

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teori Terowongan

Terowongan merupakan suatu tembusan dibawah permukaan tanah atau gunung. Terowongan biasanya tertutup di seluruh sisi kecuali pada kedua ujung yang terbuka. Terowongan biasa digunakan sebagai prasarana lalu lintas kendaraan seperti mobil, kereta api maupun pejalan kaki atau pengendara sepeda. Selain itu, terdapat pula terowongan yang berfungsi mengalirkan air untuk mengurangi banjir atau pendistribusian air untuk dikonsumsi, terowongan yang digunakan sebagai saluran pembuangan, pembangkit listrik, dan terowongan yang melindungi penyaluran kabel telekomunikasi.

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

Menurut Paulus P Raharjo (2004) bahwa terowongan transportasi bawah kota merupakan grup tersendiri diantara terowongan lalu lintas, dapat berupa terowongan kereta api maupun terowongan jalan raya. Dalam tahapan konstruksinya, terowongan membutuhkan pengawasan lebih, karena jika terjadi kesalahan metode atau *sequence of work* dapat mengakibatkan keruntuhan pada terowongan. Pelaksanaan penggalian terowongan dapat dikerjakan dengan beberapa bantuan alat-alat berat seperti *excavator* dengan perlengkapan-perengkapan *clampsell*, *backhoe*, *shovel*, dan juga *crawler loader*), sehingga pekerjaan dapat diselesaikan dalam waktu yang relatif cepat dan memperkecil kemungkinan terjadinya keruntuhan.

2.2 Klasifikasi Terowongan

Maksud dari dibuatnya sebuah terowongan adalah untuk melindungi atau menjamin berjalannya transportasi terhadap rintangan atau kondisi geografi yang ada. Rintangan tersebut dapat berupa rintangan alam seperti adanya pegunungan, sungai, laut, maupun rintangan yang disebabkan oleh aktifitas manusia. Sesuai dengan rintangan yang ada dan tujuan dari transportasi, terowongan dapat diklasifikasikan kedalam berbagai kelompok.

2.2.1 Terowongan Berdasarkan Kegunaan

Berdasarkan kegunaannya menurut Made Astawa Rai (1988), terowongan dapat dibagi kedalam 2 kelompok, yaitu :

1. Terowongan lalu lintas (*Traffic Tunnel*)

Terowongan lalu lintas ini berfungsi sebagai moda pengangkut material tambang atau barang dan manusia sebagai media transportasi. Terowongan ini terdiri dari :

a. Terowongan kereta api

Terowongan kereta api merupakan terowongan yang paling penting.. Kebanyakan terowongan kereta api terdapat didaerah pegunungan, namun ada juga yang dibangun dibawah sungai atau dibawah kota. Terowongan kereta api bawah kota merupakan kelompok tersendiri dari terowongan kereta api, dilihat dari sudut lokasi, metode kontruksi, material maupun kegunaannya. Terowongan jalan raya bentuk penampangnya tapal kuda (*horse shoes*). Sedangkan terowongan kereta api biasanya bentuk penampangnya bulat, empat persegi panjang atau segi banyak (*polygonal*) tergantung dari kondisi dibawah permukaan tanahnya. Yang menjadi rintangan untuk terowongan dibawah kota adalah kerapatan dari bangunan diatas tanah, jaringan jalan dan gedung-gedung. Syarat utama yang harus dipenuhi pada saat pembangunan terowongan kereta api dibawah kota yang dibedakan dengan terowongan kereta api lainnya, yaitu:

- Persyaratan keamanan yang perlu ditingkatkan karena rapatnya dan tingginya kecepatan dari lalu lintas (bebas dari *displacement* dan deformasi dari rel dan dinding terowongan).
- Memperhatikan *water sealing*.
- Standar tinggi dari kebersihan dan peranganin (*ventilation*).

b. Terowongan jalan raya

Terowongan yang dibangun untuk kendaraan bermotor karena pesatnya pertambahan lalu-lintas jalan raya bersamaan dengan berkembangnya industri kendaraan bermotor. Terowongan jalan raya dapat diklasifikasikan kedalam tiga macam kelompok :

- Terowongan yang dibangun untuk kendaraan bermotor karena pesatnya pertumbuhan lalu lintas seiring berkembangnya industri
- Terowongan interkoneksi, merupakan terowongan yang melewati daerah berbukit didalam kota. Terowongan ini biasanya merupakan penghubung jalan raya (jalan arteri) dan mempunyai bentuk penampang yang lebih tinggi.
- Terowongan yang melewati bawah sungai, didaerah perkotaan. Terowongan ini dibangun untuk menggantikan jembatan pada saat kapal lewat yang mengakibatkan lalu lintas terhenti karena padatnya lalu lintas kapal pada sungai

c. Terowongan pejalan kaki

Terowongan pejalan kaki ini termasuk dalam klasifikasi terowongan jalan (*road tunnel*) dengan penampang yang lebih kecil, jari-jari belokan yang pendek dan kemiringan yang besar (lebih besar dari 10%). Terowongan ini biasanya digunakan sebagai tempat penyebrangan bagi pejalan kaki. dibawah jalan raya yang ramai atau dibawah sungai dan kanal.

d. Terowongan navigasi

Terowongan navigasi ini biasanya dibuat untuk kepentingan pada lalu lintas air di kanal dan sungai yang saling menghubungkan. Disamping itu juga dibuat untuk menembus daerah pegunungan untuk

memperpendek jarak dan memperlancar lalu lintas air. Hal yang istimewa dari terowongan navigasi adalah dinding (*lining*) terowongan yang harus di desain kedap air (*impermeable*), sambungan-sambungan perlu dibuat secara hati-hati dan diberi penutup dengan bentuk yang dibuat melebar agar tahan air pada saat kapal lewat sekecil mungkin. Daerah-daerah yang mempunyai kemungkinan gerakan tektonik serta formasi dan struktur batuanya banyak mengandung patahan dan rekahan tidak dianjurkan untuk dibuat terowongan navigasi pada daerah tersebut.

2. Terowongan Angkut

Terowongan angkut ini berfungsi sebagai prasarana transportasi untuk material atau barang dan manusia yang berguna untuk kepentingan masyarakat industrial, seperti media penyalur untuk aliran air sebagai tenaga listrik dan sebagainya

a. Terowongan stasiun pembangkit listrik air

Terowongan ini dapat dikategorikan pada suatu klasifikasi utama berdasarkan kegunaannya terowongan ini bekerja dengan sistem mengalirkan atau mengalihkan air dari sungai atau reservoir guna pembangkit listrik disebuah stasiun pembangkit yang letaknya lebih rendah..

b. Terowongan penyediaan air

Terowongan ini hampir sama dengan terowongan stasiun pembangkit listrik air, perbedaannya terdapat pada fungsi dari kedua terowongan tersebut. Fungsi dari terowongan penyediaan air adalah menyalurkan air dari mata air untuk ditempatkan pada tempat penyimpanan air yang terdapat di suatu wilayah sebagai penyedia.

c. Terowongan untuk saluran air kotor

Terowongan saluran air kotor ini dibuat untuk menyalurkan pembuangan air kotor dari kota atau pusat industri ke tempat pembuangan yang sudah ditentukan.

d. Terowongan yang digunakan untuk kepentingan umum

Terowongan ini biasanya dibuat di daerah perkotaan untuk penyaluran kabel listrik, telepon, pipa gas, air, dan juga pipa-pipa lainnya yang penting, dibuat dibawah saluran air, jalan raya, jalan kereta api, blok bangunan untuk memudahkan inspeksi secara kontinyu, pemeliharaan dan perbaikan sewaktu-waktu kalau ada kerusakan

2.2.2 Terowongan Berdasarkan Lokasi

Berdasarkan lokasinya terowongan dibagi menjadi beberapa bagian sebagai berikut:

1. Terowongan bawah air (*Underwater Tunnels*)

Terowongan yang dibangun dibawah dasar muka air pada umumnya dibangun dibawah sungai atau laut. Perhitungannya tentu perlu lebih diperhatikan karena lebih kompleks, selain ada tekanan tanah, juga terdapat tekanan air yang besar.

2. Terowongan pegunungan (*Mountain Tunnels*)

Terowongan jenis ini adalah salah satu terowongan yang mempunyai peran penting ketika suatu daerah memiliki kondisi topografi yang berbeda-beda, sehingga perlu adanya terowongan yang dibangun menembus sebuah bukit maupun gunung demi kelancaran transportasi.

3. Terowongan bawah tanah atau air di perkotaan (*Tunnels at Shallow Depth and Water City Streets*)

Jaringan transportasi yang ada di negara-negara maju cukup banyak menerapkan tipe terowongan ini. Terowongan ini sangat cocok untuk dibangun di perkotaan. Baik itu untuk moda transportasi maupun saluran drainase kota.

2.2.3 Terowongan Berdasarkan Material

Terowongan berdasarkan material yang dipakai, Paulus P Raharjo (2004) menjelaskan terdapat 3 jenis terowongan, yaitu:

1. Terowongan Batuan (*Rock Tunnels*)

Terowongan batuan dibuat biasanya pada batuan massif dengan cara pengeboran atau peledakan. Terowongan ini biasanya lebih mudah dikonstruksikan daripada terowongan melalui tanah lunak karena pada daya dukung batuan dapat berdiri sendiri kecuali pada batuan yang mengalami *fracture*.

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

Terowongan ini dibuat melalui tanah lempung atau pasir atau batuan lunak (*soft rock*). Karena jenis material ini runtuh bila digali, maka dibutuhkan suatu dinding atau atap yang kuat sebagai penahan bersamaan dengan tata cara penggalian. Umumnya digunakan *shield* (pelindung) untuk memproteksi galian tersebut supaya tidak runtuh. Teknik yang biasanya digunakan pada saat ini adalah *shield tunnelling* pada terowongan melalui tanah lunak ini, lining beton langsung dipasang dibelakang *shield* bersamaan dengan pergerakan maju darimesin pembor terowongan (*Tunnel Boring Machine*).

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

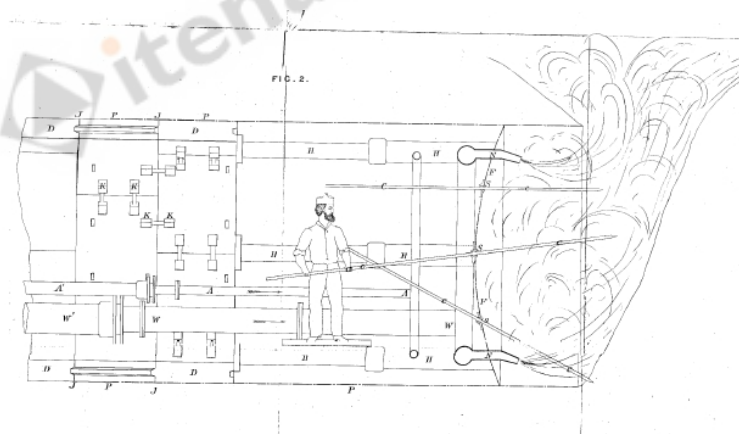
Terowongan ini dibuat dengan cara menggali sebuah *trench* pada tanah, kemudian dinding dan atap terowongan dikonstruksikan di dalam galian. Sesudah itu galian ditimbun kembali dan seluruh struktur berada dibawah timbunan tanah. (Rai Made Astawa Rai : Teknik Terowongan: 1988)

2.3 Metode Konstruksi Terowongan

Menurut pedoman pengawasan penyelenggara pekerja konstruksi, definisi dari metode pelaksanaan (*Construction Method*) adalah cara pelaksanaan pekerjaan konstruksi berdasarkan urutan kegiatan yang logik, realistik dan dapat dilaksanakan dengan menggunakan sumber daya secara efisien. (Peraturan Menteri Pekerja Umum, 2008). Metode konstruksi terowongan yang biasa digunakan dibagi dalam beberapa macam, yaitu :

2.3.1 Tunnel Bor Machine (TBM)

Awal mula berasalnya metode TBM berasal dari metode *shield tunneling*, yang merupakan pengembangan metode dari penggalian terowongan pada tanah lunak yang terletak di bawah sungai. Konsep metode konstruksi ini awalnya ditemukan oleh Mark Brunel pada tahun 1818 yang merupakan seorang *engineer* berkebangsaan Prancis yang menetap di Inggris. Konsep dasar yang ia terapkan adalah pemasangan sebuah *rigid frame (shield)* yang menembus tanah lunak dengan bantuan dongrak sebagai pendorong. *Rigid frame* digunakan untuk melindungi agar tanah tidak runtuh. Konsep *shield tunneling* ini kemudian di desain ulang oleh Peter W. Barlow dan dikembangkan oleh muridnya James Henry Greathead seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 2.1**, dimana Greathead membuat metode *shield tunneling* berbentuk lingkaran pada proyek pembuatan Tower Subway pada tahun 1869. Penggunaan segmen baja, pengurukan, dan penyuntikan digunakan oleh Greathead dalam pekerjaan tersebut. Metode pelindung terowongan (*Shield Tunneling*) hingga hari ini masih mengadopsi metode dari Greathead.

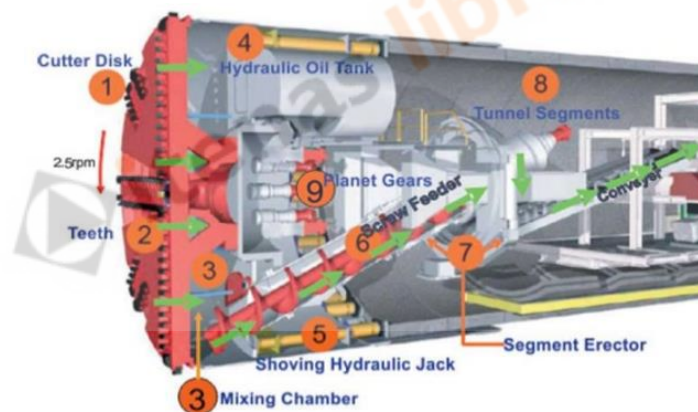


Gambar 2.1 James Henry greathead shield

(Sumber : Greathead's patent GB 1738/1874)

Tunnel Bor Machine atau yang kita kenal dengan TBM adalah mesin yang biasa digunakan untuk menggali terowongan dengan penampang berbentuk bundar untuk melalui berbagai lapisan tanah, batuan dan juga dapat digunakan untuk *microtunneling*. Seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 2.2** sebuah Tunnel Bor Machine (TBM) adalah suatu sistem yang tidak dapat berdiri sendiri-sendiri. TBM

yang lengkap bisa mencapai panjang 300 meter yang terdiri dari alat pemotong, alat penggali, sistem kemudi, *gripping*, pengebor, pengontrol, dan penyokong tanah, pemasang lining, alat pemindah material, sistem ventilasi serta sumber tenaga. Sedangkan pekerjaan rel, pembangkit tenaga dan saluran ventilasi dikerjakan pada bagian belakang TBM merupakan pekerjaan pendukung. TBM ini dapat digunakan pada batuan yang lunak hingga batuan keras. Diameter alat TBM ini bervariasi mulai dari 1 meter hingga 19 meter. TBM dilengkapi dengan beberapa mata bor yang tersebar di permukaan kepala bor. Kepala bor yang berbentuk silinder ini kemudian berputar dan mengikis batuan dan begitu seterusnya sambil TBM bergerak maju. TBM juga digunakan sebagai alternatif metode *drilling and blasting* (D&B). *Drilling and blasting* merupakan metode konvensional yang digunakan untuk membuat terowongan yang terdiri dari beberapa tahap dengan *drilling* (membor) dan *blasting* (peledakan) sebagai dua tahap paling utama.



Gambar 2.2 Tunnel bor machine (TBM)

(Sumber :Vishal, 2016)

Mesin bor terowongan TBM ini pada dasarnya digunakan sebagai alternatif untuk pekerjaan pengeboran dan peledakan di batu dan "penambangan tangan" konvensional di tanah, namun metode TBM ini memiliki keuntungan memperkecil gangguan pada tanah di sekitarnya dan menghasilkan dinding terowongan yang halus. Hal ini secara signifikan dapat mengurangi biaya tambahan untuk proses lapisan pada terowongan, hal ini cocok untuk digunakan di daerah perkotaan agar

dalam proses konstruksinya tidak menimbulkan gangguan yang besar. Kerugian utama dalam metode ini adalah biaya dimuka. Metode ini termasuk mahal untuk dibangun, dan bisa jadi sulit untuk diangkut. Semakin lama terowongan, semakin sedikit biaya relatif mesin bor terowongan dibandingkan metode bor dan ledakan. Ini karena *tunneling* dengan TBM jauh lebih efisien dan menghasilkan dan memiliki waktu penyelesaian yang lebih pendek, dengan asumsi mesin beroperasi dengan lancar.

2.3.2 *New Austrian Tunnel Method* (NATM)

Metode NATM ini pada dasarnya telah dikembangkan di Austria dengan memanfaatkan penyediaan lapisan primer fleksibel dalam bentuk *shotcrete*, *wire mesh*, *rock bolts*, *lattice girder*. Dalam kasus massa batuan yang lebih lemah, penggunaan *forepole* / atap pipa juga dibuat untuk mendukung *crown* terowongan yang pada urutannya menyebabkan kelebihan dan juga guna memastikan keamanan selama eksekusi. Aspek utama dari metode ini adalah desain yang dinamis berdasarkan klasifikasi massa batuan serta deformasi yang diamati. Karenanya penggunaan sistem pendukung terowongan akan lebih ekonomis bersamaan dengan pendekatan eksekusi yang telah dipertimbangkan.

New Austrian Tunneling Method atau yang dikenal sebagai NATM dinamakan dari Salzburg (Austria). Pertama kali digunakan oleh Mr.Rabcewicz berasal dari pengalaman yang diperolehnya pada saat pekerjaan kondisi terowongan di Austria Apine. Penggunaan pertama NATM dalam *tunneling softground* dilakukan di Metro Frankfurt pada tahun 1969. NATM memiliki tujuan dasar agar tercipta sistem pendukung terowongan yang stabil dan lebih ekonomis, metode ini telah sangat berguna pada kondisi geologi yang tidak fleksibel di mana perkiraan massa batuan sulit karena perubahan geologi yang cepat.

Prinsip yang perlu diperhatikan dari metode konstruksi dengan NATM adalah:

1. Mobilisasi kekuatan massa batuan

Metode ini bergantung pada kekuatan massa batuan yang berhubungan sebagai komponen utama pendukung terowongan. Dukungan primer

diarahkan untuk membuat batu mendukung dirinya sendiri dengan daya dukung diikuti dengan penyangga yang harus mempunyai kemampuan atau karakteristik *load-deformation* yang cocok dengan pemasangan yang tepat waktu.

2. Perlindungan *shotcrete*

Perlindungan *shotcrete* di perlukan untuk penanganan terhadap deformasi massa batuan yang longgar dan berlebihan dan harus diminimalkan dengan menerapkan lapisan 25-50 mm dari *sealing shotcrete* segera setelah pembukaan wajah galian terowongan, kadang seiringan dengan sistem yang cocok dari *rock bolting*, setelah penggalian. Sangat penting halnya bahwa sistem penyangga yang digunakan akan kontak langsung secara keseluruhan dengan massa batuan dan mengalami deformasi Bersama-sama dengan batuan.

3. Pengukuran

Setiap deformasi galian harus diukur. NATM membutuhkan pemasangan instrument dan pengukuran yang canggih. Hal itu tertanam di lapisan, tanah seperti sel beban, dan munculnya beban pada penyangga. Akan didapatkan informasi mengenai kestabilan dari terowongan yang memungkinkan untuk mengoptimasikan formasi *load-bearing ring* dari lapisan batuan. Waktu penempatan penyangga yang digunakan merupakan hal yang sangat.

4. Lapisan Primer

Lapisan primer tipis atau *primary lining* adalah penopang aktif dan terowongan diperkuat bukan oleh lapisan beton yang lebih tebal tetapi dengan kombinasi fleksibel dari *rock bolt*, *wire mesh*, dan *lattice girder*

5. Penutup *invert*

Sangat penting untuk secepat mungkin diusahakan menutup *invert* untuk menyelesaikan pekerjaan sebagai penahan beban, terutama pada terowongan tanah yang lunak *invert* harus segera ditutup dan tidak boleh ada bagian yang tidak segera disangga meskipun untuk sementara karena dapat menyebabkan ada bagian yang tidak tertahan. Untuk terowongan di batuan, penyangga tidak boleh dipasang terlalu awal/cepat karena

kemampuan dukung massa batuan belum sampai termobilisir secara penuh. Massa batuan harus diizinkan untuk melakukan deformasi yang cukup sebelum penyangga bekerja penuh.

6. Klasifikasi massa batuan

Partisipasi ahli geologi sangat penting sebagai pendukung utama serta perancangan lebih lanjut selama penggalian batuan karena memerlukan klasifikasi massa batuan. Penentuan penyangga berdasarkan pada klasifikasi massa batuan pada tiap siklus pemboran dan peledakan sesudahnya.. Klasifikasi NATM menghubungkan antara kondisi massa batuan, prosedur penggalian dan kebutuhan dari penyangga terowongan. Klasifikasi merupakan bagian dari kontrak yang dapat digunakan untuk proyek yang baru berdasarkan pengalaman sebelumnya dan investigasi geoteknik rinci.

7. Desain Dinamis

Desainnya dinamis selama konstruksi terowongan dan setiap klasifikasi pembukaan batu dilakukan dukungan yang dipilih. Selain itu, desain diperkuat lebih lanjut berdasarkan informasi yang disadari selama pemantauan pekerjaan.

Komponen dan urutan eksekusi pengerjaan konstruksi metode NATM :

1. *Sealing shotcrete*

Penyemprotan *shotcrete* atau campuran beton tipis sebagai penahan lubang galian terowongan dengan tebal biasanya berkisar 25 mm hingga 50 mm dapat dilihat pada **Gambar 2.3**

2. Perbaikan *lattice girder*

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



Gambar 2.3 Penggunaan *shotcrete*

(Sumber : Hamed, 2015)



Gambar 2.4 Penggunaan *lattice girder*

(Sumber : Hamed, 2015)

3. Perbaikan *wire mesh*

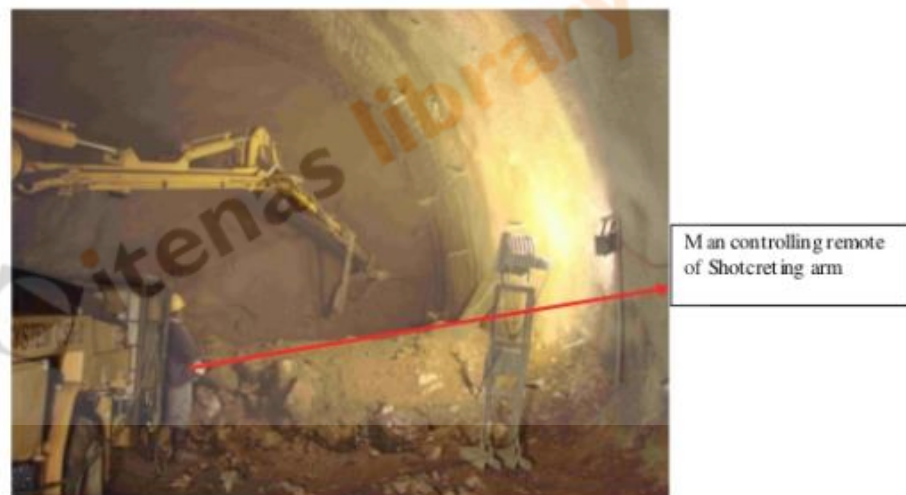
Wire mesh atau tumbukan kawat umumnya menggunakan kabel tebal 6mm seperti yang dapat dilihat seperti yang ditunjukkan pada bagian kanan **Gambar 2.5**.

4. Lapisan primer dengan *shotcrete*

Penyemprotan *shotcrete* pada masing-masing lapisan yang tidak lebih tebal dari 150 mm dapat dilihat pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2.5 Tahapan perbaikan *wire mesh* dan *pipe forepoling*
(Sumber : Hamed, 2015)



Gambar 2.6 Tahap pemasangan primary lining dengan shotcrete
(Sumber : Hamed, 2015)

5. *Rock bolt*

Pemasangan *rock bolt* dicontohkan pada **Gambar 2.7**, pada tahapan konstruksi dengan metode NATM terdapat berbagai jenis *rock bolt* yang bisa digunakan :

1) Jenis SN

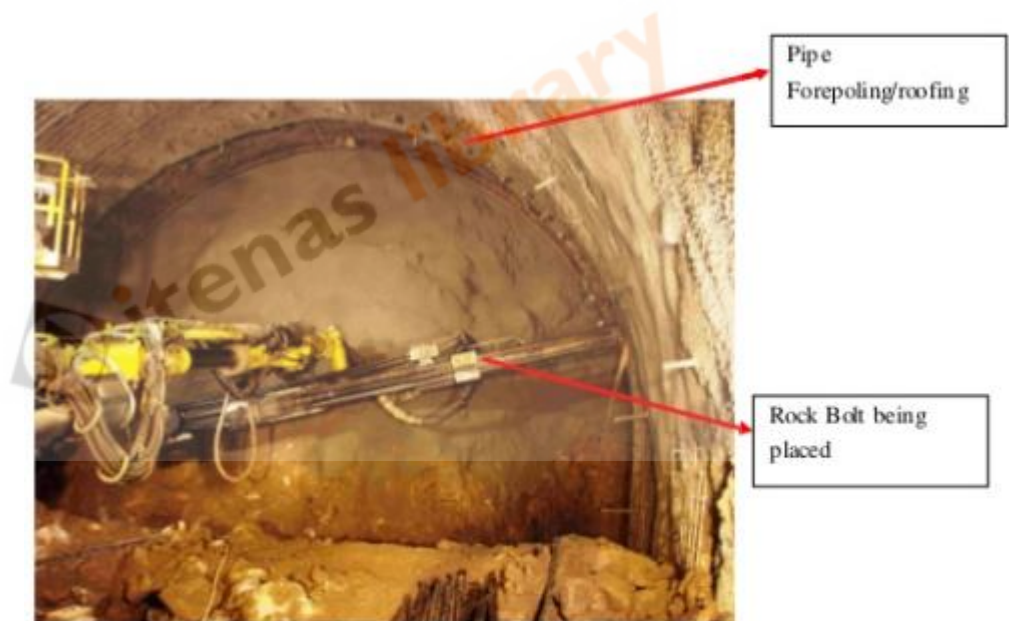
Batang baja normal untuk baja 28mm ke atas (umumnya digunakan sebagai 32mm) biasanya dengan material semen, beberapa saat kantung resin dapat digunakan untuk penjangkaran yang lebih baik.

2) SDR

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

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

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



Gambar 2.7 Tahap pemasangan *rock bolt*

(Sumber : Hamed, 2015)

6. *Pipe Forepoling*

Digunakan untuk penyangga *crowns* dari terowongan untuk siklus penggalian berikutnya, dapat dilihat seperti yang ditunjukkan pada bagian kiri **Gambar 2.5**.

2.4 Sistem Perkuatan Pada Terowongan

Lapisan terowongan merupakan struktur yang tidak terkena tegangan langsung dimana awal hubungannya adalah dengan tanah. Untungnya, tegangan awal akan berkurang karena deformasi tanah yang terjadi saat penggalian namun juga setelah pemasangan *lining* dengan metode penyemprotan *shotcrete*. Di sini kita akan mempertimbangkan hal penting bahwa dengan adanya deformasi batuan/tanah mengakibatkan pengurangan tegangan *primer*. Tanah di hubungkan dengan deformasi *lining*, maka beban yang bekerja pada dinding terowongan bergantung pada deformasi atau penurunan itu sendiri. Pertimbangan deformasi pada *tunneling* adalah manfaat NATM. Namun deformasi yang berlebihan juga dapat menjadi kesalahan yang menyebabkan kenaikan tekanan yang kuat pada konstruksi. Untuk menunjukkan hal ini adalah manfaat lain dari NATM yaitu pelunakan dan pelonggaran terkait geomaterial merupakan isu penting.

Failure merupakan deformasi yang terlalu besar sehingga menyebabkan keruntuhan. Bagaimanapun, deformasi besar harus dihindari. Ada dua cara: penyangga awal dan kaku (yang tidak ekonomis) atau dengan menjaga sedikit penurunan rongga setelah penggalian.

Ada dua cara untuk melakukannya, yaitu sebagai berikut :

1. Penggalian parsial bukan penggalian wajah penuh
2. Langkah maju kecil

Tentu saja, langkah penggalian yang terlalu kecil tidak akan ekonomis. Jadi, konsep dari *tunneling* terdiri dari langkah-langkah penggalian yang seluas mungkin dan dengan memanfaatkan kekuatan batuan.

2.4.1 *Shotcrete*

Shotcrete merupakan campuran beton yang disemprot atau diproyeksikan dengan menggunakan suatu alat bantu atau alat semprot untuk membentuk suatu struktur yang berfungsi sebagai penyangga sementara terowongan sebelum di *lining concrete* yang memiliki gagasan utama menggunakan massa batuan di sekitarnya

untuk menstabilkan terowongan. Perbedaan antara campuran *shotcrete* dan beton cor bukanlah kekuatan produk akhir melainkan proses penempatannya. Dalam *tunneling*, *shotcrete* diterapkan untuk menutup permukaan yang terbuka akibat pengeboran dan untuk mendukung rongga. Karakteristik *shotcrete* hampir sama dengan beton biasa. Namun dengan modulus elastisitas yang lebih rendah dari pada beton konvensional.

Kekakuan dan kekuatan *shotcrete* berkembang sama seperti pada beton cor konvensional. Setelah itu, dengan kelembaban yang cukup, kekuatannya meningkat karena pasca hidrasi. Sampai usia dua tahun itu meningkat sekitar 50%. Kekuatan beton penyemprotan cepat meningkat seiring waktu dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1 Peningkatan kekuatan shotcrete terhadap waktu

(Sumber : Kolymbas ,2006)

Umur	Kekuatan (MPa)
6 Menit	0,2 – 0.5
1 jam	0.5 - 1
24 Jam	8 - 20
7 Hari	30 - 35

Terdapat dua metode pada penyemprotan *shotcrete* sebagai berikut :

1. Campuran basah

Beton campuran dipompa ke nosel dan digerakkan oleh udara bertekanan, karena bertambahnya berat nosel, campuran basah lebih baik disemprot dengan mesin untuk meningkatkan *durability* sehingga pekerjaan lebih mudah dilakukan.

2. Campuran Kering

Semen kering dan agregat diangkut secara pneumatik, dan air ditambahkan pada nosel seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 2.8**.

Keuntungan dari campuran kering adalah sebagai berikut :

1. Mesin lebih kecil dan lebih murah
2. Menurunkan biaya pembersihan dan perawatan
3. Berhenti dan memulai kembali shotcreting lebih sederhana
4. Jarak semprot yang jauh
5. Beton lebih baik
6. Komposisi air dapat dikurangi saat diaplikasikan pada tanah basah.

Keuntungan dari campuran basah adalah sebagai berikut :

1. Mengurangi produksi debu
2. Mengurangi pantulan material
3. Mengurangi penyebaran beton
4. Kapasitas yang lebih tinggi.



Gambar 2.8 Sketsa sistem *shotcrete dry mix*.

(Sumber :Kolymbas, 2006)

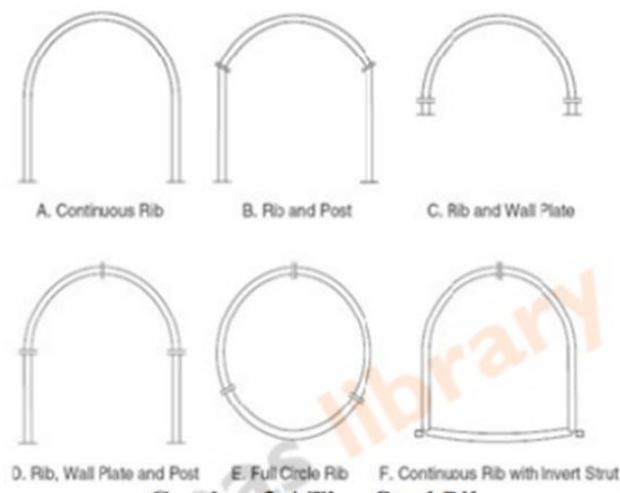
2.4.2 Mesh Kawat (*Wiremesh*)

Mesh kawat yang sering digunakan adalah *chailink mesh* dan *weld mesh*. *Chailink mesh* digunakan pada permukaan karena kuat dan fleksibel, sedangkan *weld mesh* terdiri atas kabel baja yang diatur dengan pola segiempat atau bujur

sangkar dan disambung dengan cara dipatri pada titik- titik perpotongnya, serta memperkuat beton tembak dan lebih kaku.

2.4.3 *Steel Rib*

Steel rib merupakan salah satu jenis penyangga konstruksi terowongan yang terbuat dari baja. Tipe *steel rib* dapat dilihat dalam **Gambar 2.9**



Gambar 2.9 Sketsa sistem *steel rib*..

(Sumber : Singh dan Rajnish, 2006).

2.4.4 *Rockbolt*

Menurut Singh, 2006, *rockbolt* adalah bahan batang yang terbuat dari baja, berpenampang bulat yang digunakan untuk menyangga massa batuan. Kekuatan *rockbolt*, biasanya diukur dengan melaksanakan uji tarik (*pull test*) di lapangan. Berdasarkan Handbook of Road Power, 2006, kekuatan perkuatan ini ditentukan oleh beberapa parameter diantaranya diameter, panjang, dan jarak antar *rockbolt*.

2.4.5 *Grouting*

Grouting adalah suatu proses di mana suatu cairan diinjeksikan/disuntikan dengan tekanan sesuai uji tekanan air yang berupa cairan pengeras atau mortar ke tanah untuk memperbaiki kekakuan, kekuatan dan / atau impermeabilitas. Ada berbagai pola penerapan *grouting* ke dalam tanah sebagai berikut:

1. *Low pressure grouting (permeation grouting)*

Grout dibuat merambat melalui dalam pori-pori tanah namun membiarkan tanpa merubah kerangka dari butiran tanah itu sendiri. Daerah yang dihasilkan berbetuk *spherical*, jika tanahnya homogen dan isotropis, dan jika sumbernya dapat dianggap sebagai titik.

2. *Compensation grouting*

Bila tekanan *grouting* yang diterapkan terlalu tinggi, maka *grout* tidak menyebar ke pori-pori tanah. Tetapi melalui tanah yang retak dan *grout* akan menyebar melalui celah tersebut (atau dalam kasus tanah lunak, tanah tersebut terdorong ke depan). Jenis pemasangan ini diterapkan untuk mengimbangi penurunan permukaan pada terowongan. Penerapan *Compensation grouting* untuk membalikkan penurunan permukaan yang diakibatkan tunneling harus sangat hati-hati. Karena tekanan yang diterapkan dapat memberikan beban pada lapisan terowongan. Pemberian tekanan berlebih dapat menyebabkan pergerakan lapisan yang berlebihan pada terowongan.

3. *Jet grouting*

Jet grout disemprotkan dari nosel ke tanah sekitarnya dengan tekanan awal sebesar 300 hingga 600 bar. Hal tersebut membentuk kembali tanah dengan tercampurnya *grout* yang diterapkan seperti terlihat pada **Gambar 2.10**



Gambar 2.10 Pembebanan lapisan terowongan pada *compensation grouting*

(Sumber : Kolymbas , 2006)

2.5 Parameter Tanah

Parameter tanah adalah sebuah nilai yang digunakan sebagai acuan untuk mengetahui hasil suatu proses perubahan yang terjadi dalam tanah meliputi sifat fisik dan mekanis tanah. Dengan mengenal dan mempelajari sifat-sifat tanah, perancangan yang dilakukan akan lebih terstruktur dan ekonomis. Karena sifat-sifat tersebut merupakan hal yang sangat penting dan merupakan hal utama yang perlu diperhatikan dalam proses perencanaan konstruksi maka penting dilakukan penyelidikan tanah (*soil investigation*). Dari uji laboratorium terhadap sampel tanah lapangan yang dilakukan kita bisa mendapatkan parameter-parameter tanah yang dapat digunakan untuk analisis maupun desain. Data yang didapat dari uji laboratorium harus di evaluasi terlebih dahulu untuk memperoleh hasil interpretasi yang baik. Interpretasi data geoteknik mempunyai tingkat ketelitian yang berbeda-beda tergantung pada uji yang dilakukan, kompleksitas material alami yang terjadi.

2.5.1 Berat Isi Tanah

Berat isi tanah adalah perbandingan berat tanah kering dengan volume tanah termasuk volume pori-pori tanah, biasanya dinyatakan dalam satuan gram/cm^3 . Besaran ini menyatakan berat tanah, yaitu padatan air persatuan isi. Berat paling sering di pakai adalah berat isi kering yang umumnya disebut berat isi saja. Nilai berat isi dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya pengolahan tanah, bahan organik, pemadatan alat-alat pertanian, tekstur, struktur, dan kandungan air tanah. Nilai ini banyak dipergunakan dalam perhitungan- perhitungan seperti dalam penentuan kebutuhan air irigasi pemupukan dan, pengolahan tanah. (Foth, 1986).

Berat isi tanah adalah berat tanah utuh yang tidak terganggu (*undisturbed*) dalam keadaan kering dibagi dengan volume tanah, dan biasanya dinyatakan dalam satuan g/cm^3 . Volume tanah termasuk butiran padat dan ruang pori. Berat isi ditentukan oleh porositas dan padatan tanah. Nilai berat isi tanah sangat bervariasi antara satu titik dengan titik lainnya karena perbedaan kandungan bahan organik, tekstur tanah, kedalamantanah, jenis fauna tanah, dan kadar air tanah (Agus et al. 2006). Tabel korelasi berat isi tanah dapat dilihat pada **Tabel 2.2**.

Tabel 2.2 Korelasi tipe tanah terhadap *void ratio*, *natural moisture content*, dan *dry unit weight*.

(Sumber :Das,2006)

Type of soil	Void ratio, e	Natural moisture content in a saturated state (%)	Dry unit weight, γ_d	
			lb/ft ³	kN/m ³
Loose uniform sand	0.8	30	92	14.5
Dense uniform sand	0.45	16	115	18
Loose angular-grained silty sand	0.65	25	102	16
Dense angular-grained silty sand	0.4	15	121	19
Stiff clay	0.6	21	108	17
Soft clay	0.9-1.4	30-50	73-93	11.5-14.5
Loess	0.9	25	86	13.5
Soft organic clay	2.5-3.2	90-120	38-51	6-8
Glacial till	0.3	10	134	21

2.5.2 Modulus Elastisitas Tanah

Modulus elastisitas diartikan sebagai perbandingan antara tegangan dan regangan. Tegangan (σ) adalah besar gaya yang bekerja, dibagi dengan luas permukaan dari sampel material. Sedangkan regangan (ϵ) adalah perubahan bentuk akibat tegangan, diukur sebagai rasio perubahan dari sejumlah dimensi benda terhadap dimensi awal dimana perubahan terjadi (Kanginan, 2005).

Nilai modulus young merupakan nilai yang menunjukkan besarnya nilai elastisitas tanah yang merupakan perbandingan antara tegangan dan regangan. Nilai ini bisa didapatkan dari *Triaxial Test*. Nilai Modulus elastisitas (E_s) secara empiris dapat ditentukan dari jenis tanah dan data sondir seperti terlihat pada **Tabel 2.3** berikut ini.

Tabel 2.3 Tabel korelasi antara jenis tanah dengan modulus elastisitas

(Sumber :Das,1996)

Jenis Tanah	Modulus Young (E_s) (x 10 ³ KN/m ²)	Angka Poisson (ν)
<i>Loose Sand</i>	10.35 – 24.15	0.20 – 0.40
<i>Medium Dense Sand</i>	17.25 – 27.60	0.25 – 0.40
<i>Dense Sand</i>	34.50 – 55.20	0.30 – 0.45
<i>Silty Sand</i>	10.35 – 17.25	0.20 – 0.40
<i>Sand and Gravel</i>	69.00- 172.5	0.15 – 0.35
<i>Soft Clay</i>	2.07 – 5.18	0.20 – 0.50
<i>Medium Clay</i>	5.18 – 10.35	0.20 – 0.50
<i>Stiif Clay</i>	10.35 – 24.15	0.20 – 0.50

2.5.3 Sudut Geser Tanah

Kekuatan geser dalam memiliki variabel kohesi dan sudut geser dalam. Sudut geser dalam dan kohesi memiliki nilai yang bertujuan untuk menentukan tanah akibat tegangan yang bekerja berupa tekanan lateral tanah. Nilai ini juga didapatkan dari pengukuran *engineering properties* tanah berupa *Triaxial Test* dan *Direct Shear*

Selain itu, sudut geser dalam juga bisa di korelasikan dengan persamaan berdasarkan nilai N-SPT menurut Hatanaka dan Uchida (1996) sebagai berikut:

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

Fungsi dari sistem klasifikasi tanah ialah untuk menentukan dan mengidentifikasi tanah dengan cara yang sistematis guna menentukan kesesuaian terhadap pemakaian tertentu yang didasarkan pada pengalaman terdahulu. (Bowles,1989).

2.5.4 Kohesi

Kohesi merupakan gaya tarik menarik antar partikel tanah. Sama halnya dengan sudut geser dalam, kohesi merupakan kuat geser tanah yang memiliki nilai sebagai indikator untuk mengetahui ketahanan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja pada tanah yang berupa gerakan lateral tanah. Deformasi ini terjadi akibat dari keadaan kritis pada tegangan normal dan tegangan geser yang tidak sesuai dengan faktor keaman yang direncanakan. Nilai ini didapat dari pengujian laboratorium *Triaxial Test* dan *Direct Shear Test*.

Tabel 2.4 Korelasi N-SPT dengan konsistensi tanah lempung

(Sumber :Das,1995)

Standard Penetration number, N_{60}	Consistency	Unconfined Compression strength q_u (kN/m^2)
0-2	Very Soft	0-25
2-5	Soft	25-50
5-10	Medium Stiff	50-100
10-20	Stiff	100-200
20-30	Very Stiff	200-400
>30	Hard	>400

Dari tabel diatas untuk mendapatkan nilai kohesi efektif dilakukan perhitungan dengan rumus sebagai berikut :

$$C_u = \frac{q_u}{2} \text{ kN/m}^2 \dots\dots\dots(2.2)$$

2.5.5 Permeabilitas Tanah

Permeabilitas tanah yaitu kemampuan tanah untuk meyampaikan air atau udara. Permeabilitas tanah biasanya diukur melalui kecepatan air yang mengalir dalam satuan waktu tertentu dan ditetapkan dalam satuan cm/jam (Hakim et al. 1986). Faktor yang berpengaruh pada permeabilitas tanah antara lain adalah tekstur tanah, porositas distribusi ukuran pori, stabilitas agregat, stabilitas struktur tanah serta kadar bahan organik.

Pengaruh pemadatan terhadap permeabilitas tanah adalah memperlambat laju permeabilitas tanah karena pori kecil yang menghambat gerakan air tanah. Struktur tanah dan bahan organik menunjukkan hubungan utama terhadap permeabilitas adalah distribusi ruang pori, sedangkan faktor lainnya merupakan faktor yang menentukan porositas dan distribusi ukuran pori. Selanjutnya permeabilitas akan meningkat bila:

1. Agregasi butir-butir tanah menjadi remah,
2. Adanya bahan organik,
3. Terdapat saluran bekas lubang yang terdekomposisi, dan
4. Porositas tanah yang tinggi. Pengaruh pemadatan terhadap permeabilitas tanah terjadi karena pori kecil yang menghambat gerakan air meningkat

Tabel 2.5 Tabel korelasi antara jenis tanah dengan nilai permeabilitas tanah

(Sumber : Das Braja, 2006)

Table 6.1 Typical Values of Hydraulic Conductivity of Saturated Soils

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

2.6 Metode Analisis (PLAXIS 2D)

Melakukan analisis dalam bidang geoteknik dapat dilakukan dengan berbagai metode analisis, pada struktur bangunan *tunnel* dibutuhkan perhitungan deformasi tanah pada saat proses penggalian, dan gaya-gaya apa saja yang bekerja pada struktur terowongan.

Metode yang digunakan dalam PLAXIS 2D ini adalah elemen hingga (*finite element*) dalam analisis deformasi dan stabilitas dua dimensi dalam rekayasa geoteknik. Selain itu, tanah merupakan material *multi-fase*, maka diperlukan prosedur khusus untuk melakukan analisis terhadap tekanan hidrostatis dan tekanan nonhidrostatis dalam tanah. Meskipun pemodelan dari material tanah sendiri merupakan hal yang penting, namun banyak proyek terowongan yang juga harus mengikutsertakan pemodelan struktur dan interaksi antara struktur dan tanah.

Metode elemen hingga merupakan salah satu pendekatan untuk mengetahui solusi analisis struktur secara numerik dimana struktur kontinum dengan derajat kebebasan tak hingga yang disederhanakan dengan diskretasi kontinum dalam elemen-elemen kecil yang biasanya memiliki geometri lebih sederhana dengan derajat kebebasan tertentu (berhingga), sehingga lebih mudah dianalisis dengan persamaan matriks sebagai berikut :

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

Dengan :

$\{R\}$ = Matriks Gaya Global

$\{D\}$ = Matriks Perpindahan Global

$[K]$ = Matriks Kekakuan Global

PLAXIS merupakan *software* dalam bidang geoteknik yang dapat digunakan untuk menganalisis perhitungan defromasi menggunakan metode elemen hingga dalam kondisi *plane-strain* maupun *axisymmetric*. Deformasi statis

memiliki persamaan dasar dari massa tanah yang diformulasikan dalam kerangka kerja mekanika kontinum. Pembatasan dilakukan pada deformasi yang dianggap kecil. Hal ini memungkinkan sebuah formulasi yang mengacu pada geometri awal yang belum terdeformasi. Deskripsi kontinum didiskretisasi menurut metode elemen hingga.

2.7 *Hardening Soil Model*

Perilaku mekanis dari tanah dapat dimodelkan pada berbagai tingkat akurasi. Hukum Hooke yang linier dan isotropis-elastis, misalnya, dapat dianggap sebagai hubungan antara tegangan-regangan yang paling sederhana saat ini. Karena model ini hanya terdiri dari dua parameter saja, yaitu *modulus Young* (E) dan angka *Poisson* (ν), maka umumnya *soil* model ini terlalu sederhana untuk dapat meneakup berbagai sifat penting dari perilaku tanah maupun batuan. Meskipun demikian, untuk memodelkan elemen struktural yang masif dan lapisan batuan dasar, model *linier elastis* bisa digunakan dengan *soil model hardening soil*.

Hardening soil model merupakan mode lanjutan untuk mensimulasikan perilaku berbagai jenis tanah. tanah lunak dan tanah kaku, Schanz (1998). Sedangkan untuk model Mohr-Coulomb, batas keadaan tegangan dijelaskan dengan menggunakan sudut gesekan, kohesi dan sudut dilatasi. Namun, kekakuan tanah yang dijelaskan jauh lebih akurat dengan menggunakan tiga kekakuan masukan yang berbeda yaitu *triaxial loading stiffness* (E_{50}), *triaxial unloading/reloading stiffness* (E_{ur}), dan *oedometer loading modulus* (E_{oed}). Berbeda dengan model Mohr-Coulomb, model *Hardening Soil* ini memperhitungkan ketergantungan moduli kekakuan. Hal ini mengartikan bahwa semua kekakuan meningkat dengan tekanan. Oleh karena itu, ketiga kekakuan input berhubungan dengan tegangan referensi, biasanya diambil sebagai 100 kPa (1 Bar). Selain parameter model yang disebutkan di atas, kondisi tanah awal, seperti prakonsolidasi, memainkan peran penting dalam sebagian besar masalah deformasi tanah. Ini dapat diperhitungkan pada generasi stres awal

Hal utama dari formulasi *hardening soil model* adalah hubungan hiperbolik antara *vertical strain* (ε_i), dan *deviatoric stress* (q) pada pembebanan *triaxial primer*. Ketika mengalami pembebanan deviatorik primer, tanah menunjukkan kekakuan yang menurun dan secara simultan *plastic strain yang ireversibel* akan berkembang. Dalam kasus khusus uji *triaxial* yang dikeringkan, hubungan yang terbentuk antara regangan aksial dan tegangan deviatorik dapat diperkirakan dengan baik menggunakan hiperbolik. (Konder & Zelasko 1963). Bagaimanapun jauh sebelumnya, *hardening soil model* telah menggunakan teori plastisitas daripada teori elastisitas, kedua dengan memasukkan dilatasi tanah dan ketiga dengan memperkenalkan *yield cap*. beberapa karakteristik dasar dari model ini adalah :

1. Tegangan yang bergantung pada kekakuan (m)
2. Regangan plastis karena pembebanan deviatorik primer (E_{50}^{ref})
3. Regangan platis karena kompresi primer (E_{oed}^{ref})
4. Pembongaran atau muat ulang elastis (E_{ur}^{ref})
5. keruntuhan sesuai dengan kriteria kegagalan *Mohr-Coulomb* (c, ϕ , dan ψ)

Uji triaxial standar pada umumnya menghasilkan kurva yang dapat dijelaskan dengan persamaan :

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{E_i} \frac{q}{1 - q/q_a} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dengan :

E_i = Modulus elastisitas

q_a = Nilai asimptotik dari kuat geser

q = Tegangan deviatorik

$$E_i = \frac{2E_{50}}{2 - R_f} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dengan :

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

Maka dapat disimpulkan hubungan antara kedua **Persamaan (2.4)** dan **(2.5)** parameternya adalah modulus kekakuan yang bergantung terhadap tegangan yang terkonfirmasi untuk pembebanan primer. Dalam hal kekakuan untuk pembebanan primer, perilaku regangan tegangan untuk pembebanan primer sangatlah non-linear, parameter modulus elastisitas (E_{50}) adalah modulus kekakuan yang tergantung pada tegangan untuk beban primer, modulus elastisitas digunakan sebagai pengganti modulus awal (E_i) untuk regangan kecil yang berfungsi sebagai modulus singgung yang lebih sulit untuk ditentukan secara eksperimental. Hal ini ditunjukkan oleh persamaan :

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos\varphi - \sigma'_3 \sin\varphi}{c \cos\varphi + p^{ref} \sin\varphi} \right)^m \dots\dots\dots(2.6)$$

Dengan :

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

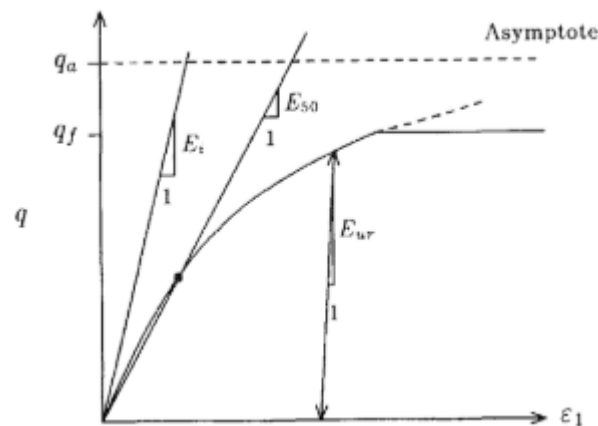
E_{50}^{ref} = *Secant stiffness* pada pengujian *triaxial*

c = Kohesi tanah

φ = Sudut geser tanah

σ'_3 = Tegangan pada uji *triaxial*

E_{50}^{ref} adalah modulus kekakuan referensi yang berhubungan dengan tegangan referensi (p^{ref}). Kekakuan yang sebenarnya tergantung pada tegangan minor (σ'_3), yang merupakan tekanan pengekanan yang efektif dalam tes *triaxial*. Jumlah ketergantungan tegangan diberikan oleh kekuatan m . Untuk mensimulasikan tegangan logaritma, seperti yang diamati untuk tanah lunak, daya harus diambil sama dengan 1.0. Pada **Gambar 2.11** dapat dilihat bagaimana hubungan hiperbolik antara tegangan dan regangan pada pembebanan primer dalam pengujian *triaxial*.



Gambar 2.11 Hubungan hiperbolik antara tegangan dan regangan dalam pengujian *triaxial*.

(Sumber :T.Schanz, 1998)

Sebagai garis potong, modulus ditentukan dari kurva regangan tegangan *triaxial* untuk mobilisasi 50% dari kekuatan geser maksimum.

2.8 Referensi Penelitian Terkait

Dalam memperluas tinjauan pustaka yang dibutuhkan pada penelitian ini maka digunakan beberapa referensi penelitian terdahulu. Dari penelitian tersebut terdapat beberapa inti penting dari teknik konstruksi terowongan yang berkaitan sehingga dapat membantu pengembangan penelitian ini. Berikut adalah penelitian terdahulu berupa jurnal yang terkait dengan penelitian ini.

2.8.1 *Stability Analysis of Shotcrete Supported Crown of NATM Tunnels with Discontinuity Layout Optimization.*

Jurnal dengan judul *Stability Analysis of Shotcrete Supported Crown of NATM Tunnels with Discontinuity Layout Optimization* merupakan penelitian yang ditulis oleh Yiming Zhang yang berasal dari Institute of Continuum Mechanics, Leibniz Universität Hannover, German. Jurnal ini dipublikasikan oleh *Wiley Online Library*.

Pada pembangunan terowongan dengan metode NATM, penelitian ini menjelaskan tentang pentingnya stabilitas *crown* atau bagian atas terowongan yang dibangun pada saat penggalian dan juga berpengaruh besar terhadap keselamatan terowongan itu sendiri maupun bangunan yang ada di atasnya dengan penyiapan geometris terowongan dan sifat material *shotcrete* dan tanah/batu. Jurnal ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas *shotcrete* pendukung *crown* terowongan dengan metode numerik kontinuitas. Optimasi tata letak memperkenalkan sejumlah besar potensi penghentian silang di atas satu sama lain dan menyediakan ruang pencarian yang luas untuk efisien analisis batas atas.

Hasil dari penelitian jurnal ini terdiri dari optimasi tata letak tidak kontinuitas yang meliputi kinematika dan faktor keamanan, batasan kompatibilitas, kendala aturan aliran mengenai kegagalan *Mohr-Coulomb*, pemuatan dan batasan batas, persamaan optimasi. Selain itu juga terdiri dari penelitian implementasi numerik yang meliputi model numerik dan diskretisasi, waktu-ruang-tergantung analisis, pengaruh *setup* terowongan dan sifat material, pengaruh kecepatan penggalian yang semuanya dimodelkan dalam Plaxis 2D.

2.8.2 Evaluasi Numerik Metode Penggalian Terowongan Cisumdawu (*Numerical Evaluation of Cisumdawu Tunnel Excavation Method*).

Jurnal berjudul “Evaluasi Numerik Metode Penggalian Terowongan Cisumdawu (*Numerical Evaluation of Cisumdawu Tunnel Excavation Method*)” ini ditulis oleh Ridwan Umbara, IGde Budi Indrawan, dan Fahmi Aldiamar pada tahun 2019 yang merupakan penelitian gabungan dari Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian PUPR, Departemen Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, dan Pusat Litbang Jalan dan Jembatan. Indonesia.

Jurnal ini menampilkan hasil penelitian yang dilakukan untuk mengevaluasi metode penggalian terowongan Cisumdawu sisi kiri (barat) menggunakan metode numerik. Menggunakan data hasil penyelidikan tapak dalam proses perancangan dan data hasil *face mapping* di delapan stasiun titik amat, penggalian terowongan dengan metode penggalian *bench* ganda (**bench cut multiple**), metode penggalian

seluruh muka bidang galian dengan *bench* tambahan (*full face with bench cut*) dan metode penggalian diafragma tengah (*centre diaphragm*) dimodelkan secara numerik dalam dua dimensi menggunakan metode elemen hingga. Hasil pemodelan numerik dibandingkan dengan hasil pengukuran lapangan untuk menentukan metode penggalian yang paling sesuai diterapkan di terowongan Cisumdawu.

2.8.3 Analisis Pengaruh Penyanggaan pada Deformasi Terowongan di Batuan Lemah pada Pembangunan Double Terowongan Jalur Tol Cisumdawu (Cileunyi – Sumedang – Dawuan), Jawa Barat.

Jurnal ini merupakan penelitian yang dilakukan oleh Nurmaya Putri Ira, Singgih Saptono, dan Metallurgy Corporation of China (MCC) pada tahun 2017 yang merupakan mahasiswa magister Teknik Pertambangan Konsentrasi Geomekhanika UPN “Veteran” Yogyakarta. Penelitian ini meninjau lokasi pembangunan terowongan yang berada di kecamatan Pamulihan, Kabupaten Sumedang, Provinsi Jawa Barat. Penggalian pada terowongan ini menggunakan dua metode, yaitu *cut and cover* dan NATM. Pada pengerjaan terowongan Cisumdawu ini, menggunakan penyangga *steel rib* dan *shotcrete/lining concrete*. Hasil penelitian didapatkan hasil desain penyanggaan untuk terowongan pada batuan lemah (*weak rock*) yang memiliki masalah cukup kompleks.

2.8.4 *Full-face excavation of large tunnels in difficult conditions.*

Jurnal ini ditulis oleh Giovanni Barla yang berasal dari Politecnico di Torino, Torino, Italy. Jurnal penelitian ini membahas mengenai metode penggalian konstruksi dengan metode *full face excavation*. melihat pentingnya stabilitas permukaan, khususnya dengan peningkatan ukuran terowongan dan kedalamannya di bawah permukaan, dan mempromosikan metode permukaan penuh. Dia menyarankan pemahaman dan pengendalian itu perilaku dari "inti" di depan bukaan terowongan yang maju merupakan rahasia sukses *tunneling* dalam kondisi sulit.

2.8.5 Numerical Simulation of Rock Deformation for Support Design in Tunnel Intersection Area.

Jurnal ini ditulis oleh F.Y. Hsiao, C.L. Wang, dan J.C. Chern yang berasal dari Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultant, INC, Taipei, Taiwan, Department of Resource Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan. Jurnal penelitian ini berisi mengenai pembahasan meningkatnya beban pendukung dan deformasi terowongan tambahan dapat membahayakan stabilitas terowongan selama konstruksi di persimpangan akses dan terowongan utama. Untuk memahami perilaku mekanik massa batuan di daerah persimpangan, dilakukan analisis numerik 3D sebanyak 75 kasus dilakukan. Analisis ini dilakukan dalam berbagai kondisi terowongan termasuk kekuatan batuan, peringkat massa batuan, lapisan penutup kedalaman, dan sudut persimpangan.

