat dilaksanakan hingga ditemukannya metode *Shield Tunneling*. Ditemukan oleh Sr. Marc Brunnel pada tahun 1818. *Tunnel Boring Machine* atau disebut juga dengan *Shield Machine* merupakan alat utama yang diperlukan dalam pekerjaan penggalian terowongan bor. Proses penggalian dibagi menjadi beberapa tahapan pekerjaan, yaitu penggalian, pemasangan *lining*, pembuangan lumpur galian, dan pergerakan TBM. Metode ini didefinisikan sebagai metode untuk membangun terowongan dengan penggalian dan pemasangan struktur dinding terowongan (*lining*) dilaksanakan di dalam suatu sisi pelindung (*shield*) yang berfungsi untuk mencegah runtuhnya tanah di sekitar terowongan.

Gambar 2. 4 Tunnel Boring Machine

Sebelum memulai penggalian, diperlukan sebuah bukaan vertikal dari permukaan tanah untuk menempatkan TBM yang disebut sebagai *shaft*. Pada umumnya TBM akan bergerak dari *shaft* keberangkatan dan tiba di *shaft* tujuan. TBM bergerak menggunakan rangkaian pompa hidraulik (*shield jack*) yang mendorong seluruh bagian mesin menembus lapisan tanah yang akan digali. Saat TBM bergerak, mata bor TBM akan berotasi dengan kecepatan tertentu, dan *shield jack* akan mendorong penampang *lining* ke arah berlawanan untuk menimbulkan resultante yang berfungsi sebagai gaya dorong untuk TBM (*thrust force*). Cara kerja TBM dapat dilihat pada **Gambar 2.5**.



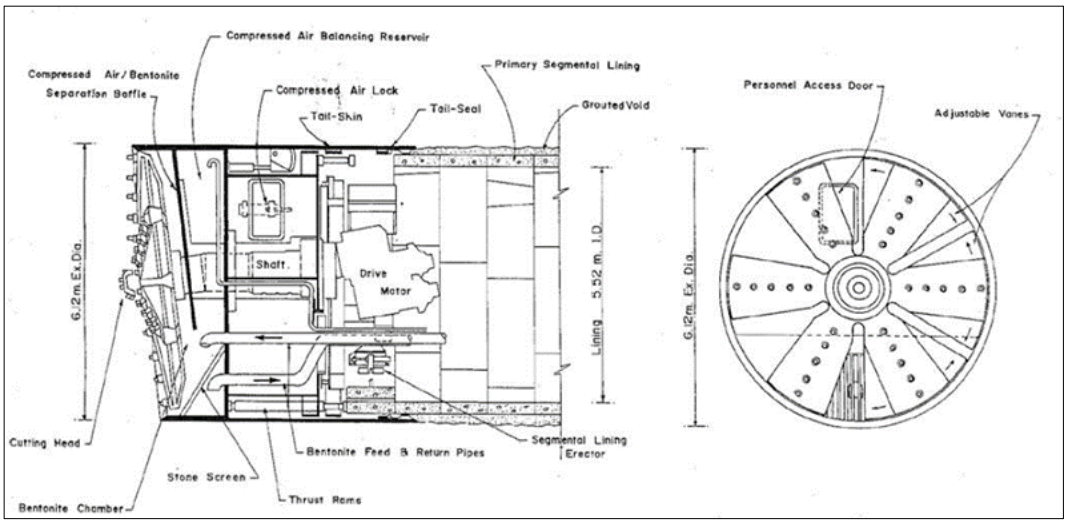
Gambar 2. 5 Skema operasional TBM

Dengan ditemukannya berbagai kasus, dimana penggalian menghadapi kondisi geologis yang tidak lazim, maka TBM mengalami perkembangan teknologi hingga sampai sekarang. Berbagai variasi TBM telah diciptakan untuk dapat menyediakan solusi dalam penggalian terowongan pada kondisi tanah yang sulit dan butuh penanganan khusus.

2.3.1 *Slurry Shield Boring Machine*

Mesin bor jenis *slurry shield* ini menggunakan campuran bentonit dan air (*slurry*) yang bertekanan untuk menyeimbangkan tekanan tanah dan air tanah pada muka galian. Mesin ini menyalurkan tekanan secara hidraulik melalui lumpur kental yang terbentuk dari hasil galian yang terperangkap dalam *cutter face* dan bercampur dengan bentonit dan air. Dalam kasus ini, besarnya tekanan yang disalurkan dapat diatur dari pengukur tekanan dan keran kontrol dalam sistem pemipaan. Metode ini membutuhkan pengaturan tekanan yang lebih teliti dan hati-hati. Kekurangan dari metode ini adalah, perlunya instalasi pemisahan yang harus dibangun dan dioperasikan di permukaan untuk memisahkan *slurry* dari lumpur hasil galian.

itenas library

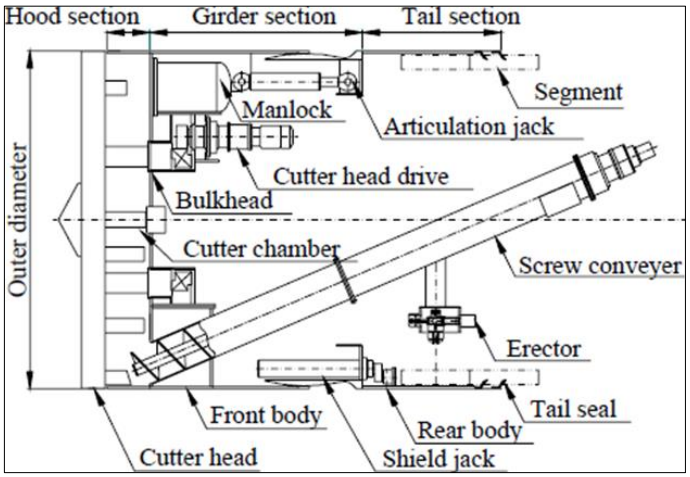


Gambar 2. 6 *Slurry* shield machine

2.3.2 *Earth Pressure Balance Shield Boring Machine*

Prinsip kerja dari *Earth Pressure Balance* (EPB) adalah dengan menyeimbangkan antara tekanan tanah (*earth pressure*) dan air tanah pada muka galian dengan tekanan di dalam *pressure chamber*. Berbeda dengan *slurry shield*, tekanan disalurkan secara mekanis melalui butir-butir tanah dan mengalami reduksi akibat gesekan pada sepanjang *screw conveyor*. *Earth pressure* pada *cutter chamber* dikontrol dengan mengatur kecepatan pergerakan TBM dan kecepatan rotasi *screw conveyor* yang berbanding dengan jumlah lumpur galian yang dihisap untuk dikeluarkan dari *cutter chamber*. Mesin EPB dapat digunakan untuk menggali tanah lanau lunak dan lempung lunak, namun mesin ini tidak dapat menggali tanah dengan viskositas rendah. Untuk menyesuaikan kondisi tersebut sehingga penggalian dapat dilaksanakan. Mesin EPB harus dilengkapi dengan sistem injeksi cairan untuk merubah hasil galian menjadi lumpur yang plastis dapat mengalir. Sistem ini menginjeksikan campuran air, bentonit, dan *foam* ke dalam *cutter chamber*. Hasil galian dan cairan injeksi bercampur secara mekanis menjadi lumpur di dalam *cutter chamber* dengan menggunakan *cutter face* yang berotasi.

itenas library



Gambar 2. 7 EPB shield machine

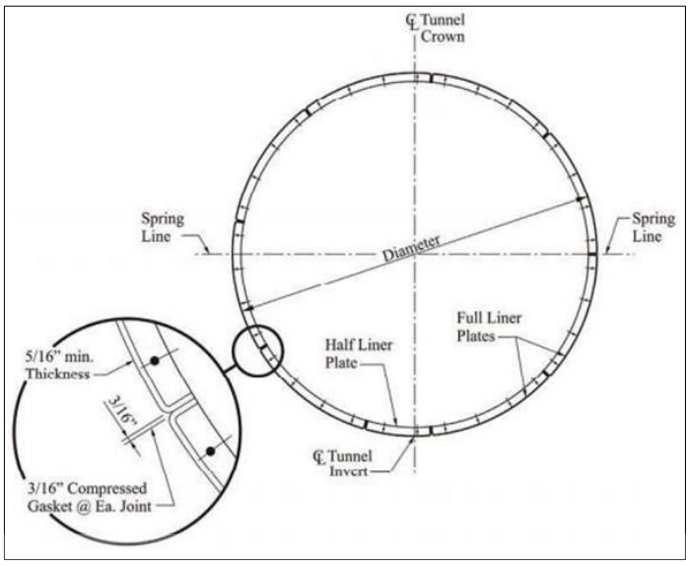
2.4 *Lining* Terowongan

Menurut Kolymbas (2005) *lining* adalah sebuah struktur berupa cangkang (*shell*) yang terbuat dari beton bertulang yang dipasang segera setelah dilakukan penggalian terowongan. Ada berbagai macam jenis *lining* terowongan berdasarkan cara pembuatannya dan material yang digunakan, salah satunya adalah beton pracetak.

Dalam pemasangannya, *lining* dipisah menjadi beberapa bagian beton pracetak yang disebut segmen, untuk memudahkan pengangkutan. Segmen dipasang satu per satu menggunakan *bolt* pada *radial joint* dan *circumferential joint*. Pada umumnya *lining* pada terowongan memiliki 3 (tiga) titik acuan.

1. *Crown* yang merupakan bagian puncak dari *lining* terowongan ;
2. *Spring Line* merupakan garis horizontal pada pusat lining terowongan ; dan
3. *Invert* yang merupakan bagian dasar dari *lining* terowongan.

Penampang *lining* terowongan dapat dilihat pada **Gambar 2.8.**



Gambar 2. 8 *Lining* Terowongan

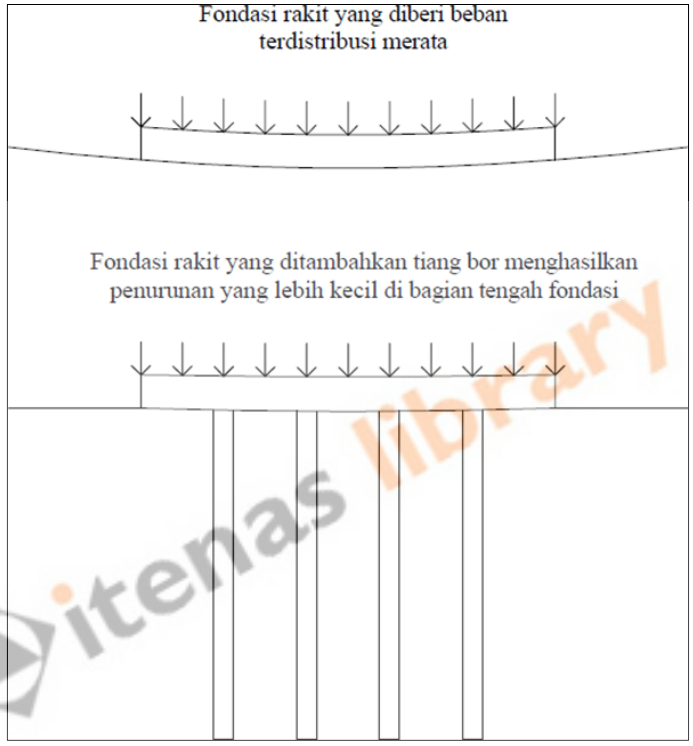
2.5 Fondasi Tiang-Rakit

Menurut Suryolelono (2004) fondasi adalah struktur yang terletak di bawah muka tanah (tidak dapat dinyatakan secara visual) yang berfungsi sebagai perantara untuk meneruskan beban struktur yang berada di atas muka tanah dan gaya-gaya lain yang bekerja, menuju tanah pendukung bangunan tersebut. Fondasi tiang rakit merupakan sebuah bentuk pengembangan desain dari fondasi rakit. Ilustrasi perbedaan dari fondasi rakit dengan fondasi tiang-rakit dapat dilihat pada **Gambar 2.9**. Fondasi rakit sendiri pada umumnya dijadikan alternatif pada beberapa kasus, antara lain:

1. Pergerakan dan distribusi beban (vertikal, horizontal, *uplift*) antara satu bagian tanah dengan bagian tanah lainnya sangat berbeda sehingga sangat mungkin terjadi penurunan yang tidak seragam pada keseluruhan area. Dalam hal ini, kontinuitas struktur dan kuat lentur dari fondasi rakit dapat meminimalisir penurunan tidak seragam yang terjadi.
2. Bagian dasar struktur (*basement*) terendam di bawah muka air tanah, sehingga dibutuhkan sebuah penghalang yang bersifat kedap air. Fondasi rakit merupakan sebuah struktur yang bersifat monolit, sehingga air akan sulit merembes ke dalam struktur. Berat sendiri fondasi rakit juga dapat menahan gaya *uplift*, akibat gaya hidrostatik dari air tanah.

Menurut Poulos (2000) kondisi tanah yang sesuai dengan penggunaan fondasi tiang-rakit adalah sebagai berikut:

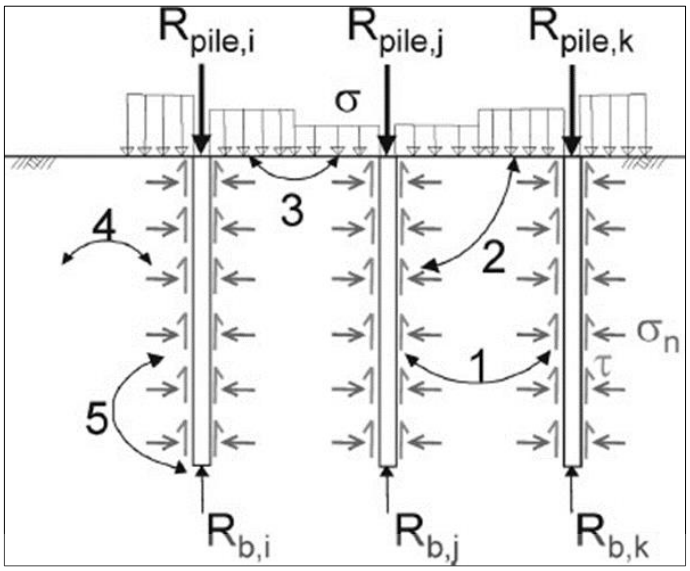
1. Lapisan tanah yang terdiri dari lempung keras/kaku ;
2. Lapisan tanah yang terdiri dari pasir padat ; dan
3. Tanah berlapis di mana di bawah tanah pendukung fondasi tiang tidak ada lapisan tanah lunak.



Gambar 2. 9 Ilustrasi penurunan yang terjadi pada fondasi tiang-rakit

Fondasi rakit mendistribusikan beban total dari struktur (*Stot*) sebagai tegangan kontak, yang direpresentasikan oleh R_{rakit}. Pada fondasi tiang-rakit, terdapat sejumlah tiang yang menerima distribusi beban tersebut melalui jumlah tahanan tiang yang berada di dalam lapisan tanah. Tahanan total dari fondasi tiang-rakit dapat digambarkan secara matematis dalam persamaan (2.1). **Gambar 2.10** menunjukkan interaksi antara tiang dengan tiang (1), interaksi tiang dengan rakit (2), interaksi rakit dengan rakit (3), interaksi tiang dengan tanah (4), dan interaksi dasar tiang dengan sisi tiang (5).

$$Rtot = R_{rakit} + \sum_{i=1}^{n} R_{tiang} \geq S_{tot} \quad \text{.....(2.1)}$$



Gambar 2. 10 Interaksi fondasi tiang-rakit dengan tanah

2.6 Terowongan Perisai

Terowongan perisai (*shield tunneling*), menurut Sven Moller (2006), dikategorikan sebagai metode terowongan muka tertutup (*closed face tunneling method*), yang berarti pada tahapan penggaliannya dilakukan penyanggaan pada muka bidang galian secara terus menerus. Tujuan dari penggunaan terowongan perisai pada kondisi tanah lunak dan tebal lapisan penutup (*overburden*) di atas area galian yang dangkal adalah untuk menghindarkan terjadinya deformasi berlebih saat penggalian terowongan dilakukan. Meski demikian hal ini dapat berdampak pada besarnya beban tanah yang bekerja pada dinding terowongan. Berdasarkan jenis perkuatannya, terowongan perisai dibagi menjadi 4 (empat) tipe, yaitu:

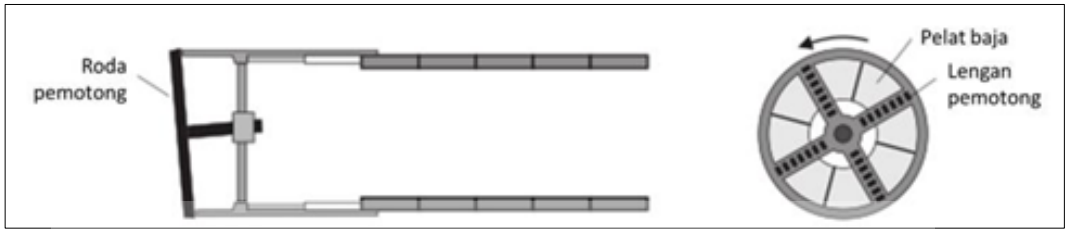
1. Terowongan perisai dengan penyangga mekanis (*mechanical support*) ;
2. Terowongan perisai dengan tekanan udara (*compressed air*) ;
3. Terowongan perisai dengan keseimbangan tekanan tanah (*earth pressure balance*) ; dan
4. Terowongan perisai dengan penyangga slurry (*slurry support*).

2.6.1 Terowongan Perisai dengan Penyangga Mekanis

Terowongan perisai dengan penyangga mekanis memberikan kestabilan area galian dengan cara memberikan tekanan pada muka bidang galian menggunakan roda pemotongnya (*cutting wheel*). Selain roda pemotong, pelat baja dapat dipasang

itenas library

pada ruang antara roda pemotong dan lengan pemotong untuk menjaga agar tanah yang digali tidak mengalami keruntuhan yang diperlihatkan pada **Gambar 2.11**. Metode ini umumnya hanya sesuai untuk kondisi tanah yang dominan terdiri dari jenis tanah kohesif yang stabil (*stable cohesive ground*) dan berada diatas muka air tanah. Metode terowongan ini tidak sesuai untuk penggalian pada kondisi tanah jenuh air atau berada di bawah muka air tanah.



Gambar 2. 11 Ilustrasi terowongan perisai dengan penyangga mekanis (Sven Moller, 2006)

2.6.2 Terowongan Perisai dengan Tekanan Udara

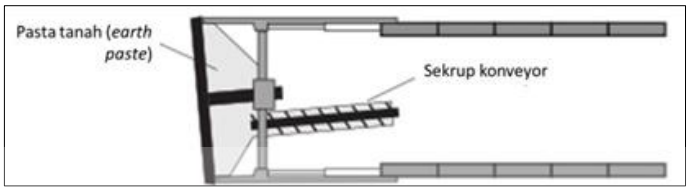
Pada tipe terowongan ini, tekanan udara digunakan untuk menstabilkan muka bidang galian. Metode ini umumnya digunakan pada terowongan yang dibangun di bawah muka air tanah untuk menghindarkan masuknya air ke dalam terowongan. Bila ada aliran air yang masuk, maka pengaliran dapat dilakukan melalui katup aliran air seperti diperlihatkan pada **Gambar 2.12**. Untuk menerapkan tekanan yang efektif pada permukaan tanah, maka tanah yang akan digali harus memiliki permeabilitas yang kecil (k < 10-6). Untuk tanah dengan permeabilitas yang tinggi, muka bidang galian harus ditutup menggunakan *filter cake*.

Gambar 2. 12 Ilustrasi terowongan perisai dengan tekanan udara (Sven Moller, 2006)

2.6.3 Terowongan Perisai dengan Keseimbangan Tekanan Tanah

Tipe terowongan perisai ini banyak digunakan pada kondisi tanah lunak. Pada metode terowongan ini, tanah yang digali digunakan sebagai tekanan penyangga pada muka bidang galian. Beberapa variasi bahan aditif digunakan untuk menjamin

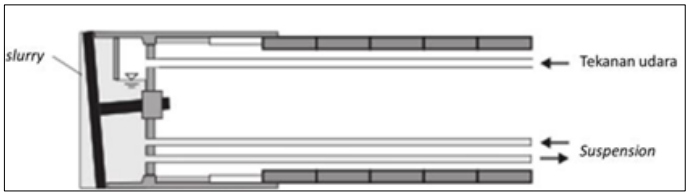
jenis material buangan yang sesuai untuk dikeluarkan dari ruang galian ke bagian belakang terowongan. Sekrup konveyor (*screw conveyor*) berfungsi untuk mengatur atau mengendalikan tekanan pada muka bidang galian berdasarkan tingkat laju penggaliannya yang diperlihatkan pada **Gambar 2.13**. Untuk terowongan yang berada di bawah muka air tanah, maka panjang sekrup konveyor harus direncanakan untuk menahan tekanan air hidrostatik. Panjangnya harus cukup untuk mengurangi tekanan air menjadi tekanan atmosfir.



Gambar 2. 13 Ilustrasi terowongan perisai dengan keseimbangan tekanan tanah (Sven Moller, 2006)

2.6.1 Terowongan Perisai dengan Penyangga *Slurry*

Slurry digunakan untuk menstabilkan galian dengan menerapkan *slurry* bentonite yang diberi tekanan pada muka bidang galian. Selama pelaksanaan penggalian, tanah dicampur dengan *slurry* untuk terus menstabilkan muka galian dan selanjutnya sebelum dibuang ke bagian belakang terowongan harus dipisahkan dari *slurry* pada suatu ruang pemisah material yang diperlihatkan pada **Gambar 2.14**. Untuk menghindarkan *slurry* menembus lapisan tanah yang akan digali, maka perlu dibentuk lapisan lumpur kedap pada muka bidang galian. Hal ini dapat menjamin tekanan pada muka bidang galian akan seragam dan kestabilan bidang galian. Metode terowongan dengan penyangga *slurry* dapat digunakan untuk hampir semua jenis tanah, terutama pada jenis tanah pasiran.



Gambar 2. 14 Ilustrasi terowongan perisai dengan penyangga slurry (Sven Moller, 2006)

Penelitian yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini adalah melakukan kajian prilaku dan kinerja terowongan perisai dengan keseimbangan tekanan tanah. Karena media tanah yang terdapat di Jakarta adalah tanah lunak, maka perlu dilakukan evaluasi deformasi pada lokasi tersebut. Untuk mendukung penelitian tersebut dibutuhkan perlu adanya penjelasan mengenai deformasi.

2.7 Konstruksi Terowongan pada Tanah Lunak

Dalam rekayasa terowongan, pengertian tanah lunak adalah material yang dapat digali secara manual. Material ini pada umumnya tidak dapat menahan berat sendiri dalam jangka waktu yang panjang (*stand up-time*). Umumnya tanah lunak termasuk dalam teknologi rekayasa terowongan *soft-ground tunneling*. Pada pelaksanaan terowongan, terjadi peralihan atau pergerakan. Disamping itu, lapisan tanah berubah karakteristiknya pada saat terbuka ke udara.

Kondisi tanah dapat menguntungkan, yaitu bila penggalian terowongan tidak mengakibatkan kesulitan yang berarti, tetapi dapat juga tidak menguntungkan, karena dapat membahayakan para pekerja, menimbulkan kelambatan kerja dan penambahan biaya, serta dapat pula mengakibatkan penurunan tanah dipermukaan secara berlebihan. Kondisi yang tidak menguntungkan ini harus memperoleh perhatian utama dan perlu dilakukan metode perbaikan tanah terlebih dahulu.

Pada umumnya kondisi tanah yang baik tidak membutuhkan suatu penanganan khusus, sedangkan media yang sering dijumpai adalah material yang dapat mengalami masalah seperti perubahan volume ke dalam lubang galian. Untuk itu perlu dibedakan material yang bermasalah dan yang tidak menggunakan suatu besaran yang dapat terukur.

Menurut investigasi dari Broms dan Bennemark (1967), keruntuhan pada bidang bukaan tanah lempung vertikal akan terjadi apabila

$$\frac{P_z}{c_u} \geq \frac{2\pi}{1+\frac{B}{6Z}} \quad \text{.....(2.2)}$$

Dimana :

P_z adalah tegangan total pada kedalaman Z

c_u adalah kuat geser tanah tak teralir

B adalah lebar bukaan

itenas library

Untuk nilai Z/B ≥ 2, nilai kritis dari P_z/c_u adalah 6

Tanah yang kokoh dapat memberikan kondisi yang menguntungkan karena atap terowongan dapat dibiarkan tanpa disokong untuk beberapa waktu. Sebaliknya kondisi tanah lembek tidak menguntungkan karena mudah runtuh atau mengalir menutup rongga galian.

Tingkat kesulitan dan biaya untuk konstruksi terowongan pada tanah amat ditentukan oleh *stand-up time* dan posisi dari muka air tanah. Diatas muka air tanah, *stand-up time* ditentukan oleh kuat geser dan kuat tarik material, sedangkan dibawah muka air tanah, *stand up time* ditentukan oleh nilai permeabilitasnya. Terzaghi membedakan tanah dengan: *Firm Ground, Ravelling Ground, Running Ground, Flowing Ground, Squezzing Ground* dan *Swelling Ground.* Penjelasan klasifikasi Terzaghi diberikan oleh **Tabel 2.1** memberikan klasifikasi dari kondisi tanah dan respon tanah terhadap pembukaan lubang galian.

Tabel 2. 1 Klasifikasi Tanah untuk Terowongan (Terzaghi, 1950)

Klasifikasi		Perilaku	Tipe Tanah
Firm (kuat)		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, pasir semen kerikil.
Raveling	Slow 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 ber-raveling cepat, proses mulai pada beberapa menit, sebaliknya terjadi pada tanah yang berraveling lambat.	Sisa tanah atau pasir dengan sedikit bahan pengikat akan mempercepat raveling dibawah muka air tanah dan memperlambat di atas muka air tanah. Kecepatan reveling pada lempung keras bergantung pada derajat pembebanan.
	Fast Raveling		
Squeezing		Adanya tanah yang ter-squeeze 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 squeezenya 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	Cohesive Running	Material granular tanpa kohesi tidak stabil lereng> ± 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.
	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 terowngan pada beberapa kasus.	Lanau, pasir atau butirankasar di bawah muka air tanah tanpa adanya lempung yang mempunyai kohesi dan plastisitas. Dapat terjadi pada lempung sensitif jika merupakan tanah yangdisturbed (terganggu)
Sweeling		Tanah menyerap air, memperbesar volume,dan secara perlahan terowongan menjadi lebih luas.	Lempung dengan highly preconsolidated, mempunyai indeks plastisitas ± 30, biasanya mengandung montmorillonite.

Adanya bongkah-bongkah batuan dalam tanah akan merupakan suatu kesulitan tersendiri, karena terowongan perisai tidak dapat mengatasinya. Batu yang besar di dalam tanah juga akan menyebabkan kesulitan, karena tidak dapat diatasi dengan alat berat jenis *excavator*, sehingga harus dihancurkan dengan *jackhammer* atau dengan cara diledakkan.

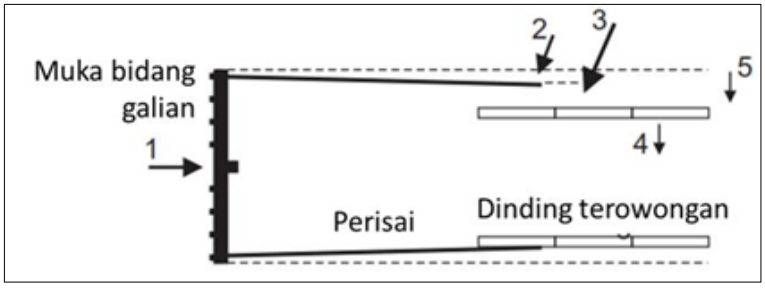
2.8 Deformasi pada Terowongan Perisai

Pada dasarnya struktur terowongan bawah tanah didukung dengan kondisi tanah yang tidak mengalami penurunan. Berikut penjelasan faktor yang menjadi penyebab utama deformasi pada terowongan yang akan dibahas di subbab berikut ini.

2.8.1 Komponen Utama Penyebab Deformasi

Mair dan Taylor (1997) menyatakan bahwa terdapat beberapa komponen utama yang mengakibatkan terjadinya deformasi akibat penggalian menggunakan terowongan perisai dengan posisi sesuai penomoran pada **Gambar 2.15**, yaitu:

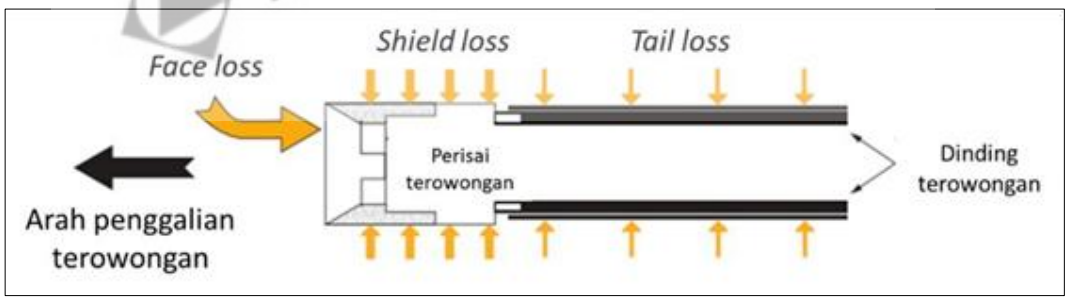
1. Pergerakan tanah pada muka bidang galian karena pelepasan tegangan akibat proses penggalian ;
2. Pergerakan arah radial pada daerah perisai akibat penggalian berlebih (*over-cutting*) ;
3. Pergerakan arah radial pada bagian belakang (*tail*) terowongan akibat terbentuknya rongga antara perisai dan dinding terowongan ;
4. Pergerakan radial pada dinding terowongan akibat deformasi pada dinding terowongan ; dan
5. Pergerakan arah radial pada dinding terowongan akibat proses konsolidasi.



Gambar 2. 15 Komponen utama deformasi tanah pada terowongan perisai (Mair dan Taylor, 1997)

Konsep serupa disampaikan oleh Loganathan, et al. (2011), dengan konsep deformasi akibat *ground loss*. *Ground loss* adalah volume material aktual galian terowongan yang disebabkan oleh pengaruh gangguan galian pada muka bidang galian dan di sekitar atau di belakang perisai terowongan (Loganathan et al., 2011). Mekanisme terjadinya *ground loss* disebabkan oleh 3 (tiga) komponen utama, seperti diperlihatkan pada **Gambar 2.16**, yaitu:

1. Face loss atau terbentuknya ruang kosong (*gap*) pada muka bidang galian yang terjadi karena perubahan tegangan tanah pada muka bidang galian pada proses penggalian terowongan. Perubahan tegangan mengakibatkan terjadinya pergerakan tanah arah longitudinal (memanjang arah galian terowongan) yang bekerja pada muka bidang galian.
2. Shield loss atau terbentuknya ruang kosong (*gap*) pada area perisai terowongan yang terjadi akibat penggalian berlebih (*overcut*) oleh mesin bor terowongan. Penggalian berlebih umumnya dilakukan untuk mengurangi tahanan (*friction*) antara tanah dan mesin bor terowongan.
3. Tail loss atau terbentuknya ruang kosong (*gap*) pada area pemasangan dinding terowongan yang terjadi akibat penyusutan pada proses pengisian material antara dinding dan tanah yang telah digali.



Gambar 2. 16 Komponen *ground loss* (loganathan, et al., 2011)

2.8.2 Pendugaan Deformasi akibat Penggalian Terowongan

Sangatlah penting untuk memahami pembentukan deformasi akibat penggalian terowongan sebelum mempertimbangkan pengaruhnya pada bangunan sekitar. Konsep awal yang digunakan adalah pendekatan terowongan tunggal pada kondisi tanah seragam (homogen). Metode empiris yang paling banyak digunakan untuk memperkirakan pergerakan tanah adalah menggunakan distribusi Gaussian

dengan perumusan pada persamaan (2.3) dan ilustrasi kurva distribusi normal seperti diperlihatkan pada **Gambar 2.17**.

$$f(x) = a \exp(-\frac{(x-b)^2}{2c^2}) \quad \text{…….....…...(2.3)}$$

Keterangan :

$a = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$

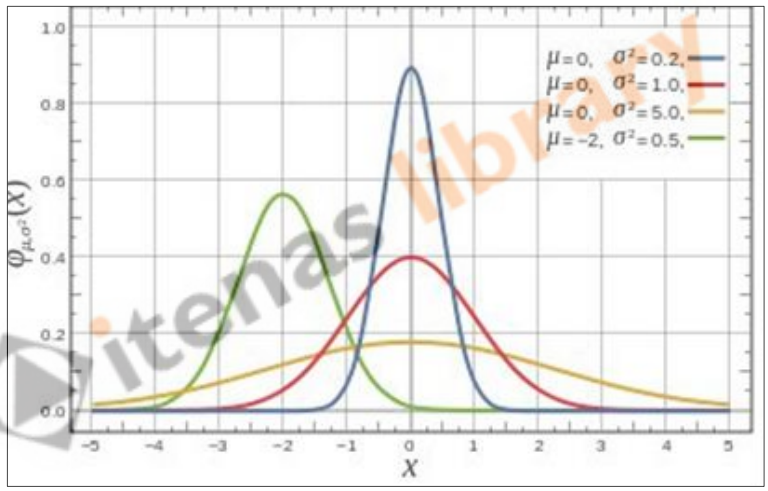
$b = \mu$

$c = \sigma$

a adalah puncak kurva distribusi normal

b adalah posisi tengah puncak kurva distribusi normal

c adalah standar deviasi



Gambar 2. 17 Kurva distribusi normal Gaussian

Menurut Sven Moller (2006), Schmidth (1969) dan Peck (1969) merupakan pertama yang menggambarkan penurunan pada arah melintang galian terowongan dengan perumusan pada persamaan.

$$S_{v\,(y)} = S_{v_{max}} \cdot e^{\frac{y^2}{2i^2}} \quad \text{……....(2.4)}$$

Keterangan :

$S_{v_{max}}$ adalah penurunan di atas sumbu terowongan

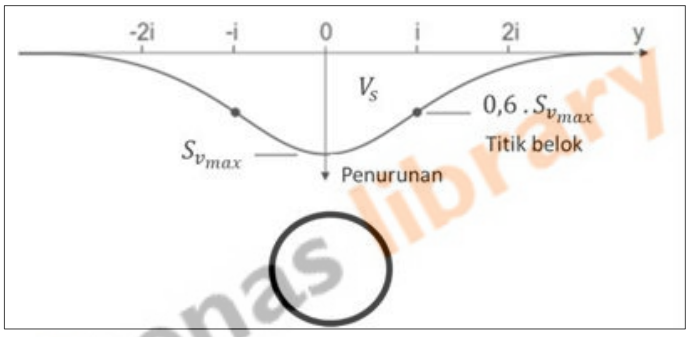
y adalah jarak horizontal dari sumbu terowongan

i adalah jarak horizontal dari sumbu terowongan ke titik belok penurunan

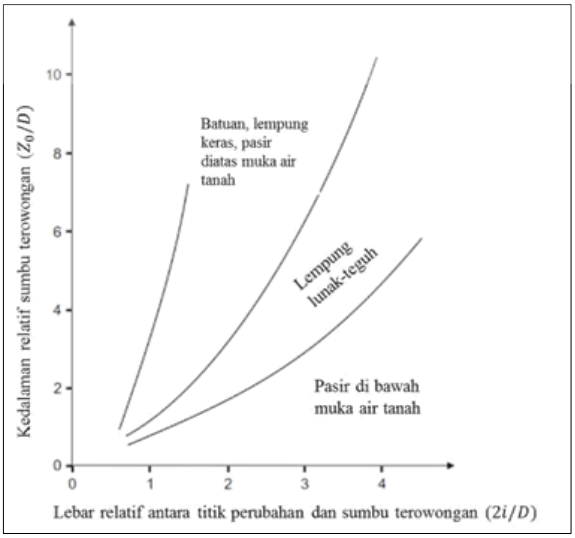
Volume penurunan arah memanjang (per unit panjang terowongan), V_s dapat diperoleh menggunakan persamaan

$$V_s = \int S_v(y)\,.\,dx = \sqrt{2\pi . i . S_{v_{max}}} \qquad \text{.....(2.5)}$$

Ilustrasi penggunaan persamaan (2.4) dan (2.5) dapat dilihat pada **Gambar 2.18**. Jarak dari sumbu terowongan ke titik belok, i, menentukan besar lebar penurunan yang mungkin terjadi. Peck (1969) merkomendasikan hubungan antara kedalaman terowongan, z_0, dan diameter terowongan, D, seperti diperlihatkan pada **Gambar 2.19**. Persamaan yang diusulkan oleh Peck (1969) digunakan pula oleh FHWA (2005) dan FHWA (2009) sebagai persamaan dasar untuk menentukan besar penurunan akibat penggalian terowongan.



Gambar 2. 18 Kurva Gaussian untuk penurunan arah melintang terowongan (Sven Moller, 2006)



Gambar 2. 19 Hubungan antara penurunan dan kedalaman terowongan untuk berbagai jenis tanah/batuan (Peck, 1969)

2.9 Perancangan Terowongan Perisai Berdasarkan Spesifikasi Standar Jepang (JSCE, 2007)

Kriteria perancangan meliputi kriteria yang harus diperhatikan dan dipenuhi di dalam suatu tahapan perancangan terowongan perisai. Uraian setiap kriteria yang perlu diperhatikan akan dijelaskan pada subbab berikut ini.

2.9.1 Kriteria Desain

Kriteria desain penampang melintang terowongan perisai umumnya berbentuk lingkaran dengan alasan berikut :

1. Penampang lingkaran umumnya sangat tahan terhadap tekanan luar.
2. Penampang lingkaran sesuai untuk digunakan pada pemajuan perisai dan segmen-segmen berbentuk lingkaran mudah untuk di produksi dan dipasang.
3. Penampang lingkaran menunjukan tidak ada masalah, bahkan saat perputaran perisai (*shield rolling*).

Bentuk penampang melintang berbentuk lingkaran tidak dapat dipaksakan bila ada pertimbangan mengenai efisiensi ruang terowongan bawah tanah, kesulitan dalam penggunaan lahan, kondisi struktur disekitar terowongan bawah tanah, keterbatasan fungsi-fungsinya, dan lapis tanah yang terlalu tipis.

2.9.2 Kriteria Kedalaman Terowongan Perisai

Kedalaman terowongan perisai ditentikan dengan mempertimbangkan kondisi permukaan dan bangunan bawah tanah, kondisi tanah asli, volume penggalian, dan metode pembangunannya. Kedalaman minimum terowongan biasanya 1,5D (D = diameter perisai).

Di daerah perkotaan yang padat, umumnya terdapat peningkatan jalan rel, jalan raya, saluran air, dan fasilitas umum lainnya yang dibangun di bawah tanah, sehingga kedalaman terowongan perisai harus didesain dengan posisi yang lebih dalam disbanding posisi struktur-struktur bangunan tersebut. Kedalaman minimum terowongan biasanya 1,5D (D = diameter perisai) dari posisi struktur yang ada di atasnya.

2.9.3 Kemiringan Terowongan Perisai

Kemiringan terowongan perisai ditentukan dengan mempertimbangkan tujuan penggunaannya, pemeliharaan, manajemen, dll.

2.9.4 Pemilihan Metode Perisai

Untuk membangun terowongan yang aman dan ekonomis, kondisi dasar pemilihan metode perisai harus juga mempertimbangkan cara menggali, sistem dinding, dll. Selain kondisi tanah, kondisi permukaan tanah, dimensi penampang melintang, panjang terowongan, alinemen terowongan, dan periode pelaksanaan konstruksi.

Mesin perisai harus didesain untuk mengebor suatu terowongan dengan aman dan ekonomis dimana pada saat yang sama dapat menerima beban yang ditimbulkan oleh tanah di sekitarnya.

2.9.5 Dinding Terowongan Perisai

Dinding terowongan perisai harus aman dan kuat secara struktural untuk menahan tekanan tanah dan tekanan hidrostatik serta beban-beban lainnya dari tanah sekeliling, untuk menjaga perancangan bagian dalam terowongan, dan untuk menjaga beberapa fungsi untuk kegunaan dari terowongan dan kondisi konstruksi.

Pemilihan kekuatan, struktur, dan tipe dinding harus disesuaikan dengan fungsi terowongan, metode pembangunannya, dan kondisi tanah.

2.9.6 Beban Rencana

Beban-beban yang harus dipertimbangkan saat merancang dinding terowongan perisai adalah sebagai berikut:

1. Tekanan tanah vertikal dan horizontal ;
2. Tekanan air ;
3. Beban mati ;
4. Pengaruh muatan tambahan ;
5. Reaksi tanah ;
6. Beban dalam ;
7. Beban-beban konstruksi ;
8. Pengaruh gempa ;

9. Pengaruh pembangunan dua atau lebih terowongan perisai ;
10. Pengaruh pekerjaan terhadap lingkungan sekitar ;
11. Pengaruh penurunan tanah ; dan
12. Lain-lain.

2.9.7 Tekanan Tanah Vertikal dan Horizontal

Tergantung pada kondisi tanah, tekanan air tanah dapat diberlakukan menurut satu dari dua kondisi di bawah ini:

1. Tekanan air tanah bekerja terpisah dengan tekanan tanah (metode tekanan efektif).
2. Tekanan air tanah termasuk di dalam tekanan tanah (metode tekanan total).

Tekanan tanah vertikal harus bekerja sebagai tekanan seragam yang menekan bagian atap terowongan. Besarnya harus ditentukan berdasarkan tebal lapis tanah penutup, penampang melintang, dan diameter luar terowongan, serta kondisi tanah.

Tekanan tanah horizontal adalah kombinasi dari beberapa beban yang bekerja seragam menekan sentroid dinding dari bagian atap sampai ke bawah. Besarnya harus dihitung dengan mengalikan tekanan tanah vertikal dengan koefisien tekanan tanah lateral.

2.9.8 Tekanan air

Tinggi muka air tanah hendaknya ditentukan dengan memerhatikan bahwa desain selalu mencapai suatu keamanan walaupun dengan adanya perubahan tinggi muka air tanah selama dan setelah pelaksanaan konstruksi.

Tekanan air vertikal hendaknya didistribusikan sebagai beban merata dan besarnya adalah tekanan hidrostatis yang bekerja pada titik tertinggi di atap terowongan dan tekanan hidrostatis pada titik terendah di bagian bawah terowongan.

Tekanan air horizontal hendaknya didistribusikan sebagai beban merata dan besarnya adalah sama dengan tekanan hidrostatis.

Sebelum metode dewatering dilaksanakan, pemeriksaan kondisi geologi dan lokasi pekerjaan harus diperiksa dan karakteristik metode tersebut harus diperiksa.

2.9.9 Beban Mati

Bobot mati yang direncanakan berupa beban pada arah vertikal, yang terdistribusi sepanjang sentroid dinding. Jika distribusi bobot mati tidak seragam sepanjang garis sentroid, bobot mati rata-rata dapat digunakan. Bobot mati beton yang digunakan untuk dinding cor setempat harus ditentukan sesuai perancangan. Jika diasumsikan bahwa dinding sekunder membawa beban yang juga berasal dari dinding primer, bobot mati dinding sekunder harus dihitung dengan mempertimbangkan waktu.

2.9.10 Muatan Tambahan

Pengaruh muatan tambahan harus ditentukan dengan mempertimbangkan perpindahan tegangan di dalam tanah.

2.9.11 Reaksi Tanah

Tingkat, bentuk distribusi, dan intensitas reaksi tanah harus ditentukan dengan memerhatikan metode perhitungan yang digunakan.

2.9.12 Beban Konstruksi

Beban-beban konstruksi yang harus diperhatikan untuk perancangan dinding adalah sebagai berikut:

1. Gaya dorong dongkrak perisai ;
2. Tekanan injeksi pengisi ruang hasil galian ;
3. Beban operasional alat pemasang ; dan
4. Lain-lain.

2.9.13 Beban Dalam

Yang dimaksud dengan beban dalam adalah beban yang bekerja dari arah dalam dinding setelah penyelesaian terowongan dan ditentukan sesuai dengan fungsi terowongan.

2.9.14 Pengaruh Gempa

Bila gempa diperkirakan akan berpengaruh terhadap terowongan, penyelidikan harus dibuat sesuai dengan kepentingan terowongan dan mempertimbangkan kondisi lokasi terowongan tersebut, kondisi tanah di sekeliling terowongan, gerakan gempa pada daerah yang diselidiki, detail terowongan secara

struktural, dan kondisi-kondisi lainnya yang dianggap perlu dalam kajian penelitian Tugas Akhir ini tidak membahas aspek gempa.

Hal-hal yang perlu dievaluasi sehubungan dengan perancangan seismik adalah :

1. Evaluasi stabilitas terowongan dan tanah di sekitarnya akibat beban seismik;
2. Evaluasi deformasi dan gaya yang bekerja pada arah melintang terowongan; dan
3. Evaluasi deformasi dan gaya yang bekerja pada arah longitudinal terowongan.

2.9.15 Pengaruh Dua atau Lebih Pembangunan Terowongan

Jika pembangunan sebuah terowongan pararel terhadap terowongan yang telah ada, kondisi tanah di sekitarnya, posisi terowongan sehubungan dengan satu dengan yang lainnya, diameter luar terowongan, dan metode pembangunannya harus dievaluasi. Selain itu harus juga dipertimbangkan bagaimana terowongan berpengaruh satu sama lainnya dan bagaimana saling pengaruh tersebut terjadi saat pembangunannya.

2.9.16 Pengaruh Sekitar Daerah Konstruksi

Apabila diperkirakan bahwa bangunan lain akan dibangun dekat dengan terowongan, selama atau sesudah terowongan tersebut dibangun, penaksiran harus dilakukan terhadap dampak yang mungkin terjadi.

Apabila penggalian terowongan perisai direncanakan di dekat bangunan-bangunan atau struktur-struktur yang telah ada, maka perlu dilakukan tindakan-tindakan perlindungan. Bangunan-bangunan yang telah ada tersebut harus terus dipantau selama pembangunan terowongan, dan pengaruh yang terjadi harus terus diamati dengan hati- hati.

Penilaian risiko harus dilakukan pada tahap perancangan dengan persyaratan pengaruh pada bangunan sekitar yang terdiri atas kemiringan bangunan maksimum dan penurunan bangunan maksimum mengacu pada **Tabel 2.2** Untuk kategori risiko 3 dan 4, maka perlu dilakukan metode tambahan untuk mengurangi dampak yang mungkin terjadi pada bangunan sekitar.

Tabel 2. 2 Klasifikasi tipikal kerusakan berdasarkan kemiringan dan penurunan bangunan maksimum (CIRIA PR30, 1996)

Kategori Risiko	Kemiringan Bangunan Maksimum	Penurunan Bangunan Maksimum (mm)	Deskripsi Risiko
1	< 1/500	<10	Diabaikan: kerusakan dangkal tidak mungkin terjadi
2	1/500 hingga 1/200	10 hingga 50	Kecil: kerusakan dangkal dapat terjadi namun bukan kerusakan struktural yang signifikan
3	1/200 hingga 1/50	50 hingga 75	Sedang: kerusakan dangkal dengan kerusakan struktural pada bangunan diperkirakan terjadi, kemungkinan kerusakan pipa yang relatif kaku
4	> 1/50	> 75	Tinggi: kerusakan stuktural bangunan dan pipa kaku atau pipa lainnya

itenas library

2.9.17 Perkiraan Resiko Kerusakan akibat Pembangunan Terowongan

Proses penilaian resiko pada bangunan yang berpotensi terjadi akibat penggalian terowongan terdiri dari 2 kelompok yaitu :

1. Survei kondisi bangunan (*Building Condition Survey*, BCS) untuk mengevaluasi kondisi bangunan selama dan setelah pembangunan terowongan dilakukan.
2. Penilaian resiko bangunan (*Building Risk Asessment*, BRA) untuk memperkirakan potensi kerusakan yang diperkirakan berdasarkan pendugaan deformasi dan kerentanan bangunan.

2.9.17.1 Survei Kondisi Bangunan

Survei kondisi bangunan meliputi pengumpulan informasi dan penyiapan peta gangguan pada bangunan akibat proses konstruksi terowongan bawah tanah yang akan digunakan untuk menilai kerentanan bangunan. Aktivitas yang akan dilakukan untuk mengevaluasi bangunan selama proses pelaksanaan konstruksi adalah sebagai berikut.

1. Pengumpulan informasi mengenai :
   a. Umur bangunan ;
   b. Gambar proyek ;
   c. Tipe dan kedalaman fondasi ;
   d. Jumlah lantai ;
   e. Tipe struktur penahan (*bearing structure*) ;
   f. Sejarah perbaikan bangunan dan penambahan jumlah lantai ; dan
   g. Bangunan sejarah yang perlu penanganan khusus.
2. Inspeksi visual kondisi bangunan yang meliputi :
   a. Inspeksi semua kondisi bagian bangunan dan pemanfaatannya ;
   b. Pengamatan retakan dan kemiringan bangunan ;
   c. Daftar kerusakan dan dokumentasi ;
   d. Inspeksi basement dana tap bangunan serta lantai tengah bangunan ; dan
   e. Inspeksi kondisi fondasi bila memungkinkan.

2.9.17.2 Penilaian Resiko Bangunan

Untuk menentukan klasifikasi kerusakan pada bangunan, perlu untuk menentukan tipe kerusakan bangunan yang dapat diterima. Terdapat 3 (tiga) klasifikasi kerusakan yang dapat diterima, yaitu sebagai berikut.

1. Kerusakan estetis, yaitu kerusakan yang berhubungan dengan retakan ringan pada struktur dan mempengaruhi dinding dalam (*intern walls*) dan lapis penutupnya. Kerusakan estetis dapat diperbaiki dengan mudah dan dekorasi ulang dapat menutup retak ringan.
2. Kerusakan fungsional, yaitu kerusakan yang mengakibatkan kehilangan fungsi bangunan, misal pintu dan jendela macet dan terjadi

kerusakan pada sistem pipa. Integritas struktur bangunan tidak terpengaruh, meski demikian pengurangan fungsi bangunan akan mengganggu aktivitas yang diperlukan oleh pengguna bangunan tersebut.

3. Kerusakan struktur, yaitu kerusakan yang mengakibatkan retakan dan deformasi berlebih pada struktur bawah dan dapat mengakibatkan keruntuhan sebagian atau keseluruhan struktur.

2.10 Metode Penyelidikan Lapangan

Penyelidikan tanah dilapangan dimaksudkan untuk memperoleh gambaran tentang bentuk susunan lapisan tanah/batuan dan letak air tanah pada suatu lokasi penelitian, baik dengan metode yang sifatnya tidak merusak (*non-destructivetester*) maupun yang merusak (*destructivetester*). Untuk tujuan tertentu diperlukan contoh-contoh tanah atau batuan yang dapat diperoleh dengan cara pemboran tangan maupun mesin.

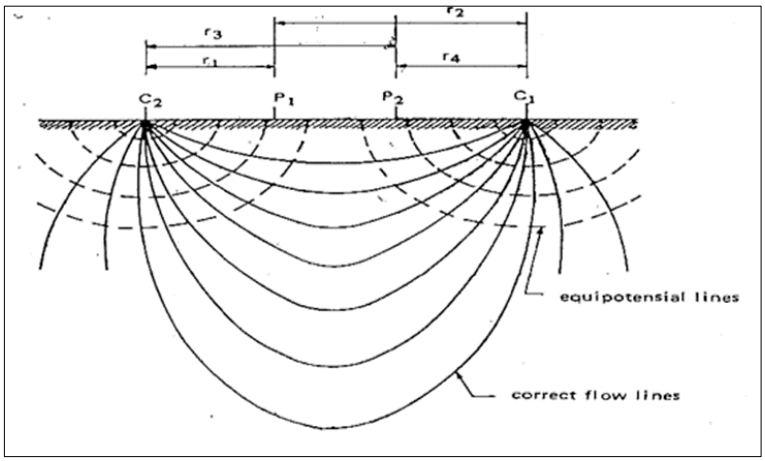
2.10.1 Sifatnya Tidak Merusak (*Non-Destructive Tester*)

1. Geolostrik

Penyelidikan tanah dengan geolistrik dilakukan dengan cara menancapkan elektroda arus dan elektroda potensial kedalam tanah, dimana susunan elektroda cara Wener dapat dilihat pada **Gambar 2.20**. Berbedaan potensial lapisan tanah (konduktor) diterima oleh alat *resistivity* meter berupa nilai tahanan jenis.

Metoda penyelidikan geolistrik ini bertujuan untuk mendapatkan keadaan susunan, kedalaman, ketebalan dan penyebaran lapisan tanah atau batuan berdasarkan perbedaan kontras harga tahanan jenis. Ada beberapa metoda penyelidikan geolistrik yang umumnya yang digunakan dibidang sipil, adalah susunan elektroda Wener. Metoda ini digunakan untuk mengetahui kondisi bawah permukaan, antara lain kondisi geologi, batas-batas penyebaran litologi (lapisan batuan) dan yang terpenting untuk mengetahui letak atau kedalaman muka air tanah (m.a.t).

itenas library



Gambar 2. 20 Susunan Elektroda cara Wener

Dimana :

C1dan C2 = elektroda arus

P1dan P2 = elektroda potensial

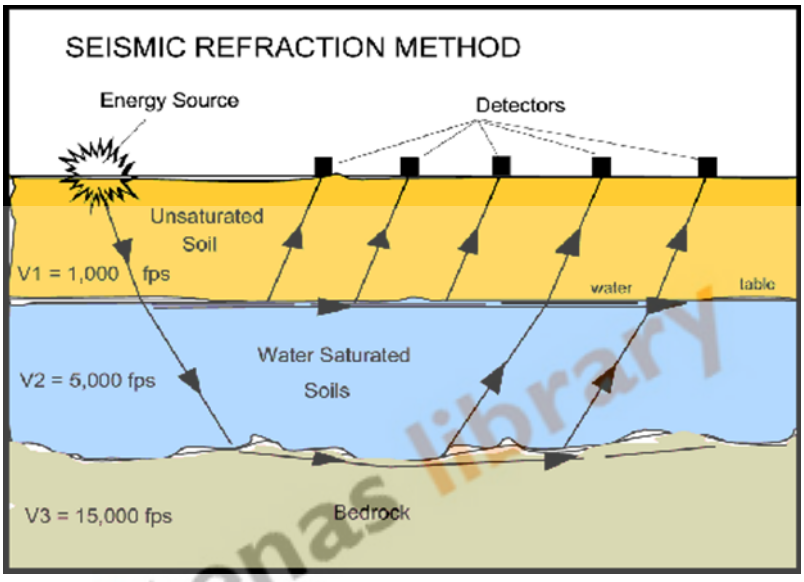
r1,r2,r3, dan r4 = jarak elektroda (meter)

2. Seismik Refraksi (Bias)

Metode Seismik Refraksi adalah suatu metode pendugaan untuk mengetahui bentuk dan jenis lapisan di bawah permukaan tanah dengan menggunakan sifat-sifat fisika. Seismik refraksi dihitung berdasarkan waktu yang dibutuhkan oleh gelombang untuk menjalar pada batuan dari posisi sumber seismik menuju penerima pada berbagai jarak tertentu. Pada metode ini, gelombang yang terjadi setelah sinyal pertama (*firstbreak*) diabaikan, karena gelombang seismik refraksi merambat paling cepat dibandingkan dengan gelombang lainnya kecuali pada jarak (*offset*) yang relatif dekat sehingga yang dibutuhkan adalah waktu pertama kali gelombang diterima oleh setiap geophone. Kecepatan gelombang P lebih besar dibandingkan dengan kecepatan gelombang S sehingga waktu datang gelombang P yang digunakan dalam perhitungan metode ini. Parameter jarak dan waktu penjalaran gelombang dihubungkan dengan cepat rambat gelombang dalam medium. Besarnya kecepatan rambat gelombang tersebut dikontrol oleh sekelompok konstanta fisis yang ada dalam material yang dikenal sebagai parameter elastisitas (Nurdiyanto dkk., 2011).

itenas library

Penggunaan Seismik Refraksi ini mempunyai keuntungan dalam pengukuran pada area yang sangat luas dan medan lapangan yang sangat sulit karena memakai alat yang ringan, waktu pengoperasian yang singkat dan mampu memberikan informasi pada jarak titik percobaan yang berdekatan dalam waktu lebih singkat dibandingkan dengan tes sondir dan pemboran. Konsep dari metode seismil refraksi ini dapat dilihat pada **Gambar 2.21**.



Gambar 2. 21 Penguji Seismik Refraksi

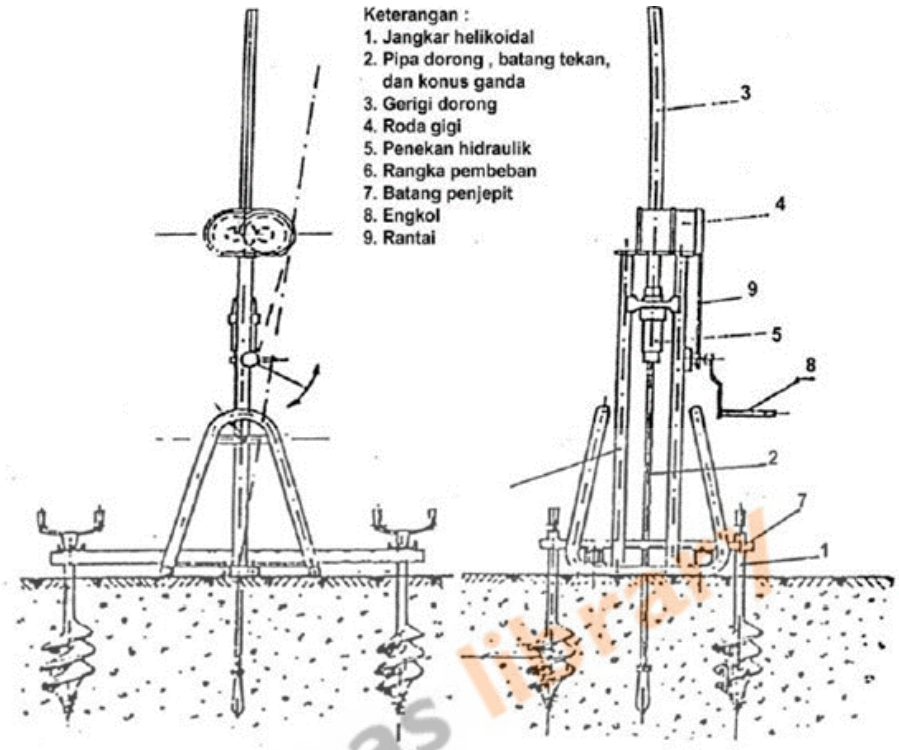
2.10.2 Sifatnya Merusak (*Destructive Tester*)

1. Uji Sondir (*Cone Penetration Test*)

Uji Sondir adalah sebuah metode yang digunakan untuk menentukan properti tanah (*geotechnical engineering*) dan menggambarkan *stratigraphy* (grafik yang menunjukkan kekerasan dan kelekatan tanah). Metode ini merupakan metode yang paling diterima dalam metode penyelidikan tanah (*soil investigation*) di seluruh dunia.

Metode pengujian terdiri dari penekanan ujung kerucut ke dalam tanah dengan kecepatan yang dikontrol 1,5 hingga 2,5 cm per detik. Ada dua macam ujung penetrometer yang dapat dipakai yaitu "*standardtype*" (mantel konus) dan "*frictionsleeve*" atau "*adhesionjackettype*" (bikonis). Hasil dari pengujian CPT ini adalah *stratigraphy* lapisan-lapisan tanah dibawah permukaan. Ujung kerucut yang digunakan pada umumnya memiliki luas10 atau 15 cm^2 atau berdiameter 3,6 cm

dan 4,4 cm. Cara uji penetrasi lapangan dengan alat sondir terdapat pada SNI-2827-2008.



Gambar 2. 22 Rangkaian Alat Penetrasi Konus (Sumber : Soils Mechanic-Braja M.Das)

Tabel 2. 3 Konsistensi tanah berdasarkan Nilai qc

qc(kg/cm^2)	**Konsistensi**
<6	Sangat lunak
6–12	Lunak
12–24	Sedang
24–45	Teguh
45–75	Sangat teguh
75–150	Keras
>150	SangatKeras

(Sumber : Soils Mechanic- Braja M.Das)

2. Pemboran Mesin (*Drilling Machine*)

Penyelidikan tanah di lapangan bertujuan untuk mendapatkan gambaran mengenai kondisi geologi maupun kondisi lapisan tanah dan air tanah secara

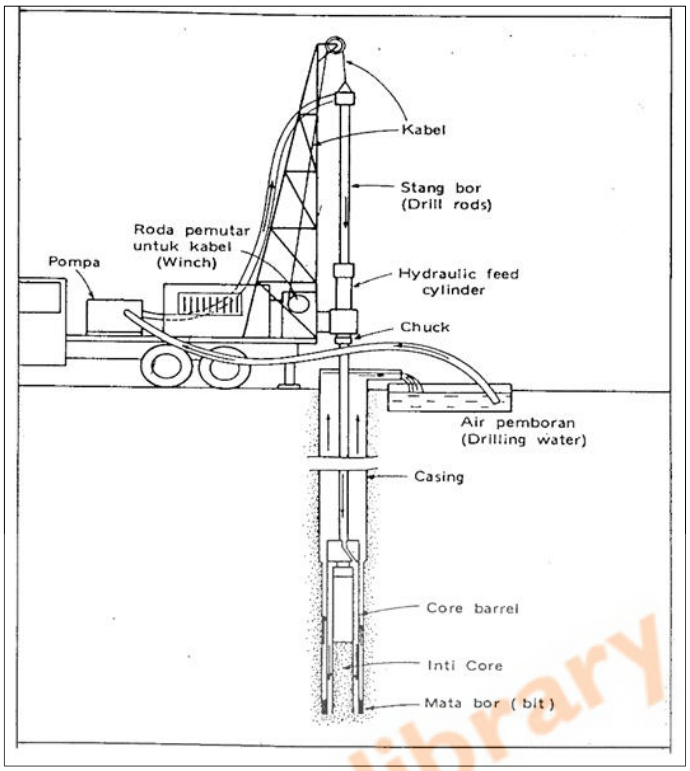
keseluruhan dari suatu daerah penelitian. Dalam pemboran teknik dilakukan pengambilan contoh tanah, baik tanah terganggu (tanah tidak asli) maupun tanah tidak terganggu (tanah asli) untuk keperluan pengujian labolatorium.

Pemboran mesin merupakan pengujian lapangan yang paling baik dan akurat untuk segala jenis tanah dan diperlukan untuk test-test yang lain, sedangkan kerugiannya adalah mahal, berat (perlu alat angkut dan akses memadai), waktu pelaksanaan lama dan kurang cocok untuk bangunan sederhana. Setiap pelaksanaan pelaksanaan pemboran selalu diikuti dengan uji penetrasi standar (SPT).

Menurut L.D. Wesley (1977), untuk bor yang dalam umumnya digunakan *rotary drilling machine*, dengan kedalaman biasa mencapai 100 meter. Motor penggerak alat bor pada umumnya terdiri dari bagian-bagian berikut:

1. Alat yang dapat memutar stang-stang bor dengan kecepatan yang bisa di atur, dan memberikan gaya kebawah.
2. Pompa, untuk memompakan air pencuci (*wash water*) ke bawah, melalui bagian dalam stang bor.
3. Roda pemutar (*winchhes*) dan derrick atau tripod untuk menarik dan menurunkan stang-stang dan alat-alat bor kedalam lubang.

Core barrel terdiri dari dua tabung yaitu, tabung dalam dan tabung luar. Tabung dalam merupakan tabung inti (tidak berputar), sedangkan tabung luar berputar, memutari pahat yang melakukan pemboran. Air dipompakan kebawah melalui bagian dalam dari stang bor dan mengalir terus kebawah diantara kedua tabung tsb, lewat pahat dan kembali ke atas melalui bagian luar dari barrel. Fungsi air, sebagai pelumas pahat (*bit*) atau pendingin dan untuk mengangkut potongan-potongan tanah ke atas permukaan tanah.

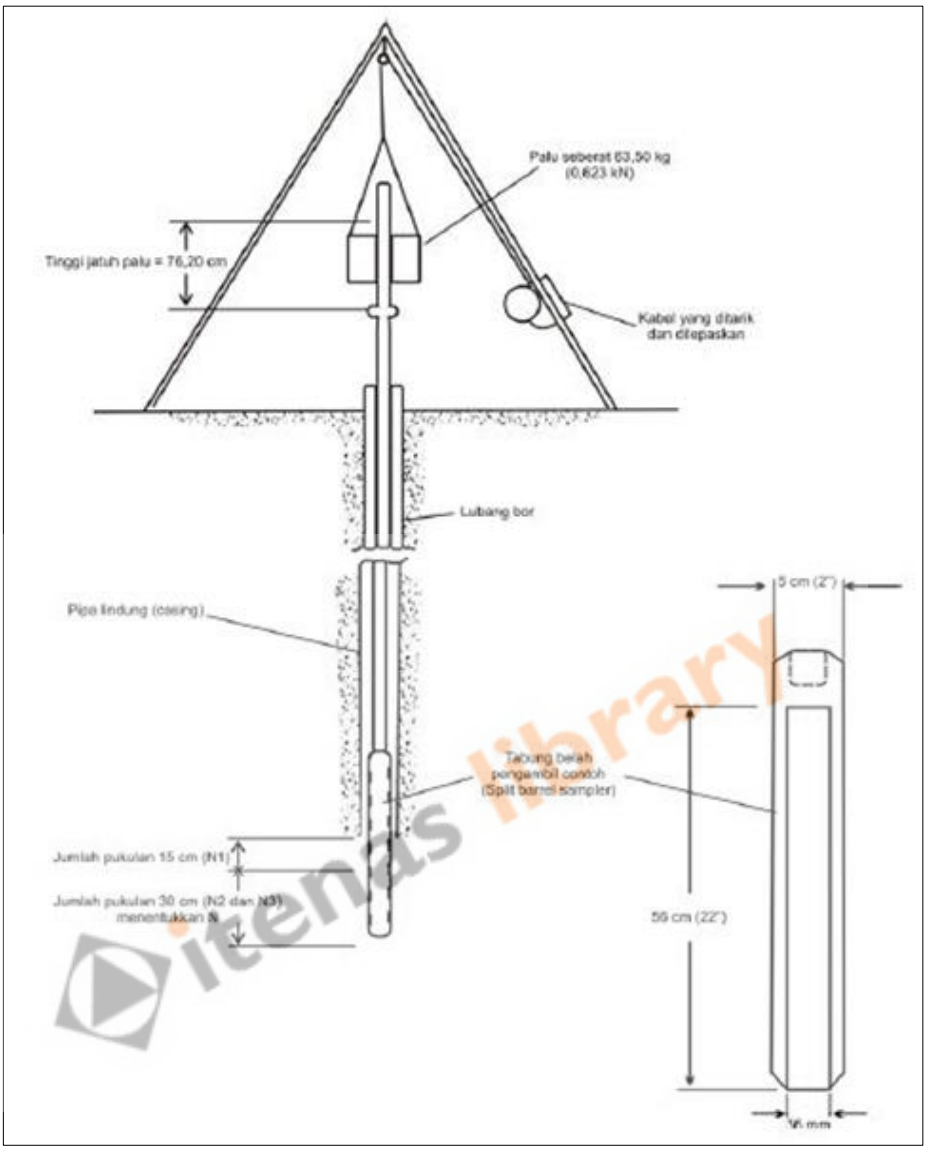


Gambar 2. 23 Rotary Core Drilling (L.D. Wesley, 1977)

3. Uji SPT (Standard Penetration Test)

Uji SPT adalah uji yang dilakukan dengan cara pengeboran untuk mengetahui baik perlawanan dinamik tanah maupun pengambilan contoh terganggu dengan teknik penumbukan.

Menurut L.D.Wesley (1977), dalam sistem beban jatuh ini, digunakan palu dengan bobot 140 lb (63,5 kg) yang dijatuhkan secara berulang- ulang dengan ketinggian jatuh 30 inch (0,76 m). Pelaksanaan pengujian dibagi dalam 3 (tiga) tahap, yaitu penetrasi dilakukan berturut-turut sedalam 6 inch (15 cm) untuk masing-masing tahap. Tahap pertama dicatat sebagai patokan, sementara jumlah pukulan dalam tahap kedua dan ketiga dijumlahkan untuk memperoleh nilai pukulan N atau perlawanan SPT (dinyatakan dalam pukulan/30 cm atau pukulan perfoot (ft)). Uji SPT dilakukan pada setiap kedalaman 2 m pengeboran dan dihentikan pada saat uji N-SPT di atas 60 N-SPT berturut-turut sebanyak 3 (tiga) kali. Cara uji penetrasi lapangan dengan SPT sesuai dengan SNI-4153-2008.



Gambar 2. 24 Penetrasi dengan SPT (L.D. Wesley, 1977)

Tabel 2. 4 Korelasi Nilai N-SPT Terhadap Konsistensi Tanah (L.D. Wesley, 1977)

Tanah berbutir kasar		**Tanah berbutir halus**	
Jumlah tumbukan (N)	Konsistensi	Jumlah tumbukan (N)	Konsistensi
0–4	Sangat lepas	0–1	Sangat lunak
0–10	Lepas	2–4	Lunak
11–25	Agak padat	5–8	Teguh
25–50	Padat	9–15	Kenyal

Tabel 2. 5 Nilai Kohesi (L.D. Wesley, 1977)

Subgroup	Consistency (KN/m^2)			
	Medium	Stiff	Very stiff	Hard
Silt, sandy silt, clayey silt	30	60	-	-
Sandy clay, silty clay	25	50	100	-
Clay	25	50	100	150 - 200

itenas library

2.11 Pengujian Laboratorium

Sifat-sifat fisik dan teknik (*physical and engineering properties*) tanah dapat diketahui dari hasil uji laboratorium pada contoh-contoh tanah yang diambil dari hasil penyelidikan lapangan (bor tangan maupun bor mesin). Hasil-hasil pengujian yang diperoleh dapat digunakan untuk menghitung kapasitas daya dukung, stabilitas dan penurunan tanah. Secara umum, pengujian di laboratorium yang sering dilakukan adalah :

1. Batas Plastis dan Batas Cair

   Pengujian ini dilakukan pada tanah kohesif dengan maksud klasifikasi dan estimasi sifat-sifat teknisnya. Grafik plastisitas dari casagrande dapat digunakan untuk memperkirakan kompresibilitas tanah-tanah lempung dan lanau. Dalam menggunakan grafik plastisitas, perlu diketahui apakah tanah berupa tanah organik atau anorganik, yang umumnya dapat

diketahui dari warnanya yang gelap dan baunya seperti tanaman yang busuk bila tanahnya organik. Bila terdapat keragu-raguan mengenai tanah organic ini, uji batas cair dilakukan pada contoh tanah yang telah dipanaskan dalam oven. Jika setelah pengeringan, nilai batas cair tereduksi sampai 30% atau lebih, maka tanah adalah tanah organik.

2. Indeks Plastis(PI)

   Indek splastis adalah selisih antara batas cair dan batas plastis. Jika tanah banyak mengandung pasir maka test batas plastis (*plastic limit*) harus dilaksanakan sebelum penentuan batas cair dilakukan. PI dinyatakan NP (*non plastic*) jika batas plastis sama dengan atau lebih besar dari batas cair dan batas cair atau batas plastis tidak dapat ditentukan.

3. Batas Susut (SL)

   Batas susut adalah batas dimana sudah kehilangan kadar air tapi tidak menyebabkan penyusutan tanah lagi. Batas susut akan menyusut apabila air yang dikandung secara perlahan-lahan hilang dalam tanah, dan penambahan kehilangan air tidak akan menyebabkan perubahan volume.

4. Analisa Saringan

   Analisa saringan untuk mengetahui ukuran dan susunan butiran (gradasi) tertahan saringan no.200 ASTM. Ukuran-ukuran saringan berkisar dari lubang berdiamer 101,6mm (No. 4) sampai 0,0037 mm (No. 400).

5. Uji Konsolidasi

   Pengujian ini hanya dilakukan untuk jenis tanah berbutir halus seperti lempung dan lanau dan digunakan untuk mengukur besarnya penurunan konsolidasi dan kecepatan penurunan. Pengujian dilakukan pada alat oedometer atau konsolido meter. Dari nilai koefisien konsolidasi (Cv) yang dihasilkan, dapat ditentukan kecepatan penurunan bangunannya. Data hubungan beban dan penurunan diperoleh dari penggambaran grafik tekanan terhadap angka pori. Dari sini, dapat diperoleh koefisien perubahan volume (mv) atau indek spemampatan (Cc), yang selanjutnya digunakan untuk menghitung estimasi penurunan akibat beban bangunan. Uji konsolidasi dapat tidak dilakukan bila tanahnya berupa lempung

terkonsolidasi sangat berlebihan (*heavilyover consolidated*). Karena pada jenis tanah lempung tersebut, sepanjang beban yang diterapkan tidak sangat berlebihan, penurunan yang terjadi sangat kecil sehingga dapat diabaikan.

6. Kadar Air (w)

   Pemeriksaan kadar air dilakukan pada contoh tanah tak terganggu dan biasanya merupakan bagian dari uji kuat geser tanah. Kadar air sample adalah perbandingan antara berat air yang terkandung didalamnya terhadap sample tanah kering. Kadar air tanah selalu dinyatakan dalam persen (%) dan nilainya 0% s/d 200% atau 300%. Pada tanah dalam keadaan aslinya kadar air biasanya 15% s/d 100%.

7. Kuat Geser Langsung

   Tegangan normal (N) pada benda uji diberikan dari atas kontak geser. Gaya geser diterapkan pada setengah bagian kontak geser. Selama pengujian perpindahan (ΔL) akibat gaya geser dan perubahan tebal (Δh) bendauji dicatat. Pada tanah pasir bersih yang padat, tahanan geser bertambah sampai beban puncak, dimana keruntuhan geser terjadi, sesudah itu kondisi menurun dengan penambahan penggeseran dan akhirnya konstan, kondisi ini disebut kuat geser residu. Sudut gesek dalam padat (*øm*) dalam kondisi padat diperoleh dari tegangan puncak, sedang sudut gesek dalam kondisi longgar (*øt*) diperoleh dari tegangan batas (residu).

8. Angka pori (e)

   Dinyatakan sebagai bilangan saja. Nilainya berkisar sekitar 0.3 sampai 3.0.

9. Kuat Tekan Bebas (qu)

   Pengujian ini berguna untuk menentukan kuat geser tak terdrainasi pada tanah lempung jenuh yang tidak mengandung butiran kasar,yang akan digunakan dalam hitungan kapasitas dukung.

10. Triaksial (Cu)

    Dalam perancangan fondasi, uji triaksial terbatas hanya dilakukan pada tanah- tanah lempung, lanau, dan batuan lunak.

Umumnya pengujian ini tidak dilakukan pada tanah pasir dan kerikil, karena sulitnya memperoleh contoh tanah tak terganggu. Walaupun pengambilan contoh tanah pasir sudah diusahakan sangat hati-hati, namun pada pelepasan contoh tanah dari dalam tabung, tanah akan berubah atau terganggu dari kondisi aslinya.

Hal terbaik yang dapat dilakukan hanyalah dengan mengukur berat volumenya, yaitu dengan cara menimbang contoh pasir dalam tabung lalu diukur berat volumenya. Kemudian, pengujian geser dilakukan pada contoh tanah yang dibuat mempunyai berat volume yang sama. Pada tanah pasir lebih baik jika sudut gesek dalam (j) secara empiris diukur dari uji lepangan, seperti uji SPT atau uji penetrasi kerucut statis (sondir). Kuat geser tanah lempung yang digunakan untuk hitungan kapasitas dukung tanah dapat diperoleh dari pengujian triaksial tak terdrainasi (*undrained*).

2.12 Pemilihan Sistem Perkuatan

Sistem perkuatan terowongan harus dirancang untuk membuat struktur yang stabil dan menyatu dengan kondisi tanah/batuan setelah dilakukan penggalian. Sistem perkuatan yang tepat dan tidak menimbulkan efek yang merugikan harus digunakan, karena perilaku tanah/batuan akan memengaruhi permukaan tanah/batuan atau struktur yang ada di sekitarnya.

Perkuatan terowongan harus dirancang untuk menjamin semua aktivitas di dalam terowongan dapat berjalan dengan aman dan efisien.

Secara umum, sistem perkuatan pada terowongan terdiri atas beton semprot (*shotcrete*), baut batuan (*rock bolt*), dan penyangga baja (*steel support*). Untuk perancangan perkuatan yang efektif, karakteristik dari setiap perkuatan harus dianalisis, agar dapat ditentukan salah satu jenis perkuatan atau melakukan kombinasi di antaranya. Pada kasus-kasus tertentu yang mana kondisi tanah/batuan sangat jelek, dinding terowongan dapat dipertimbangkan sebagai bagian dari sistem perkuatan terowongan.

2.12.1 Konsep Perancangan Perkuatan Terowongan

Perancangan perkuatan terowongan dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik setiap perkuatan, kondisi tanah/batuan, dan metode konstruksi yang digunakan. Jenis perkuatan dipilih berdasarkan pada klasifikasi batuan, dan pola perkuatan harus ditentukan dengan melakukan kombinasi dari jenis perkuatan yang telah dipilih. Kriteria pemilihan jenis perkuatan dapat dilihat pada **Tabel 2.6**.

Tabel 2. 6 Kriteria Pemilihan Jenis Perkuatan Terowongan (JSCE, 2007)

Kategori Tanah/Batuan		Jenis-jenis Perkuatan				Catatan
		Beton Semprot	Baut Batuan	Penyanga Baja	Lantai Kerja Beton	
Batuan Keras (Kelas B, C)	Sedikit rekahan	□	□	X	X	
	Banyak rekahan	○	○	□	○	
Batuan Lunak (Kelas D)	Faktor Kompetensi Tanah Besar (Kelas DI)	○	○	X	□	Untuk memastikan kondisi lapisan pondasi (*base course*) yang baik pada masa layan, diperlukan lantai kerja beton jika jenis batuannya adalah batu lempung.
	Faktor Kompetensi Tanah Kecil (Kelas DII)	○	○	○	○	Harus dipertimbangkan mengenai penempatan awal lantai kerja beton atau penutupan awal penampang melintang penggalian.
Media Tanah (Kelas E)	*(Overburden* Kecil)	○	□	○	○	Dinding dapat dianggap sebagai bagian penyangga.
Zona Patahan	*(Overburden* Besar)	○	○	○	○	Harus dipertimbangkan mengenai penutupan awal penampang melintang penggalian dan besarnya deformasi yang diizinkan.
Tanah/batuan *Squeezing*		○	○	○	○	Harus dipertimbangkan mengenai penutupan awal penampang melintang penggalian, fungsi penyanggaan dari dinding dan besarnya deformasi yang diizinkan.

○ : sangat efektif, □ : efektif, X : pada prinsipnya tidak perlu

itenas library

2.12.2 Perubahan Sistem Perkuatan Terowongan

Jika sistem perkuatan yang ditentukan tidak memadai dengan kondisi aktual lapangan, yang diketahui dari hasil pengamatan, pengukuran, dan penyelidikan geologi selama konstruksi terowongan, maka perubahan sistem perkuatan harus cepat dilakukan. Tipikal perubahan sistem perkuatan pada saat konstruksi terowongan, ditunjukkan pada **Tabel 2.7**.

Tabel 2. 7 Tipikal Perubahan Perkuatan Selama Tahap Konstruksi (JSCE, 2007)

Item	**Tipikal Perubahan**
Beton semprot (*shotcrete*)	Perubahan pada ketebalan, material, dll.
Baut batuan (*rock bolt*)	Perubahan panjang, jumlah, kekuatan, material pengikat, tipe pengikat, dll.
Penyangga baja (*steel support*)	Mengadopsi atau meniadakan penyangga baja Perubahan bentuk, spasi, material, dll.
Lantai beton (*invert concrete*)	Mengadopsi atau meniadakan lantai beton Perubahan bentuk, waktu pemasangan, material, dll.
Faktor lain	Perubahan siklus penggalian Aplikasi metode tambahan Melakukan evaluasi terhadap struktur dinding beton

itenas library

2.13 Pelaksanaan Konstruksi Terowongan

1. Skema Pemantauan dan Pengukuran

Pemantauan dan pengukuran di lapangan harus ditetapkan dengan pertimbangan yang tepat terhadap tujuan, ukuran terowongan, kondisi tanah/batuan, kondisi lokasi, desain terowongan dan metodologi konstruksi, serta metode dengan memanfaatkan temuan-temuan dalam desain dan konstruksi.

Beberapa hal-hal yang harus diperhatikan dalam menyusun rencana pemantauan serta pengukuran di lapangan adalah:

1. Dasar pertimbangan:
   a. Pemahaman terhadap permasalahan seperti perilaku tanah yang bervariasi dengan kemajuan penggalian (klarifikasi tujuan dari pemantauan dan pengukuran) ;
   b. Menentukan hal-hal yang akan dipantau (klarifikasi objek pemantauan dan pengukuran) ; dan
   c. Menentukan kriteria manajemen dan tindakan pencegahan yang harus dilakukan (evaluasi hasil pemantauan dan pengukuran).
2. Perancangan:
   a. Memilih item, posisi, dan frekuensi pemantauan dan pengukuran ;
   b. Memilih peralatan dan instrumen yang akan digunakan ;
   c. Menetapkan metode pemantauan dan pengukuran ;
   d. Menetapkan kriteria manajemen ;
   e. Memilih metode evaluasi untuk hasil pemantauan dan pengukuran ;
   f. Memilih metode untuk memanfaatkan temuan dalam desain konstruksi;
   g. Menentukan format pencatatan ; dan
   h. Membuat suatu organisasi untuk pertukaran informasi.

Hal-hal yang harus dipertimbangkan ketika memilih jenis-jenis pemantauan dan pengukuran di lapangan, meliputi: perkiraan perilaku tanah/batuan, fungsi-fungsi perkuatan, kondisi lokasi, dan peran dari setiap pengukuran.

Pemantauan dan pengukuran harus dilakukan di dalam maupun di luar terowongan selama konstruksi, dan pengukuran di lapangan harus dilakukan di dalam terowongan meliputi jenis tanah/batuan pada terowongan, anggota-anggota perkuatan serta perilaku permukaan tanah dan struktur-struktur di sekitarnya. Secara umum instrumen yang digunakan dalam pemantauan dan pengukuran di lapangan terkait dengan pengamatan terhadap hal-hal berikut:

1. Pergerakan tanah

   Pengamatan pergerakan tanah bertujuan untuk melihat kemungkinan-kemungkinan terjadinya pergerakan sejak dini yang dapat mempengaruhi struktur sekitar ataupun proses pelaksanaan pekerjaan konstruksi

terowongan. Beberapa instrumentasi yang digunakan untuk mengamati pergerakan ini, antara lain (Dunnicliff, 1988, 1993):

a. Patok geser dangkal dan dalam ;
b. Ekstensometer ; dan
c. Inklinometer.

2. Struktur sekitar

Pengamatan struktur sekitar terowongan bertujuan untuk memastikan tidak terjadinya distorsi atau penurunan diferensial yang dapat mengakibatkan kerusakan konstruksi terowongan. Penurunan, kemiringan, dan keretakan pada struktur adalah indikator awal yang sebaiknya dapat dideteksi sejak dini sebelum terjadi kerusakan yang lebih serius pada konstruksi terowongan. Beberapa instrumentasi yang yang digunakan, antara lain (Dunnicliff, 1988, 1993):

a. *Total station* ;
b. *Tiltmeter* ;
c. *Tiltbeam* ; dan
d. *Crack gages*.

3. Deformasi terowongan,

Pengamatan deformasi terowongan bertujuan untuk memastikan struktur terowongan (permanen maupun sementara) mempunyai perilaku yang sesuai perancangan/desain. Jika terjadi penyimpangan, kegagalan dapat dihindari. Para ahli/spesialis dan berpengalaman harus digunakan untuk melakukan interpretasi data pengamatan serta memastikan keselamatan pekerja selama proses hingga selesainya konstruksi. Peralatan instrumentasi yang digunakan, antara lain:

a. Titik monitoring, kombinasi dengan total station ;
b. Inklinometer ;
c. *Strain gages dan load cell* (pada terowongan tipe cut-and-cover) ;
d. *Pressure cell* dan NATM *cell* (pada terowongan tipe perisai) ;
e. *Tape extensometer* atau *multi rod extensometer* ; dan
f. *Convergence meter*.

itenas library

4. Perilaku air tanah.

   Pengamatan perilaku air tanah bertujuan untuk memeriksa tegangan efektif dan perubahan perilaku tanah akibat perubahan elevasi muka air tanah. Instrumentasi yang digunakan, antara lain:

   a. Sumur pengamatan ; dan

   b. *Piezometer*.

2. Tipikal posisi pemantauan dan pengukuran

Posisi pemantauan dan pengukuran di lapangan harus dipilih dengan tepat, sehingga interelasi antara hasil pemantauan dan item-item pengukuran yang berbeda dapat dipahami. Berikut beberapa hal yang penting dalam pemilihan posisi pemantauan dan pengukuran di lapangan, meliputi:

1. Pemantauan/investigasi

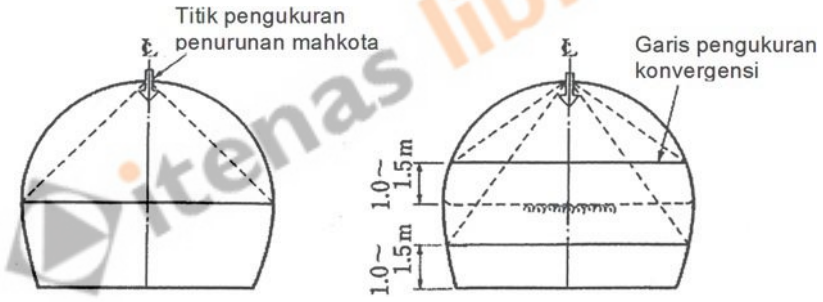
   Muka bidang galian dan bagian yang sudah dibangun harus dipantau, yang pada dasarnya harus dilakukan pada keseluruhan panjang terowongan. Selain itu, jika terdapat permasalahan sperti longsor di dekat portal, atau jika lapisan penutup kurang dari 2D (D = lebar penggalian terowongan), atau jika penggalian terowongan berdampak buruk pada struktur penting di permukaan, maka permukaan dan daerah lain di samping terowongan harus diamati.

2. Pengukuran konvergensi dan penurunan mahkota terowongan

   Konvergensi dan penurunan mahkota terowongan harus diukur, yang pada dasarnya dilakukan pada penampang yang sama. Lokasi pengukuran harus ditentukan pada interval tertentu, dengan mempertimbangkan kondisi media dan langkah-langkah konstruksi. Tipikal interval pengukuran konvergensi dan penurunan mahkota terowongan pada jalan dapat dilihat pada **Tabel 2.8.** Tata letak garis pengukuran harus ditetapkan dengan pertimbangan terhadap metode penggalian dan perilaku tanah yang diperkirakan.

Tabel 2. 8 Tipikal Interval Pengukuran Penurunan Mahkota dan Konvergensi (JSCE, 2007)

Kondisi **Kelas material**	**Dekat portal (50 m dari portal)**	**Lapisan penutup ≤ 2D (D=lebar penggalian terowongan)**	**Tahap permulaan konstruksi (fase sampai sekitar 200 m kemajuan penerowongan)**	**Langkah-langkah setelah beberapa kemajuan (standar)**
B, C	10 m	10 m	20 m	30 m (dapat diperpanjang sampai sekitar 50 m, jika perilaku tanah/batuan stabil)
D	10 m	10 m	20 m	20 m (dapat diperpanjang sampai sekitar 30 m, jika perilaku tanah/batuan stabil)
E	10 m	10 m	10 m	10 m



(a) Metode penggalian seluruh muka (contoh untuk 1 atau 3 garis pengukuran)

(b) Metode penggalian bench (contoh untuk 2, 4 atau 6garis)

Gambar 2. 25 Contoh susunan garis pengukuran penurunan mahkota/konvergensi untuk lebar penggalian D sekitar 10 m (JSCE, 2007)

3. Pemantauan tambahan (pemantauan B) di dalam terowongan.

   Tujuan utama dari pengukuran ini adalah untuk memberikan referensi data bagi desain dan konstruksi. Pengukuran-pengukuran harus dilakukan pada tahap permulaan konstruksi, pada kondisi tanah/batuan yang paling representatif. Item-item yang harus diukur adalah pergerakan tanah/batuan, gaya aksial dari baut batuan, tekanan pada baja perkuatan, tekanan pada beton semprot dan tekanan pada dinding terowongan.

Contoh susunan dari instrumen-instrumen pengukuran utama ditunjukkan pada **Gambar 2.26**.

i. Dengan 3 titik pengukuran
Pengukuran pergerakan tanah/batuan dan gaya aksial baut dan batuan

(b) Dengan 5 titik pengukuran
Pengukuran tekanan pada semprot/ dinding terowongan dan beban yang bekerja

Gambar 2. 26 Contoh susunan garis pengukuran penurunan mahkota/konvergensi untuk lebar penggalian D sekitar 10 m (JSCE, 2007)

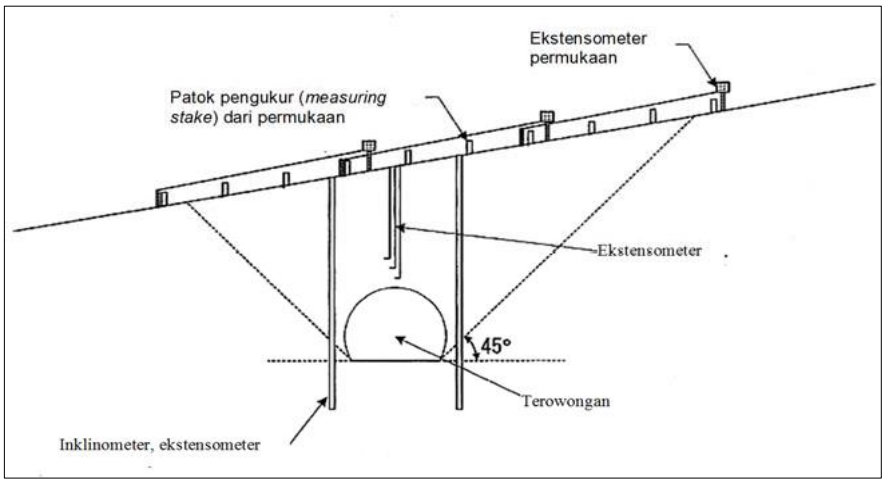
4. Pengukuran pergerakan permukaan dan tanah/batuan dari permukaan.
   Sebagai aturan umum, pengukuran pergerakan permukaan dapat dilakukan dengan mengacu panduan seperti diperlihatkan pada **Tabel 2.9**, berdasarkan pada tebal lapisan penutupnya.

Tabel 2. 9 Pedoman untuk Pengukuran Pergerakan Permukaan dan Tanah/Batuan (JSCE, 2007)

Lapisan Penutup	**Pentingnya pengukuran**	**Perlunya pengukuran**
h < D	Sangat penting	Perlu
D < h < 2D	Penting	Sebaiknya diukur
h > 2D	Tidak begitu penting	Diukur jika diperlukan

Keterangan : D : lebar penggalian terowongan ; h : lapisan penutup

Interval untuk pengukuran penurunan permukaan direkomendasikan antara 5 m hingga 10 m pada penampang memanjang, dan 3 m hingga 5 m pada penampang melintang. Rentang pengukuran pada penampang melintang ditunjukkan pada **Gambar 2.27,** yang sesuai dengan rentang daerah yang dipengaruhi oleh penggalian.



Gambar 2. 27 Pengukuran pergerakan permukaan dan contoh susunan titik-titik pengukuran pergerakan tanah/batuan (JSCE, 2007)

2.14 PLAXIS 2D (FEM)

2.14.1 Umum

Plaxis adalah program elemen hingga untuk aplikasi geoteknik dimana digunakan model-model tanah untuk melakukan simulasi terhadap perilaku dari tanah. Program Plaxis dan model-model tanah didalamnya telah dikembangkan dengan seksama. Pengembangan Plaxis dimulai pada tahun 1987 di Universitas Teknik Delft (*Technical University of Delft*) inisiatif Departemen tenaga Kerja dan Pengelolaan Sumber Daya Air Belanda (*Dutch Departemen of Public Worksand Water Management*). Tujuan awal adalah untuk menciptakan sebuah program komputer berdasarkan metode elemen hingga 2D yang mudah digunakan untuk menganalisis tanggul-tanggul yang dibangun di atas tanah lunak di dataran rendah Holland.

Pada tahun berikutnya, Plaxis dikembangkan lebih lanjut mencakup hampir seluruh aspek perencanaan geoteknik lainnya. Karena aktifitas yang terus berkembang, maka sebuah perusahan bernama Plaxis b.v. kemudian didirikan pada tahun 1993. Pada tahun 1998, dirilis versi pertama Plaxis untuk Windows. Selama rentang waktu itu dikembangkan pula perhitungan untuk 3D.

Setelah pengembangan selama beberapa tahun, maka Plaxis 3D untuk

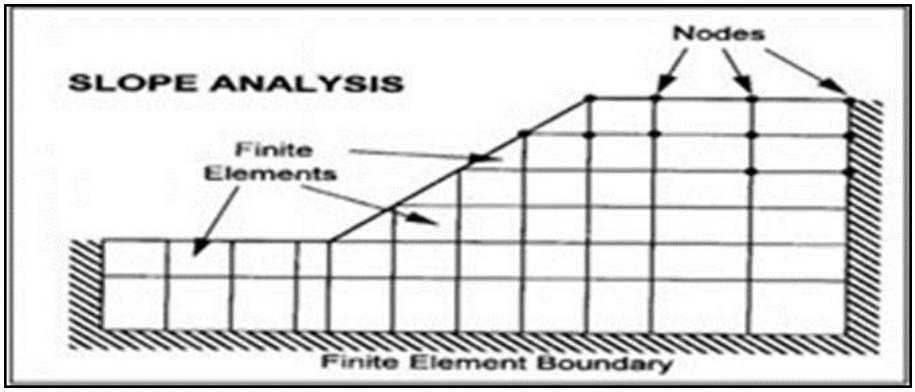
terowongan (Plaxis 3D Tunel) dirilis pada tahun 2001. Plaxis dimaksudkan sebagai suatu alat bantu analisis untuk digunakan oleh ahli geoteknik yang tidak harus menguasai metode numerik.

2.14.2 Metode Elemen Hingga (FEM)

Umumnya para praktisi menganggap bahwa perhitungan dengan metode elemen hingga yang *nonlinear* perhitungan yang handal dan baik secara teoritis, yang kemudian dikemas dalam suatu kerangka yang logis dan mudah digunakan. Hasilnya, banyak praktisi geoteknik diseluruh dunia yang telah menerima dan menggunakannya untuk keperluan rekayasa teknik.

Metode elemen hingga adalah prosedur perhitungan yang digunakan untuk mendapatkan pendekatan dari permasalahan matematis yang sering muncul pada rekayasa teknik inti dari metode tersebut adalah membuat persamaan matematis dengan berbagai pendekatan dan rangkaian persamaan aljabar yang melibatkan nilai-nilai pada titik-titik diskrit pada bagian yang dievaluasi.

Metode elemen hingga umumnya membagi tanah menjadi unit-unit terpisah yang disebut elemen hingga (*finite element*). Hal ini dapat dilihat pada **Gambar 2.28.** Unsur- unsur ini saling berhubungan pada titik simpulnya (*nodes*) dan batas yang sudah ditentukan (*boundary*). Perumusan elemen hingga umumnya digunakan untuk aplikasi geoteknik yang menghasilkan bentuk penurunan, tekanan, dan tegangan pada titik simpul. Banyak program komputer yang menganut metode elemen hingga. Salah satu contohnya Program Plaxis.



Gambar 2. 28 Definisi Hubungan Yang Digunakan Metode Elemen Hingga (Lee W. Abramson, 2002)

Dalam metode elemen hingga domain dari daerah yang dianalisis dibagi kedalam sejumlah zona-zona yang lebih kecil. Zona-zona kecil tersebut dinamakan elemen. Elemen-elemen tersebut dianggap saling berkaitan satu sama lain pada sejumlah titik-titik simpul.

Perpindahan pada setiap titik-titik simpul dihitung terlebih dahulu, kemudian dengan sejumlah fungsi interpolasi yang diasumsikan, perpindahan pada sembarang titik dapat dihitung berdasarkan nilai perpindahan pada titik-titik simpul.

Selanjutnya regangan yang terjadi pada setiap elemen dihitung berdasarkan besarnya perpindahan pada masing-masing titik simpul. Berdasarkan nilai regangan tersebut dapat dihitung tegangan yang bekerja pada setiap elemen terdapat tiga pendekatan yang umum digunakan dengan menggunakan metode elemen hingga, yaitu:

1. **Metode Pengurangan Kekuatan Geser (*Strength Reduction method*)**

Prinsip dari metode ini yaitu kekuatan geser material nilainya dikurangi secara bertahap sampai terbentuk suatu mekanisme keruntuhan pada lereng. Pengurangan parameter kohesi (C) dan sudut gesek (ϕ) dapat dinyatakan dengan persamaan rumus 4 dan rumus 5 sebagai berikut:

$$Cf = \frac{c}{SRF} \quad \text{.....(2.6)}$$

$$\emptyset f = tan^{-1}(\frac{tan\emptyset}{SRF}) \quad \text{.....(2.7)}$$

Dimana:

SRF = Faktor reduksi kekuatan geser.

2. **Metode Penambahan Gravitasi (*Gravity increase method*)**

Prinsip dari metode penambahan gravitasi yaitu nilai gravitasi dinaikkan secara bertahap sampai terbentuk suatu mekanisme keruntuhan pada lereng. Faktor keamanan dalam pendekatan ini didefinisikan sebagai rumus 6 yaitu:

$$(FS)gi = \frac{glimi}{gactual} \text{.....(2.8)}$$

Dimana gactual adalah konstanta gravitasi (9,81 kN/m^3) serta glimit

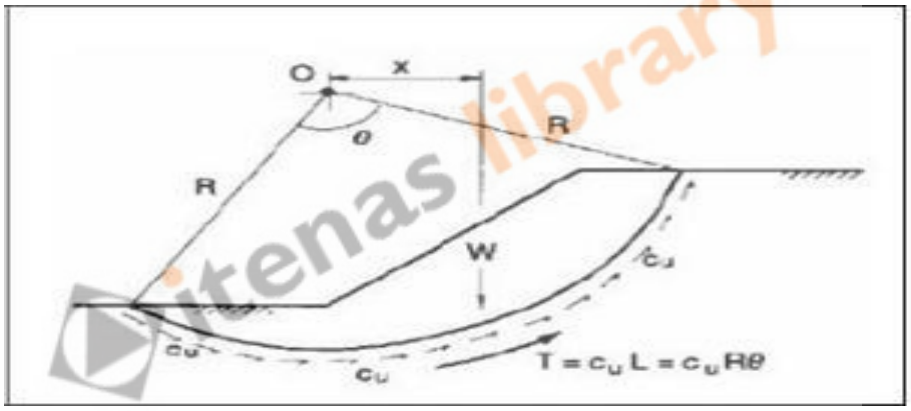
adalah nilai gravitasi yang tepat menyebabkan terjadi suatu keruntuhan pada lereng.

3. Metode Massa

Pendekatan yang digunakan dalam metode ini yaitu massa di atas bidang runtuh dianggap sebagai sebuah benda kaku dan bidang runtuh dianggap berupa busur lingkaran. Asumsi lainnya yang digunakan yaitu parameter kekuatan geser hanya ditentukan oleh kohesi saja.

Metode ini cocok sekali digunakan pada lereng lempung. Faktor keamanan lereng merupakan perbandingan antara momen penahan dan momen guling yang dapat dilihat pada **Gambar 2.29** sebagai berikut:

$$F = \frac{Momen\ Penahan}{Momen\ Guling} = \frac{C_u R^2 g}{W_x} \quad \text{.....(2.9)}$$

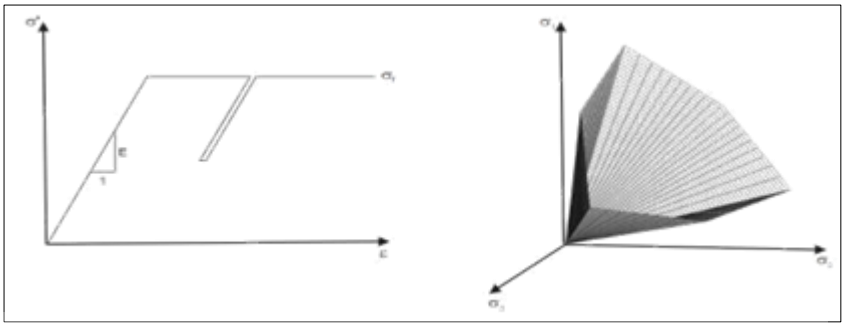


Gambar 2. 29 Metode Massa

2.14.3 Model *Mohr-Coloumb* (Model MC)

Model MC adalah pendekatan awal perilaku tanah dengan konsep konstitutif *linear elastic perfectly plastic*. Model ini menggunakan 5 (lima) parameter utama, yaitu modulus Youngs (E) dan rasio Poisson (v) untuk elastisitas tanah, parameter kuat geser efektif (c' dan ϕ') untuk plastisitas tanah, dan ψ sebagai sudut dilatansi. Pada **Gambar 2.30a** diperlihatkan bahwa untuk pembebanan primer, perilaku tegangan-regangan dimodelkan elastis dengan kekakuan tetap hingga tegangan keruntuhan tertentu (σ). Pelepasan beban dan pembebanan ulang (*unloading and reloading*) dimodelkan dengan cara serupa menggunakan respons material dan kekakuan sebagai pembebanan primer (*primary loading*). Ketika

tegangan keruntuhan tercapai, deformasi plastis sempurna (*perfectly plastic*) terjadi dan mengakibatkan pembentukan regangan yang tidak dapat kembali ke kondisi semula (*irreversible*). Untuk mengevaluasi apakah plastisitas terjadi atau tidak maka fungsi *yield* digunakan.



a. Perilaku material *linear elastic perfectly principal stress plastic*

b. Permukaan *yield* pada *space* dengan c' = 0

Gambar 2. 30 Model dasar Mohr-Coloumb (Plaxis, 2004)

Pada **Gambar 2.30b** diperlihatkan bahwa untuk kondisi keruntuhan tegangan tanah dapat dinyatakan sebagai permukaan *yield* heksagonal pada *pcincipal stress space* dengan persamaan sebagai berikut.

$f1 = 0$ dengan $f1 = \frac{1}{2} . |\sigma'2 - \sigma'3| - \frac{1}{2} . (\sigma'2 + \sigma'3). sin\varphi' - c'. cos\varphi' \leq 0$. (2.10)

$f2 = 0$ dengan $f2 = \frac{1}{2} . |\sigma'3 - \sigma'1| - \frac{1}{2} . (\sigma'3 + \sigma'1). sin\varphi' - c'. cos\varphi' \leq 0$. (2.11)

$f3 = 0$ dengan $f3 = \frac{1}{2} . |\sigma'1 - \sigma'2| - \frac{1}{2} . (\sigma'1 + \sigma'2). sin\varphi' - c'. cos\varphi' \leq 0$. (2.12)

2.14.4 Model *Hardening-Soil* (Model HS)

Serupa dengan model konstitutif MC, model HS menggunakan parameter efektif c' dan ϕ' untuk plastisitas tanah dan ψ sebagai sudut dilatansi sebagai kriteria batas tegangan. Meski demikian, model HS memodelkan batas setelah keruntuhan (*pre-failure*) perilaku tahah lebih akurat dibandingkan dengan model MC dengan memasukkan 3 (tiga) parameter kekakuan, yaitu kekakuan pembebanan *triaxial*, E50, kekakuan pembebanan konsolidasi, Eoed, dan kekakuan *unloading triaxial*, Eur. Model HS merupakan model terdepan untuk memodelkan perilaku tanah yang bervariasi, baik tanah lunak maupun tanah teguh (Schanz, 1998). Ketika tanah dibebani oleh beban deviatorik, tanah akan mengalami penurunan kekakuan dan

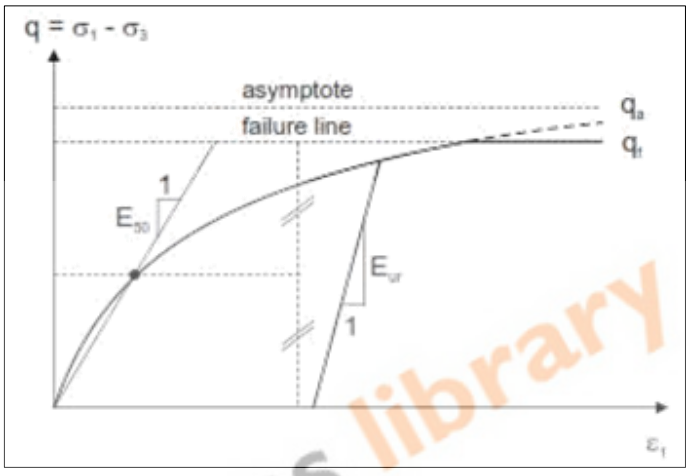
regangan plastis yang tidak dapat kembali ke kondisi semula terbentuk. Model dasar persamaan hiperbolik yang digunakan pada model HS adalah:

$$\varepsilon_1 = \frac{q_a}{2.E_{50}} . \frac{q}{q_a - q'} \text{ ……..…….(2.13)}$$

Keterangan:

q=$\sigma_1 - \sigma_3$

q_a adalah tegangan keruntuhan *asymptotic* seperti pada **Gambar 2.31**



Gambar 2. 31 Hubungan hiperbolik untuk pembebanan primer antara tegangan deviatorik dan regangan aksial

2.14.5 Material Elastik Linear

Hubungan tegangan-regangan dalam suatu material yang linear dikenal dengan hukum Hooke. Menurut Hooke, satuan perpanjangan elemen dalam batas proporsionalnya diberikan oleh Persamaan (2.14).

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} \text{ ……...(2.14)}$$

E = Modulus elastisitas material

Perpanjangan elemen dalam arah sumbu x diikuti dengan komponen melintang

$$\varepsilon_y = -v\frac{\sigma_x}{E_x} \text{……....(2.15)}$$

Dengan, v adalah Poisson's ratio

Untuk bahan yang isotropik (modulus elastisitas bahan dalam segala arah sama besar), diperoleh persamaan regangan normal seperti pada persamaan (2.16), hingga persamaan (2.18).

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - v(\sigma_y + \sigma_z)] \text{…….(2.16)}$$

$\varepsilon_y = \frac{1}{E}[\sigma_y - v(\sigma_x + \sigma_z)]$……(2.17)

$\varepsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - v(\sigma_x + \sigma_y)]$……(2.18)

Untuk kondisi regangan geser akibat tegangan geser ditunjukkan pada persamaan (2.19), hingga persamaan (2.22).

$Y_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$ ……(2.19)

$Y_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}$ ……(2.20)

$Y_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$ ……(2.21)

$G = \frac{E}{2(1+v)}$ ……..(2.22)

itenas library