



PUSAT PENELITIAN  
DAN PENGEMBANGAN  
**JALAN DAN  
JEMBATAN**

KEMENTERIAN  
PEKERJAAN UMUM

Fahmi Aldiamar, ST, MT, Hardiansyah Putra, ST, MSc.

# Kajian Perilaku deformasi akibat penggalian terowongan





**KAJIAN**  
**Perilaku deformasi akibat penggalian terowongan**



**Fahmi Aldiamar, S.T., M.T, Hardiansyah Putra, S.T., M.Sc.**

## **Perilaku deformasi akibat penggalian terowongan**

Cetakan ke-1, 2013, ( viii + 48 halaman)  
No. ISBN :978-602-72792-7-8

©Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

### **Penulis:**

Fahmi Aldiamar, S.T., M.T, Hardiansyah Putra, S.T., M.Sc.

Buku ini disusun dengan sumber dana APBN Tahun 2013, pada Paket Kerja Naskah Ilmiah Perilaku Deformasi Akibat Penggalian Terowongan.

Pandangan yang disampaikan di dalam publikasi ini tidak menggambarkan pandangan dan kebijakan Kementerian Pekerjaan Umum, unsur pimpinan, maupun instruksi pemerintah lainnya.

Kementerian Pekerjaan Umum tidak menjamin akurasi data yang disampaikan dalam publikasi ini, dan tanggung jawab atas data dan informasi sepenuhnya dipegang oleh penulis.

Kementerian Pekerjaan Umum mendorong percetakan dan memperbanyak informasi secara eksklusif untuk perorangan dan pemanfaatan nonkomersil dengan pemberitahuan yang memadai kepada Kementerian Pekerjaan Umum. Pengguna dibatasi dalam menjual kembali, mendistribusikan atau pekerjaan kreatif turunan untuk tujuan komersil tanpa izin tertulis dari Kementerian Pekerjaan Umum.

### **Dicetak oleh:**

Penerbit Informatika – Bandung  
Anggota IKAPI Jabar No. 033/JBA/99

### **Pemesanan melalui:**

Perpustakaan Puslitbang Jalan dan Jembatan  
[info@pusjatan.pu.go.id](mailto:info@pusjatan.pu.go.id)

# Tentang Puslitbang Jalan dan Jembatan

Puslitbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan) adalah institusi riset yang dikelola oleh Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia. Lembaga ini mendukung Kementerian PU dalam menyelenggarakan jalan dengan memastikan keberlanjutan keahlian, pengembangan inovasi dan nilai-nilai terbaru dalam pengembangan infrastruktur.

Pusjatan memfokuskan kepada penyelenggaraan jalan di Indonesia, melalui penyelenggaraan litbang terapan untuk menghasilkan inovasi teknologi bidang jalan dan jembatan yang bermuara pada standar, pedoman, dan manual. Selain itu, Pusjatan mengemban misi untuk melakukan advis teknis, pendampingan teknologi, dan alih teknologi yang memungkinkan infrastruktur Indonesia menggunakan teknologi yang tepat guna.

## KEANGGOTAAN TIM TEKNIS DAN SUBTIM TEKNIS

### TIM TEKNIS:

1. Prof (R) Dr. Ir. M. Sjahdanulirwan, M.Sc.
2. Ir. Agus Bari Sailendra. M.T.
3. Ir. I. Gede Wayan Samsi Gunarta, M.Appl.Sc.
4. Prof (R). Dr. Ir. Furqon Affandi, M.Sc.
5. Prof (R) Ir. Lanneke Tristanto, APU.
6. Ir. GJW. Fernandez
7. Ir. Soedarmanto Darmonegoro
8. Dr. Djoko Widayat, M.Sc.

### SUBTIM TEKNIS:

1. Ir. GJW Fernandez
2. Dr. Ir. M. Eddie Soenaryo, M.Sc.
3. Dr. Ir. Imam Aschuri, M.T.
4. Dr. Ir. Hindra Mulya
5. Ir. Benny Moestofa
6. Ir. Suhaimi Daud
7. Drs. M. Suherman

# Kata Pengantar

Naskah ilmiah untuk paket kerja perilaku deformasi akibat penggalian terowongan ini disusun untuk memenuhi tugas yang telah diberikan kepada tim pelaksana kegiatan dari Balai Geoteknik Jalan berdasarkan Surat Keputusan Kepala Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan tahun 2013.

Tujuan dari kegiatan ini adalah secara umum menyediakan kajian awal mengenai perilaku deformasi akibat tahapan penggalian terowongan. Tahap-tahap yang dilakukan dalam menyusun naskah ilmiah ini adalah evaluasi menggunakan piranti lunak dan melakukan contoh kasus pemodelan menggunakan data yang didapatkan pada rencana terowongan Cisumdawu.

Bandung, Desember 2013

Penyusun



# DAFTAR ISI

<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>IV</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>VI</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
<b>2 DEFORMASI AKIBAT PENGGALIAN TEROWONGAN</b> .....	<b>3</b>
2.1 Umum .....	3
2.2 Gaya Yang Bekerja Pada Saat Penggalian Terowongan.....	4
2.2.1 Perubahan Tegangan Akibat Penggalian Terowongan.....	4
2.2.2 Displacement pada Area Penggalian.....	7
2.2.3 Area Plastis Akibat Penggalian Terowongan .....	8
2.2.4 Area Plastis /Loosening Zone sebagai Overburden .....	10
2.3 Pengaruh bentuk penampang galian terhadap perilaku deformasi .....	11
2.3.1 Bentuk penampang terowongan .....	11
2.3.2 Perilaku deformasi berdasarkan model numerik .....	13
2.4 Pengaruh muka air tanah terhadap perilaku deformasi.....	14
2.5 Pengaruh tebal lapis penutup (overburden) diatas terowongan.....	15
<b>3 METODE PENGGALIAN DAN PERKUATAN UNTUK MENINGKATKAN STABILITAS MUKA BIDANG GALIAN</b> .....	<b>19</b>
3.1 Metode penggalian .....	19
3.2 Perencanaan sistem perkuatan .....	22

3.3	Evaluasi metode penggalan dan perkuatan tambahan untuk meningkatkan stabilitas muka bidang galian.....	35
<b>4</b>	<b>PENUTUP.....</b>	<b>47</b>
	<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>48</b>



## DAFTAR TABEL

Tabel 2-1. Konsentrasi tegangan menurut persamaan Kirsch (Goodman, 1989) .....	7
Tabel 2-2 Perbandingan Metode pembuatan terowongan (JSCE, 2006).....	16
Tabel 2-3. Parameter model mohr-coloumb (CUR, 1996).....	17
Tabel 3-1. Parameter tanah menggunakan model Mohr-Coulomb .....	37



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Potongan memanjang model axi-simetris 3 dimensi model elemen hingga keruntuhan dan deformasi massa batuan disekitar muka bidang galian terowongan dengan bentuk lingkaran (Everet Hoek, 1998). .....	4
Gambar 2.2. (a) Kondisi tegangan pada kondisi awal (b) Kondisi akibat transfer tegangan (Szechy, 1973) .....	5
Gambar 2.3. Akumulasi tegangan pada permukaan terowongan (Szechy, 1973) ....	6
Gambar 2.4. Perpindahan pada area penggalian terowongan (Goodman, 1989) ....	8
Gambar 2.5. Area plastis dan elastic menurut Bray (Goodman, 1989) .....	8
Gambar 2.6. Pola keruntuhan gradual pada terowongan tanpa penyangga (Szechy, 1973) .....	11
Gambar 2.7 Terowongan persegi dengan dua sel (FHWA, 2005a) .....	12
Gambar 2.8 Terowongan lingkaran (FHWA, 2005a) .....	12
Gambar 2.9 Terowongan berbentuk tapal kuda (horseshoe) dan curvilinear (oval) (FHWA, 2005a) .....	13
Gambar 2.10. Tipikal penampang melintang terowongan jalan 3 lajur (JSCE, 2006) .....	13
Gambar 2.11. Mekanisme tegangan yang bekerja saat terjadi penggalian terowongan .....	14
Gambar 2.12. Perilaku deformasi pada penampang memanjang penggalian terowongan (Awaji, 2013) .....	14
Gambar 2.13 Pengaruh air tanah pada konstruksi terowongan. ....	15
Gambar 2.14. Penurunan permukaan akibat tidak bekerjanya ground arch (Awaji, 2012) .....	16
Gambar 2.15. Geometri model terowongan dengan penampang galian berbentuk lingkaran dan lapisan penutup sebesar 3m .....	17
Gambar 2.16. Pola deformasi pada terowongan dengan penampang galian berbentuk lingkaran dan lapisan penutup sebesar 3m .....	18
Gambar 3.1. Penampang melintang terowongan Cisumdawu (Balai Pelaksanaan Jalan Nasional IV, 2013) .....	36
Gambar 3.2. Stratifikasi tanah pada penampang memanjang terowongan-1 (Balai Pelaksanaan Jalan Nasional IV, 2013) .....	36
Gambar 3.3. Korelasi uji modulus tanah dan uji penetrasi standar (Balai Pelaksanaan Jalan Nasional IV, 2013) .....	37

Gambar 3.4. Tahapan evaluasi perilaku penggalian terowongan .....	38
Gambar 3.5. Kurva metode analitis elastis reaksi tanah/batuan antara tekanan penyokong ( <i>support pressure</i> ) dan perpindahan ( <i>displacement</i> ) (Hoek et al, 1995); Further research by N. Vlachopoulous and M. S. Diederichs, 2009.....	39
Gambar 3.6. Perilaku deformasi model menggunakan pendekatan pendekatan analitis (N. Vlachopoulous and M. S. Diederichs, 2009).....	40
Gambar 3.7. Perilaku perpindahan arah memanjang terowongan .....	41
Gambar 3.8. evaluasi metode penggalian tanpa kekuatan .....	42
Gambar 3.9. Ilustrasi penggunaan forepiling untuk mengurangi tegangan vertikal ( $\sigma_1$ ).....	43
Gambar 3.10. Skema stabilisasi muka bidang galian menggunakan pipe forepiling (JSCE 2006).....	43
Gambar 3.11. Hasil evaluasi perilaku deformasi terowongan dengan stabilisasi muka bidang galian menggunakan <i>pipe forepiling</i> .....	45
Gambar 3.12. Pola deformasi dan gaya-gaya yang bekerja pada perkuatan terowongan .....	46



# 1 Pendahuluan

Terowongan jalan dan lintas bawah adalah bangunan pelengkap jalan yang berfungsi sebagai jalur lalu lintas (Permen PU No 19/PRT/M/2011). Terowongan jalan dan lintas bawah didefinisikan sebagai jalan tertutup dengan akses kendaraan yang dibatasi oleh ukuran penampang portal (AASHTO, 2009). Berdasarkan kegunaannya, terowongan jalan dapat digunakan sebagai alternatif perlintasan tidak sebidang dengan sungai atau melintasi melalui hambatan fisik, seperti pegunungan, jalan eksisting, kereta api atau fasilitas publik lainnya. Selain itu terowongan jalan merupakan alternatif perlintasan yang dapat mengurangi potensi dampak lingkungan seperti kemacetan lalu lintas, pergerakan pejalan kaki, kualitas udara, polusi kebisingan, gangguan visual, melindungi area yang memiliki nilai kultur dan sejarah seperti daerah konservasi, bangunan-bangunan sejarah dan bangunan milik swasta atau untuk pertimbangan menghindari dampak terhadap habitat tertentu di suatu area dan mengurangi gangguan pada permukaan tanah.

Penentuan tipe terowongan merupakan proses yang berulang dengan mempertimbangkan banyak faktor, meliputi kedalaman terowongan, jumlah lajur, tipe tanah/batuan yang dilewati dan ketersediaan metodologi pelaksanaan konstruksi. Sebagai contoh, terowongan dengan 2 lajur pada posisi terowongan dangkal akan lebih sesuai bila menggunakan bentuk lingkaran dengan tipe penggalian dengan mesin bor terowongan (*Tunnel Boring Machine*, TBM). Meski demikian, untuk kebutuhan 4 lajur, mesin bor terowongan membutuhkan luas area yang besar, sehingga terowongan ganda dengan penggalian menggunakan mesin bor terowongan atau metode lain dengan gali dan tutup atau NATM menjadi lebih efisien. Untuk kondisi terowongan yang lebih lebar dan posisi yang lebih dalam, serta kondisi tanah/batuan tertentu, diperlukan metode konstruksi yang berbeda atau diperlukan pembuatan terowongan ganda dengan metode penggalian dan pemasangan sistem penyangga sesuai dengan permasalahan yang dihadapi.

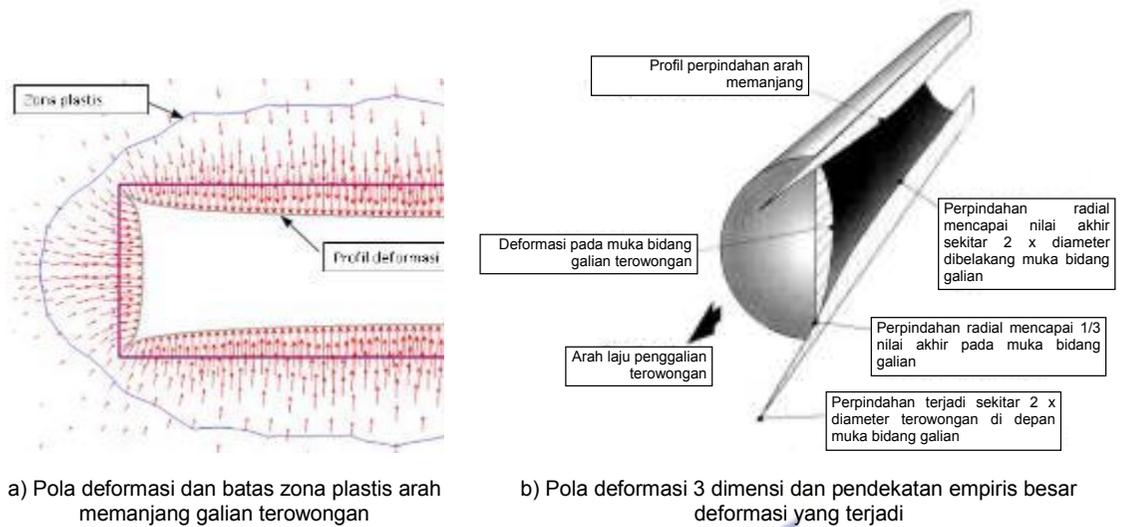
Kondisi geoteknik, seperti sifat tanah atau batuan, muka air tanah, tebal lapis penutup, kontaminasi atau terdapatnya zat-zat berbahaya disepanjang alinyemen terowongan, utilitas dibawah tanah, dan halangan seperti batu besar atau benda yang tertanam serta terdapatnya fasilitas permukaan harus dipertimbangkan ketika mengevaluasi pemilihan alinyemen terowongan. Alinyemen terowongan terkadang diubah didasarkan pada hasil penyelidikan geoteknik dengan tujuan untuk mengurangi biaya konstruksi dan mengurangi resiko. Alinyemen terowongan dapat pula di atur agar meningkatkan kemampuan untuk dilaksanakan atau mengakomodasi teknologi konstruksi selama tidak membahayakan persyaratan geometri jalan. Bila pemilihan trase terbatas, pengukuran/pengujian untuk mendapatkan metode konstruksi yang sesuai dan perbaikan tanah/batuan yang diperlukan pada saat penggalian harus dilakukan. Direkomendasikan untuk melakukan penyelidikan geoteknik pada tahap awal perencanaan proyek. Penyelidikan harus mengakomodasi sifat tanah dan batuan serta perilakunya saat dilakukan penggalian. Sebagai contoh, untuk metode NATM, waktu penyanggaan sendiri (*standup time*) sangatlah penting dalam menentukan kecepatan pemasangan penyangga dan metode penggalian. Bila waktu penyanggaan sendiri terbatas, maka sistem penyangga awal (*pre-support*) atau peningkatan kekuatan massa tanah/batuan harus dilakukan sebelum penggalian.

Adanya ruang kosong akibat proses penggalian pada terowongan menyebabkan penurunan gaya penahan pada batuan dan menciptakan area yang mengalami perpindahan secara plastis (*plastic zone*). Hal ini mengakibatkan butir-butir pada tanah/batuan menjadi lebih renggang dan menyebabkan kemampuan tanah/batuan untuk menyangga dirinya menjadi menurun. Untuk terowongan yang cukup dalam, beban yang diterima oleh terowongan bukan merupakan seluruh beban lapisan tanah/batuan diatas terowongan (*overburden*), tetapi beban lapisan yang berada pada wilayah plastis atau pada area *loosening zone*. Pada tahap perencanaan, penentuan waktu pemasangan penyangga atau optimalisasi pemasangan penyangga berdasarkan kapasitas perpindahan (*displacement*) sangatlah penting (N. Vlachopoulos dan M. S. Diederichs, 2009). Oleh karenanya, evaluasi perilaku kestabilan penggalian terowongan umumnya didasarkan oleh kriteria perpindahan atau deformasi pada penampang melintang dan memanjang terowongan.

## 2 Deformasi akibat penggalian terowongan

### 2.1 Umum

Deformasi adalah perubahan bentuk, dimensi dan posisi dari suatu materi baik merupakan bagian dari alam ataupun buatan [Andreas.2007]. Evaluasi deformasi saat penggalian terowongan dilakukan berfungsi untuk memprediksi posisi/bagian penggalian yang mengalami penurunan daya dukung. Gambar 2.1 memperlihatkan contoh hasil evaluasi metode elemen hingga 3 dimensi berupa deformasi dan keruntuhan massa batuan disekitar terowongan berbentuk lingkaran pada batuan lemah. Hasil evaluasi yang dilakukan oleh Everet Hoek (1998) menunjukkan vektor perpindahan pada massa batuan, bentuk profil terowongan yang berdeformasi dan bentuk zona plastis sekitar terowongan. Berdasarkan hasil evaluasi Everet Hoek (1998) deformasi elastis untuk massa batuan dimulai sekitar 2x diameter terowongan didepan muka bidang galian dan mencapai nilai maksimum pada 2x diameter dibelakang muka bidang galian. Pada muka bidang galian, sekitar 1/3 dari total penutupan radial terowongan terjadi dan muka bidang galian berdeformasi seperti diperlihatkan pada Gambar 2.1. Deformasi tersebut diasumsikan terjadi segera setelah penggalian pada muka bidang galian dilakukan. Efek waktu terhadap deformasi dan perencanaan penyangga tidak dibahas pada evaluasi Everet Hoek (1998) dikarenakan model konstitutif yang digunakan adalah linear elastik.



Gambar 2.1. Potongan memanjang model axi-simetris 3 dimensi model elemen hingga keruntuhan dan deformasi massa batuan disekitar muka bidang galian terowongan dengan bentuk lingkaran (Everet Hoek, 1998).

## 2.2 Gaya Yang Bekerja Pada Saat Penggalian Terowongan

Penggalian terowongan pada massa tanah/batuan mengakibatkan terjadinya perubahan kondisi tegangan dan terjadinya perpindahan (*displacement*) di area galian tersebut. Selain itu penurunan tegangan tanah/batuan di area penggalian akibat menghilangnya gaya penahan yang bersifat mengurangi stabilitas pada waktu penggalian.

### 2.2.1 Perubahan Tegangan Akibat Penggalian Terowongan

Tegangan vertikal pada penampang tanah/batuan merupakan fungsi kedalaman. Dengan mengetahui tegangan vertikal pada suatu titik, dapat dihitung tegangan horizontal titik tersebut melalui hubungan rasio Poisson. Hubungan tegangan ini dirumuskan dengan :

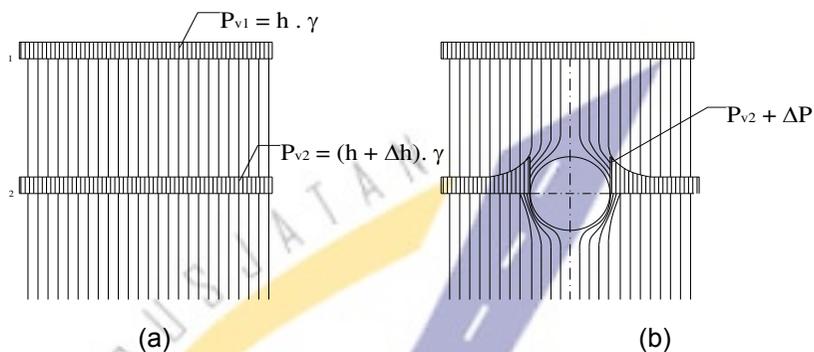
$$\sigma_v = \gamma \cdot h \quad (1.1)$$

$$\sigma_h = \sigma_v \cdot \mu / (1 - \mu) \quad (1.2)$$

$\sigma_v$  = tegangan vertikal (KN/m<sup>2</sup>)

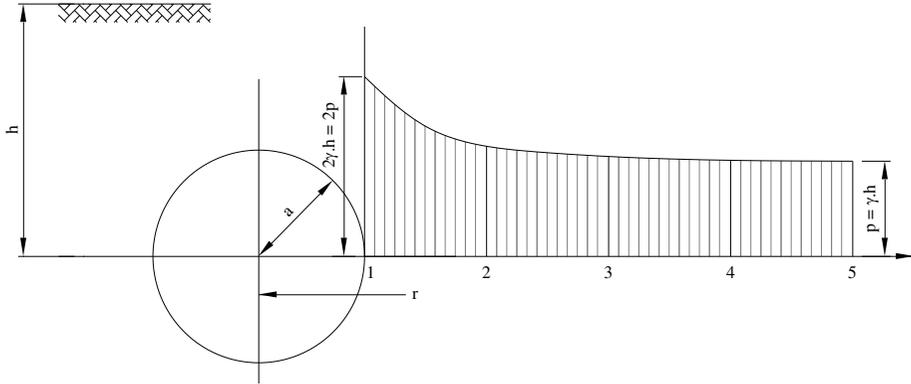
- $\sigma_h$  = tegangan horizontal (KN/m<sup>2</sup>)
- $\gamma$  = massa jenis tanah/batuan (KN/m<sup>3</sup>)
- $h$  = kedalaman (m)
- $\mu$  = rasio Poisson

Gambar 2.2.a. memperlihatkan kondisi awal tegangan vertikal bernilai seragam di tiap titik dengan kedalaman yang sama. Jika pada lokasi tersebut dilakukan penggalian terowongan seperti pada Gambar 2.2.b, tegangan dari massa yang digali akan dialihkan/ditransfer ke sisi terowongan Mindlin (1939). Akibat transfer tegangan ini, terjadi akumulasi tegangan di muka galian terowongan.



Gambar 2.2. (a) Kondisi tegangan pada kondisi awal (b) Kondisi akibat transfer tegangan (Szechy, 1973)

Akumulasi tegangan ini bernilai maksimum di sisi galian (*spring line*), dengan nilai dua kali tegangan awal. Jarak titik tinjau dari pusat galian adalah  $r$  dan  $a$  adalah jari-jari terowongan (lihat Gambar 2.3). Tegangan maksimum berada pada lokasi  $r/a = 1$ . Tegangan tersebut berkurang secara proporsional terhadap pertambahan jarak, kemudian menjadi konstan sebesar nilai awal pada lokasi kurang lebih  $r/a = 4$  dari pusat galian terowongan.



Gambar 2.3. Akumulasi tegangan pada permukaan terowongan (Szechy, 1973)

Tegangan-tegangan pada permukaan galian dapat diuraikan sebagai berikut:

- Tegangan radial ( $\sigma_r$ ) yang searah radius
- Tegangan tangensial ( $\sigma_t$ ) yang tegak lurus terhadap radial
- Tegangan geser ( $\tau_{rt}$ ), hasil interaksi dari  $\sigma_r$  dan  $\sigma_t$

Kirsch menurunkan rumus untuk masing-masing tegangan di atas sebagai berikut:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_v}{2} \left[ (1+\lambda) \left[ 1 - \frac{a^2}{r^2} \right] + (1-\lambda) \left[ 1 + 3 \frac{a^4}{r^4} + 4 \frac{a^4}{r^2} \right] \cos 2\phi \right] \quad (1.3)$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_v}{2} \left[ (1+\lambda) \left[ 1 - \frac{a^2}{r^2} \right] - (1-\lambda) \left[ 1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right] \cos 2\phi \right] \quad (1.4)$$

$$\tau_{rt} = -\frac{P_v}{2} \left[ (1-\lambda) \left[ 1 - 3 \frac{a^4}{r^4} + 2 \frac{a^2}{r^2} \right] \sin 2\phi \right] \quad (1.5)$$

Dimana:

$\sigma_v = \gamma \cdot h =$  tekanan vertikal (KN/m<sup>2</sup>)

$\lambda = \frac{P_v}{P_h} =$  angka Poisson

$a =$  radius galian terowongan (m)

$\phi =$  sudut tinjau (derajat,  $\phi = 0^\circ$  pada puncak,  $\phi = 90^\circ$  pada dinding terowongan).

Kirsch memberikan tabel secara lengkap untuk nilai konsentrasi tegangan pada berbagai kondisi seperti diperlihatkan pada Tabel 2-1:

Tabel 2-1. Konsentrasi tegangan menurut persamaan Kirsch (Goodman, 1989)

$\sigma_h/\sigma_v$	0		0.3		0.6		1.0	1.5		2.0		3.0	
$\theta$	0°	90°	0°	90°	0°	90°	All $\theta$ Values	0°	90°	0°	90°	0°	90°
r/a													
1.00	-1.00	3.00	-0.10	2.70	0.80	2.40	2.00	3.50	1.50	5.00	1.00	8.00	0.00
1.10	-0.61	2.44	0.12	2.25	0.85	2.07	1.83	3.05	1.52	4.26	1.22	6.70	0.60
1.20	-0.38	2.07	-0.25	1.96	0.87	1.84	1.69	2.73	1.51	3.77	1.32	5.84	0.94
1.30	-0.23	1.82	-0.32	1.75	0.86	1.68	1.59	2.50	1.48	3.41	1.36	5.23	1.13
1.40	-0.14	1.65	0.36	1.60	0.85	1.56	1.51	2.33	1.44	3.16	1.37	4.80	1.24
1.50	-0.07	1.52	0.38	1.50	0.84	1.47	1.44	2.20	1.41	2.96	1.37	4.48	1.30
1.75	0.00	1.32	0.40	1.32	0.80	1.33	1.33	1.99	1.33	2.81	1.36	3.97	1.33
2.00	+0.03	1.22	0.40	1.23	0.76	1.24	1.25	1.86	1.27	2.47	1.28	3.69	1.31
2.50	+0.04	1.12	0.38	1.13	0.71	1.14	1.16	1.72	1.18	2.28	1.20	3.40	1.24
3.00	+0.04	1.07	0.36	1.09	0.68	1.10	1.11	1.65	1.13	2.19	1.15	3.26	1.19
4.00	+0.03	1.04	0.34	1.04	0.65	1.05	1.06	1.58	1.08	2.10	1.09	3.14	1.11

## 2.2.2 Displacement pada Area Penggalan

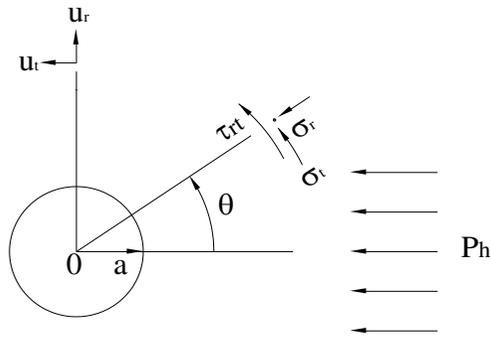
Hilangnya gaya penahan akibat penggalan mengakibatkan terjadinya perpindahan dengan pola tertentu terhadap arah radial dan tangensial pada batuan. Besarnya perpindahan dipengaruhi oleh kombinasi nilai gaya vertikal dan horizontal serta properti dari batuan. Persamaan perpindahan tersebut adalah sebagai berikut :

$$u_r = \frac{\sigma_h + \sigma_v}{4G} \frac{a^2}{r} + \frac{\sigma_h - \sigma_v}{4G} \frac{a^2}{r} \left( 4(1-\nu) - \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\phi \quad (1.6)$$

$$u_t = -\frac{\sigma_h - \sigma_v}{4G} \frac{a^2}{r^2} \left( 2(1-2\nu) + \frac{a^2}{r^2} \right) \sin 2\phi \quad (1.7)$$

dimana: G = Modulus Geser (KN/m<sup>2</sup>)

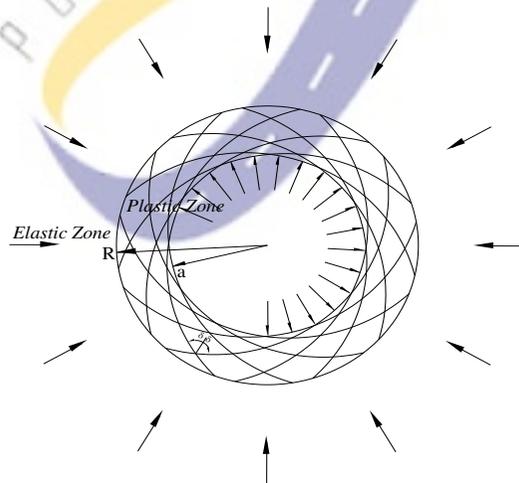
ν = Rasio Poisson



Gambar 2.4. Perpindahan pada area penggalian terowongan (Goodman, 1989)

### 2.2.3 Area Plastis Akibat Penggalian Terowongan

Perlemahan akibat penggalian merupakan area plastis (*plastic zone*) yang terbentuk dan mempunyai jari-jari  $R$  dari pusat penggalian. Area plastis ini merupakan sebuah *slab beam* yang melingkar dan paralel dengan permukaan penggalian (*ring crack*) seperti diperlihatkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Area plastis dan elastic menurut Bray (Goodman, 1989)

Retakan yang terjadi berbentuk log spiral yang mempunyai sudut  $\delta$  terhadap arah radial (Goodman, 1989). Untuk nilai  $\delta$  minimum diambil  $45^\circ + \frac{\phi}{2}$ . Parameter Q yang

digunakan untuk perhitungan sudut log spiral adalah:

$$Q = \frac{\tan \delta}{\tan(\delta - \phi)} - 1 \quad (1.8)$$

Radius batas area elastis-plastis dirumuskan dengan:

$$R = a \left( \frac{2p - q_u + \left(1 + \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) c \cot \phi\right)}{\left(1 + \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) (p_i + c \cot \phi)\right)} \right)^{1/Q} \quad (1.9)$$

Dimana:  $a$  = jari-jari terowongan

$p$  = *initial rock pressure* =  $\sigma_v = \sigma_h$  untuk  $K = 1$

$q_u$  = *unconfined compressive strength*

$p_i$  = *internal pressure* dalam galian yang dapat ditahan penyangga

$\phi$  = sudut geser batuan

Selanjutnya Bray menentukan nilai-nilai tegangan pada area elastis maupun area plastis sebagai berikut :

$$\sigma_r^e = p - \frac{b}{r^2} \quad (1.10)$$

$$\sigma_t^e = p + \frac{b}{r^2} \quad (1.11)$$

$$\text{Dimana: } b = \left( \frac{\tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) p + q_u}{\tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) + 1} \right) R^2$$

Untuk area plastis, nilai tegangan-tegangan adalah:

$$\sigma_r^p = (p_i + c \cot \phi) \left( \frac{r}{a} \right)^Q - c \cot \phi \quad (1.12)$$

$$\sigma_t^p = (p_i + c \cot \phi) \frac{\tan \delta}{\tan(\delta - \phi)} \left( \frac{r}{a} \right)^Q - c \cot \phi \quad (1.13)$$

Pada area plastis, *displacement* yang terjadi mempunyai arah radial terhadap permukaan galian (*inward radially*). Besarnya *displacement* ini dirumuskan dengan :

$$u_r = \frac{1-\nu}{E} \left( p_i \frac{r^{(Q-1)}}{a^Q} - p_r \right) + \frac{t}{r} \quad (1.14)$$

dimana:

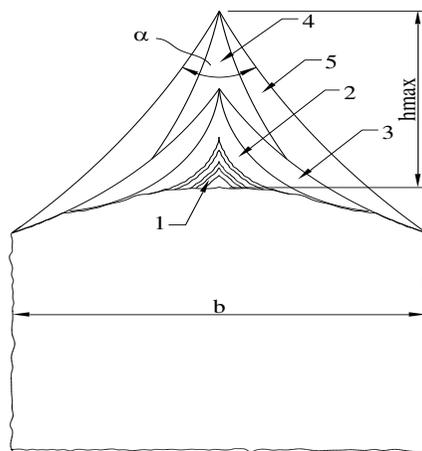
$$t = \frac{1-\nu}{E} R^2 \left[ (p+c \cot \phi) - (p_i+c \cot \phi) \left( \frac{R}{a} \right)^Q \right] + \frac{1+\nu}{E} b$$

#### 2.2.4 Area Plastis /Loosening Zone sebagai Overburden

Adanya ruang kosong pada terowongan menyebabkan penurunan gaya penahan pada batuan dan tercipta area untuk perpindahan secara plastis (*plastic zone*). Hal ini mengakibatkan butir-butir pada batuan menjadi lebih renggang dan menyebabkan tegangan batuan menurun. Untuk terowongan yang cukup dalam, beban yang diterima oleh terowongan bukan merupakan seluruh beban *overburden* yang ada di atas terowongan, tetapi wilayah plastis berupa area *loosening zone*.

Ilustrasi *loosening zone* sebagai beban tampak pada keruntuhan atap terowongan yang cukup dalam yang digali tanpa penyangga seperti diperlihatkan pada Gambar 2.6. Keruntuhan ini terjadi secara gradual, tidak mencapai permukaan tanah di atas terowongan dan membentuk kerucut pada atap terowongan yang biasanya terlihat pada kasus terowongan alam. Tinggi maksimal kerucut keruntuhan ditentukan dengan pendekatan:

$$h_{\max} = \frac{b}{2 \tan \alpha/2} = \frac{b}{2 \sin \phi} \quad (II.15)$$



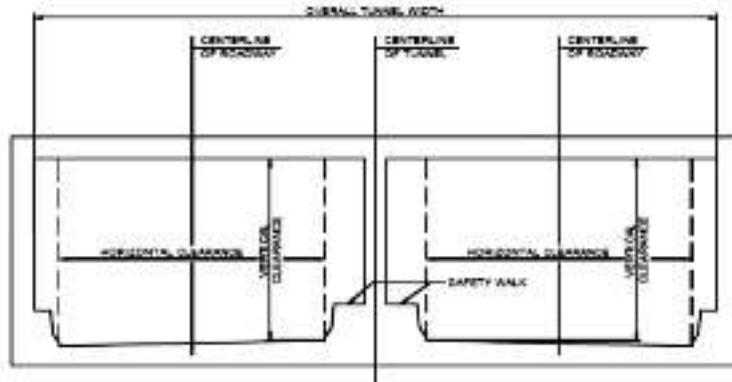
Gambar 2.6. Pola keruntuhan gradual pada terowongan tanpa penyangga (Szechy, 1973)

## 2.3 Pengaruh bentuk penampang galian terhadap perilaku deformasi

### 2.3.1 Bentuk penampang terowongan

Berdasarkan FHWA (2009), terdapat 3 (tiga) bentuk utama untuk terowongan jalan, yaitu lingkaran, persegi, dan tapal kuda atau curvilinear. Bentuk terowongan sebagian besar tergantung pada metode yang digunakan untuk membangun terowongan dan pada kondisi tanah/batuan. Misalnya, terowongan persegi (Gambar 2.7) sering digunakan baik dalam pembangunan terowongan dengan metode tutup-dan-gali, metode *immersed*, maupun dengan metode dongkrak (*jacked box tunneling*). Terowongan dengan penampang melintang lingkaran (Gambar 2.8) umumnya digunakan dalam pembangunan terowongan yang menggunakan mesin pengeboran terowongan (*tunnel boring machine*, TBM) atau pengeboran-dan-peledakan di media batuan. Terowongan berbentuk tapal kuda (*horseshoe*) atau *curvilinear* (Gambar 2.9) umumnya dibangun menggunakan pengeboran-dan-peledakan di media batuan atau menggunakan Metode Penggalian Berurutan (*Sequential Excavation Method*, SEM), yang dikenal juga sebagai *New Austrian Tunneling Method* (NATM). Selain itu, terowongan penampang berbentuk tapal kuda

dengan menggunakan pelengkung pada bagian dasar terowongan umum digunakan pada standar spesifikasi untuk terowongan pegunungan yang diterbitkan oleh JSCE (2007) seperti diperlihatkan pada Gambar 2.10.

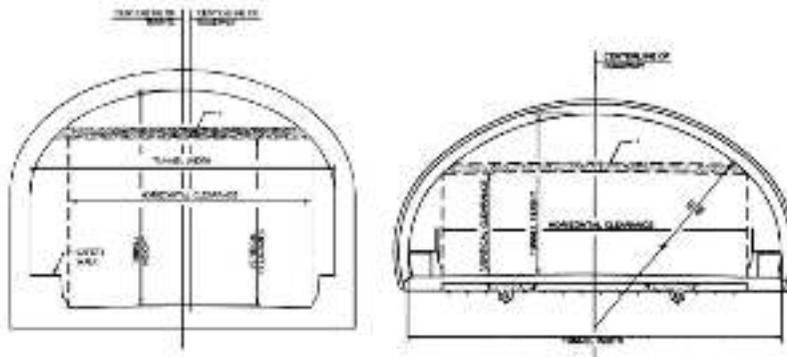


Gambar 2.7 Terowongan persegi dengan dua sel (FHWA, 2005a)



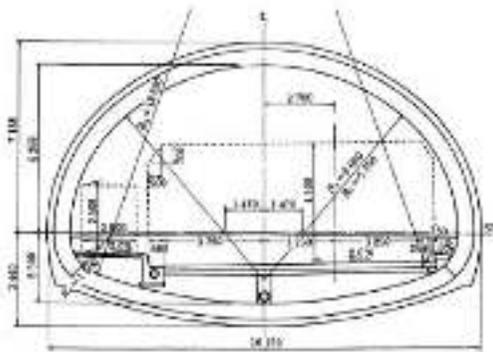
\*Pelat langit-langit alternatif yang menyediakan ruang untuk air plenum dan utilitas di atas

Gambar 2.8 Terowongan lingkaran (FHWA, 2005a)



\*Pelat langit-langit alternatif yang menyediakan ruang untuk air plenum dan utilitas di atas

Gambar 2.9 Terowongan berbentuk tapal kuda (horseshoe) dan curvilinear (oval) (FHWA, 2005a)

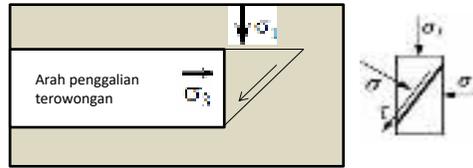


Gambar 2.10. Tipikal penampang melintang terowongan jalan 3 lajur (JSCE, 2006)

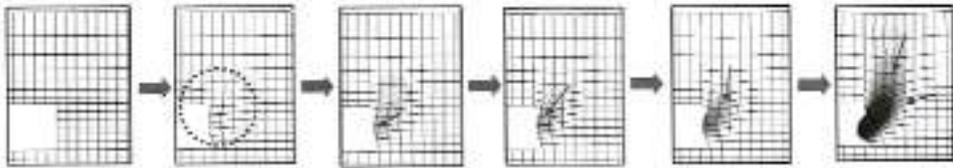
### 2.3.2 Perilaku deformasi berdasarkan model numerik

Pada tahap perencanaan, penentuan waktu pemasangan penyangga atau optimalisasi pemasangan penyangga berdasarkan kapasitas perpindahan (*displacement*) sangatlah penting (N. Vlachopoulos dan M. S. Diederichs, 2009). Oleh karenanya, pembuatan prediksi profil perpindahan pada penampang memanjang terowongan diperlukan sebagai tahap awal identifikasi perilaku terowongan saat dilakukan penggalian tanpa perkuatan. Pada saat terowongan digali, konsep mekanika tanah/bautan yang berlaku secara sederhana dapat dilihat pada Gambar 2.11. Penggalian terowongan mengakibatkan pengurangan  $\sigma_3$  pada muka bidang galian yang mengakibatkan terjadinya ketidakstabilan. Dalam model

numerik, mekanisme ketidakstabilan tersebut dapat terlihat oleh besarnya deformasi yang terjadi pada muka bidang galian seperti diperlihatkan pada Gambar 2.12.



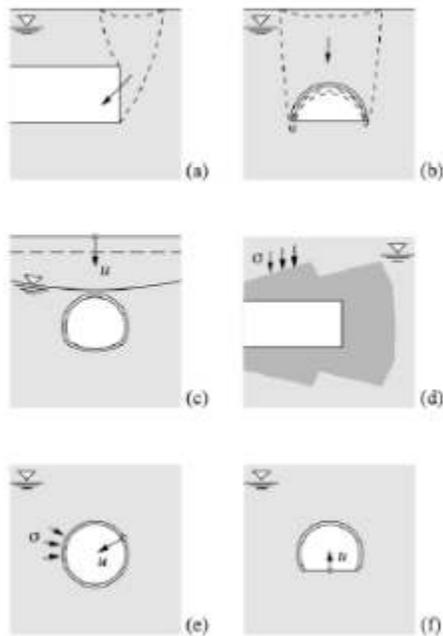
Gambar 2.11. Mekanisme tegangan yang bekerja saat terjadi penggalian terowongan



Gambar 2.12. Perilaku deformasi pada penampang memanjang penggalian terowongan (Awaji, 2013)

## 2.4 Pengaruh muka air tanah terhadap perilaku deformasi

Air tanah dapat mempengaruhi stabilitas dan deformasi pada saat dilakukan penggalian pada terowongan. Dengan meningkatnya tekanan air pori saat penggalian dilakukan, maka gaya yang bekerja pada area galian menjadi semakin besar dan tahanan tanah/batuan menjadi berkurang. Pengaruh air tanah terhadap penggalian terowongan dapat dilihat pada Gambar 2.13. Pada Gambar 2.13a terlihat ketidakstabilan terowongan arah longitudinal disebabkan infiltrasi air pada muka bidang galian. Pada Gambar 2.13b terlihat ketidakstabilan pada atap terowongan disebabkan pelunakan kondisi tanah/batuan oleh air. Pada Gambar 2.13c terlihat ketidakstabilan karena subsidence yang disebabkan oleh perubahan elevasi muka air. Pada Gambar 2.13d pengaruh air tanah dapat meningkatkan tegangan berlebih pada daerah grouting di zona sesar. Pada Gambar 2.13e air tanah dapat mengakibatkan squeezing pressure atau deformasi akibat tegangan air pori tinggi. Pada Gambar 2.13f terlihat permasalahan ketidakstabilan pada lantai/*invert*.



Gambar 2.13 Pengaruh air tanah pada konstruksi terowongan.

## 2.5 Pengaruh tebal lapis penutup (overburden) diatas terowongan

Untuk kondisi dimana terowongan dibangun dekat ke permukaan, maka permasalahan stabilitas dan penurunan permukaan menjadi pertimbangan yang harus diperhatikan. Hal ini dikarenakan semakin dekat ke permukaan, umumnya ditemui kondisi tanah lunak dan *ground arch* tidak dapat diharapkan seperti diperlihatkan pada ilustrasi Gambar 2.14. Selain itu pengaruh muka air tanah dan beban-beban yang bekerja di permukaan akan berpengaruh langsung pada proses konstruksi terowongan. Hal tersebut yang menjadi dasar disyaratkannya batas minimum tinggi lapisan penutup pada standard Jepang seperti diperlihatkan pada Tabel 2-2.



Gambar 2.14. Penurunan permukaan akibat tidak bekerjanya ground arch (Awaji, 2012)

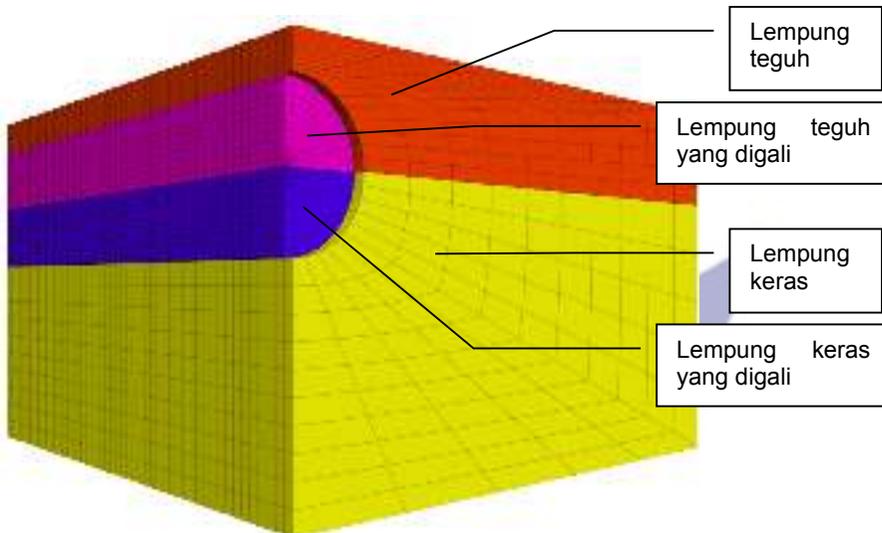
Tabel 2-2 Perbandingan Metode pembuatan terowongan (JSCE, 2006)

Uraian	Metode Terowongan Pegunungan	Metode Terowongan Perisai	Metode Terowongan Cut and Cover
Kedalaman Terowongan	Ketika overburden kurang dari 2 kali diameter pada tanah unconsolidated, diperlukan perkuatan untuk menahan penurunan yang terjadi .	Minimum tinggi overburden adalah $\frac{1}{2}$ dari diameter perisai pada kasus dimana perisai slurry atau metode pneumatic, menyebabkan terjadinya semburan. Kedalaman maksimum biasanya ditentukan oleh keadaan tekanan air	Tidak ada batasan tinggi minimum overburden . akan tetapi maksimum kedalaman terowongan sedalam 40 m

Untuk mendapatkan ilustrasi permasalahan stabilitas dan deformasi pada kondisi terowongan dengan lapisan penutup dangkal dan lokasi penggalian berada pada 2 kondisi lapisan yang memiliki konsistensi berbeda (lapisan tanah lempung teguh dan lempung keras), maka dilakukan pemodelan pada terowongan dengan penampang lingkaran dengan diameter 12m dan tebal lapis penutup 3m ( $\frac{1}{4}$  diameter terowongan). Parameter tanah yang digunakan merupakan parameter yang didapatkan dari korelasi empiris dengan model mohr-coloumb seperti diperlihatkan pada Tabel 2-3, sedangkan model geometri terowongan dapat dilihat pada Gambar 2.15.

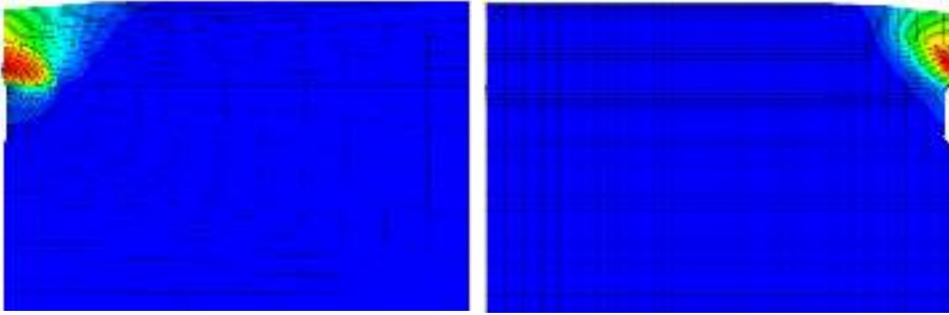
Tabel 2-3. Parameter model mohr-coloumb (CUR, 1996)

Lapisan	Modulus youngs, E	Kohesi, C	Sudut geser dalam, $\phi$	rasio poisson, $\nu$	Bulk modulus $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$	Shear modulus, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$	Tension modulus $T \leq \frac{C}{\tan \phi}$
	kPa	Kpa	°				
Lempung teguh	1,000	5	20	0.3	8.33E+02	3.85E+02	1.37E+01
Lempung keras	5,000	20	25	0.3	4.17E+03	1.92E+03	4.29E+01



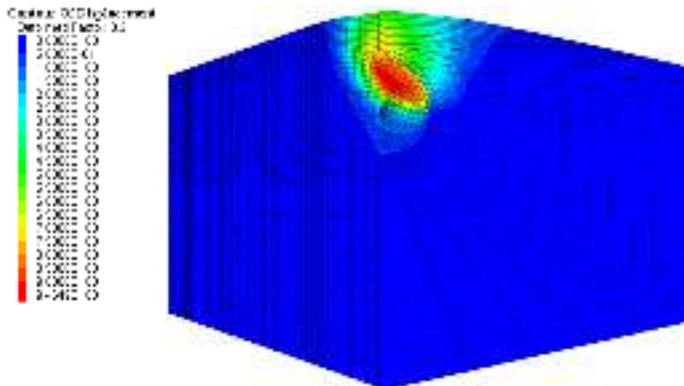
Gambar 2.15. Geometri model terowongan dengan penampang galian berbentuk lingkaran dan lapisan penutup sebesar 3m

Hasil pemodelan menunjukkan penggalian tahap 1 (penggalian hingga -1.0m) mengakibatkan model mengalami keruntuhan dengan pola keruntuhan diperlihatkan pada Gambar 2.16. Keruntuhan terjadi pada batas peralihan antara lapisan lempung teguh dan lempung keras. Hal ini secara tidak langsung menunjukkan, pada kondisi dimana terowongan dibangun dekat ke permukaan tanah, stabilitas atap dan muka bidang galian menjadi kunci dalam menentukan metode konstruksi dan perkuatan yang diperlukan. Metode yang mengedepankan sistem perkuatan sebelum penggalian (*pre-support method*) dapat menjadi salah satu solusi untuk permasalahan tersebut.



a) Tampak depan

b) Tampak samping



c) Tampak 3D

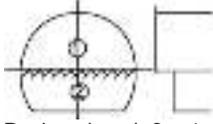
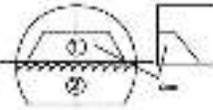
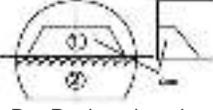
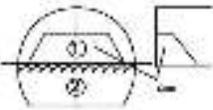
Gambar 2.16. Pola deformasi pada terowongan dengan penampang galian berbentuk lingkaran dan lapisan penutup sebesar 3m

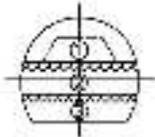
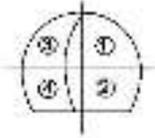
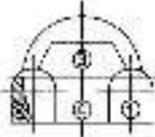
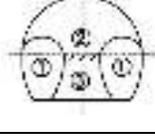
### **3 Metode penggalian dan perkuatan untuk meningkatkan stabilitas muka bidang galian**

#### **3.1 Metode penggalian**

Metode penggalian dipilih dengan mempertimbangkan kondisi tanah/batuan, bentuk dan ukuran penampang penggalian, metode penerowongan yang digunakan (*tunnel driving method*) dan juga dampaknya pada struktur dan lingkungan sekitarnya. Untuk kondisi dimana lapisan penutup dangkal atau kondisi tanah dengan daya dukung rendah dan batuan dengan rekahan yang dipengaruhi oleh struktur geologi, umumnya kondisi stabilitas muka galian kerja tidak begitu bagus dan metode-metode penggalian selain metode penggalian seluruh muka dapat diterapkan. Dengan penggalian yang dilakukan secara bertahap, diharapkan distribusi tekanan tanah tidak terkonsentrasi dan terdistribusi menjadi lebih merata, serta dapat mencegah terjadinya deformasi yang berlebihan. Dengan adanya kemungkinan kondisi media yang bervariasi, kombinasi metode penerowongan seperti metode pengeboran dan peledakan dengan metode penggalian mekanis (*road header, breaker, ekskavator*) dapat diterapkan. Dengan metode-metode tersebut, perubahan dan penyesuaian akan lebih mudah dan memungkinkan untuk dilakukan.

Tabel 4-20 Klasifikasi dan karakteristik metode penggalian (JSCE, 2006)

Metode penggalian	Pembagian muka bidang galian	Kondisi media yang sesuai	Kelebihan	Kekurangan
Penggalian seluruh muka bidang galian dengan bench tambahan	 Panjang bench 2m-4m	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Media tanah/batuan yang stabil, tetapi sulit untuk dilakukan penggalian seluruh muka bidang galian</li> <li>• Media tanah/batuan yang bagus tapi diselingi dengan media yang buruk</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hemat tenaga kerja karena penggalian bagian atas dan bawah dilakukan secara mekanis dan paralel</li> <li>• Manajemen konstruksi termasuk pengendalian keamanan lebih mudah karena penggalian muka galian dilakukan bertahap</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jika muka galian menjadi tidak stabil, sulit untuk mengganti dengan metode penggalian lainnya.</li> </ul>
Metode penggalian dengan bench panjang	 Panjang bench > 5D	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Media yang cukup stabil, tetapi metode seluruh muka bidang galian sulit untuk dilakukan</li> <li>• Metode penggalian cincin (<i>ring cut</i>) diterapkan jika muka galian tidak stabil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Penggalian bagian atas <i>heading</i> dan <i>bench</i> yang dilakukan bergantian dapat mengurangi penggunaan peralatan dan tenaga kerja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Penggalian yang bergantian akan memperpanjang masa konstruksi</li> </ul>
Metode penggalian dengan bench pendek	 D < Panjang bench < 5D	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metode penggalian cincin (<i>ring cut</i>) diterapkan jika muka galian tidak stabil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dapat beradaptasi dengan perubahan kondisi media</li> <li>• Penggalian bagian atas <i>heading</i> dan <i>bench</i> yang bergantian mengurangi penggunaan peralatan dan tenaga kerja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Penggalian paralel menyulitkan untuk menyeimbangkan siklus konstruksi <i>heading</i> dan <i>bench</i></li> <li>• Penggalian yang bergantian akan memperpanjang masa konstruksi</li> </ul>
Metode penggalian dengan bench kecil	 Panjang bench < 5D	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jika diperlukan pengendalian konvergensi</li> <li>• <i>Squeezing ground</i> yang memerlukan penutupan dini dari penampang penggalian</li> <li>• Metode penggalian cincin (<i>ring cut</i>) diterapkan jika muka galian tidak stabil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Penutupan (<i>closure</i>) lebih awal dengan memasang rantai kerja mudah untuk dilakukan</li> <li>• Penggalian bagian atas <i>heading</i> dan <i>bench</i> yang bergantian mengurangi penggunaan peralatan dan tenaga kerja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pemilihan peralatan konstruksi cenderung menjadi terbatas jika direncanakan untuk bekerja pada dasar <i>heading</i> bagian atas</li> </ul>

Metode penggalian	Pembagian muka bidang galian	Kondisi media yang sesuai	Kelebihan	Kekurangan
Metode penggalian dengan bench ganda		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Media yang cukup bagus untuk terowongan dengan penampang yang tinggi dan besar</li> <li>• Media yang buruk dan memerlukan bagian kecil heading untuk menstabilkan muka galian</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muka galian dapat dengan mudah distabilisasi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformasi yang besar dapat terjadi jika pengakhiran penggalian ditunda pada media yang buruk</li> <li>• Panjang setiap <i>bench</i> terbatas dan daerah kerja juga terbatas</li> <li>• Diperlukan pelaksanaan dengan hati-hati terhadap pembuangan material pada setiap <i>bench</i></li> </ul>
Metode diafragma tengah		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Media tanah dengan lapisan penutup yang tipis, di mana penurunan permukaan tanah di atasnya harus dijaga seminimum mungkin</li> <li>• Media yang relatif buruk untuk terowongan dengan penampang yang besar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muka galian distabilisasi dengan membagi menjadi beberapa penampang kecil</li> <li>• Penurunan permukaan tanah dapat dikurangi</li> <li>• Penampang muka galian yang terbagi lebih besar daripada yang menggunakan metode penggalian samping, dan peralatan yang lebih besar dapat digunakan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pergerakan atau penurunan akibat pencabutan diafragma harus diperiksa</li> <li>• Pencabutan diafragma ditambahkan dalam proses konstruksi</li> <li>• Adopsi metode tambahan khusus sulit dilakukan</li> </ul>
Metode penggalian samping dengan dinding beton		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Media dengan kapasitas daya dukung yang tidak mencukupi dan harus ditingkatkan sebelum penggalian heading atas</li> <li>• Media batuan lunak atau media tanah dengan lapisan penutup yang tipis, di mana tekanan tanah tidak simetris dan longsor diantisipasi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Secara keseluruhan dinding beton masif untuk penggalian samping meningkatkan kapasitas daya dukung dan memperkuat ketahanan terhadap tekanan tanah tidak simetris</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peralatan kecil harus digunakan untuk penggalian samping</li> <li>• Tanah/batuan di bagian atas akan berkurang ikatannya (longgar) akibat penggalian samping</li> </ul>
Metode penggalian samping tanpa dinding beton		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Media dengan kapasitas daya dukung tidak memadai untuk menerapkan metode bench cut</li> <li>• Media tanah dengan lapisan penutup yang tipis, di mana penurunan permukaan tanah di atasnya harus dijaga seminimum mungkin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Penurunan permukaan tanah dapat dikurangi</li> <li>• Diafragma sementara dapat lebih mudah dilepas daripada seperti pada metode diafragma pusat</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peralatan kecil harus digunakan untuk penggalian samping</li> </ul>

### 3.2 Perencanaan sistem perkuatan

Penyangga terowongan direncanakan untuk menghasilkan integrasi struktur dengan tanah/batuan sekitar segera setelah penggalian dilakukan. Perencanaan penyangga terowongan harus mempertimbangkan karakteristik bagian-bagian penyangga, kondisi tanah/batuan dan metode konstruksi yang diperlukan. Bagian-bagian penyangga ditentukan berdasarkan kelas tanah/batuan dan pola penyangga ditentukan berdasarkan kombinasi bagian-bagian penyangga yang dipilih. Kriteria penentuan bagian-bagian penyangga diperlihatkan pada Tabel 4-16.

Tabel 4-16 Kriteria pemilihan bagian-bagian penyangga (JSCE, 2006)

Kategori Tanah/Batuan		Bagian-bagian Penyangga				Catatan
		Beton Semprot	Baut Batuan	Penyangga Baja	Lantai Kerja Beton	
Batuan Keras (Kelas B, C)	Sedikit rekahan	△	△	×	×	
	Banyak rekahan	○	○	△	○	
Batuan Lunak (Kelas D)	Faktor Kompetensi Tanah Besar	○	○	×	△	Untuk memastikan kondisi lapisan pondasi ( <i>base course</i> ) yang baik pada masa layan, diperlukan lantai kerja beton jika jenis batumannya adalah batulempung.
	Faktor Kompetensi Tanah Kecil	○	○	○	○	Harus dipertimbangkan mengenai penempatan awal lantai kerja beton atau penutupan awal penampang melintang penggalian.
Media Tanah (Kelas E)	( <i>Overburden</i> Kecil)	○	△	○	○	Dinding dapat dianggap sebagai bagian penyangga.
Zona Patahan	( <i>Overburden</i> Besar)	○	○	○	○	Harus dipertimbangkan mengenai penutupan awal penampang melintang penggalian dan besarnya deformasi yang diizinkan.
<i>Squeezing Ground</i>		○	○	○	○	Harus dipertimbangkan mengenai penutupan awal penampang melintang penggalian, fungsi penyanggaan dari dinding dan besarnya deformasi yang diizinkan.

○ : sangat efektif, △ : efektif, × : pada prinsipnya tidak perlu

Bila terjadi perubahan kondisi tanah/batuan, maka perubahan fungsi penyangga dapat dilakukan berdasarkan kondisi tanah/batuan yang ada. Penentuan pola penyangga ditentukan oleh:

### 1. Penggunaan standar tipikal penyangga.

Pola penyangga didasarkan pada pendekatan empiris berdasarkan klasifikasi tanah/batuan. Tipikal standar pola penyangga terowongan jalan untuk penampang berukuran besar, yaitu sekitar 12,5 m hingga 14 m, dapat dilihat pada Tabel 4-17.

Tabel 4-17 Tipikal pola penyangga terowongan jalan (JSCE, 2006)

(Terowongan berpenampang besar, lebar bagian dalam: sekitar 12,5 m hingga 14,0 m)

Kelas media	Pola penyangga	Panjang Lengkung Standar (m)	Baut batuan				Penyangga baja			Ketebalan beton semprot (cm)	Ketebalan lining		Besarnya deformasi yang diizinkan (cm)	Metode penggalian
			Panjang (m)	Jarak		Area pemasangan	Top heading	Bench	Jarak (m)		Lengkung (arch), dinding samping (side wall)	Lantai kerja (invert) (cm)		
				Arah melengkung (m)	Arah memanjang (m)									
B	B	2.0	4.0	1.5	2.0	Top heading	-	-	-	10	40	-	0	Full face method with auxiliary bench cut, bench cut method, center diaphragm method, center drift advancing method
C I	C I	1.5	4.0	1.2	1.5	Top heading, bench	-	-	-	15	40	(45)	0	
C II	C II	1.2	4.0	1.2	1.2	Top heading, bench	H-150	-	1.2	15	40	(45)	0	
D I	D I	1.0	6.0	1.0	1.0	Top heading, bench	H-150	H-150	1.0	20	40	50	0	
D II	D II	1,0 atau kurang	6	1.0	1,0 atau kurang	Top heading, bench	H-200	H-200	1,0 atau kurang	25	40	50	0	

### 2. Penggunaan pola penyangga berdasarkan kondisi serupa.

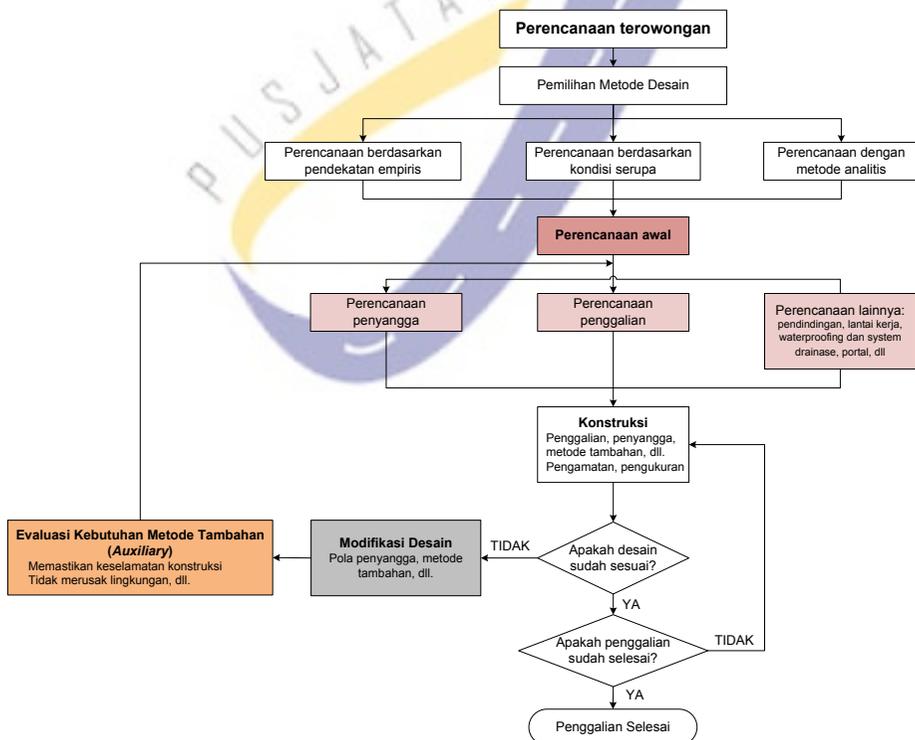
Bila kondisi tanah/batuan dan penampang melintang terowongan pada suatu proyek terowongan baru serupa dengan proyek yang sebelumnya telah dilakukan, maka pola penyangga dapat ditentukan berdasarkan perencanaan tersebut. Ketika menerapkan perencanaan penyangga berdasarkan kondisi yang serupa, pengumpulan informasi kondisi tanah/batuan, metode konstruksi dan hasil pengukuran instrumentasi yang dilakukan pada proyek sebelumnya sangatlah penting. Pertimbangan penggunaan pola perkuatan yang diperlukan dilakukan berdasarkan hasil analisis dan evaluasi terhadap data-data dan informasi yang didapatkan.

### 3. Penggunaan metode analitis.

Bila tekanan tanah dan deformasi yang terjadi diindikasikan besar dan penggunaan penampang melintang yang tidak sesuai dengan penampang melintang yang umumnya digunakan pada penggalian terowongan diperlukan, maka pola penyangga ditentukan berdasarkan metode analitis. Metode analitis yang digunakan dapat berupa analisis numerik atau analisis teoritis berdasarkan kebutuhan evaluasi yang akan ditinjau

Pada Gambar 4-6 ditunjukkan bagaimana perubahan atau modifikasi desain dilakukan pada tahapan perencanaan dan pelaksanaan konstruksi. Untuk kondisi media campuran tanah-batuan, atau kelompok massa batuan kelompok DI dan DII dari klasifikasi massa batuan dari Jepang, kemungkinan untuk melakukan perubahan penyangga disebabkan oleh kondisi geologi yang kompleks cukup besar, sehingga pada tahapan perencanaan perkuatan, opsi untuk melakukan perubahan sangat tergantung dari permasalahan yang akan dihadapi saat konstruksi.

Perubahan penyangga dilakukan berdasarkan evaluasi terhadap hasil pengamatan muka bidang galian dan pengukuran aktual di lapangan, yaitu berdasarkan hasil dari pengeboran penyelidikan (*probe drilling/advanced boring*). Evaluasi harus dilakukan dengan pertimbangan yang matang agar perubahan yang dilakukan sesuai dengan kondisi aktual di lapangan. Jika pola penyangga pada desain awal harus dimodifikasi, maka perubahan tersebut harus dilakukan secepatnya, tanpa penundaan.



Gambar 4-6 Diagram alir tahapan perencanaan dan pelaksanaan konstruksi (modifikasi berdasarkan JSCE (2006))

Terdapat dua kasus dalam perubahan penyangga, yaitu:

1. Perubahan penyangga pada daerah yang tidak digali.

Pola penyangga awal yang ditentukan berdasarkan hasil penyelidikan geologi umumnya sangat tipikal. Perubahan harus dilakukan agar menjadi pola yang lebih rasional dan sesuai dengan kondisi aktual tanah/batuan, dengan mengacu pada hasil pengamatan dan pengukuran pada daerah yang telah digali. Tingkat perubahan tergantung kepada perbedaan kondisi tanah/batuan dan besaran deformasi dari perencanaan awal. Perubahan penyangga berkisar dari perubahan minor dalam jumlah dan material bagian-bagian penyangga, hingga modifikasi menyeluruh pola penyangga berdasarkan tinjauan terhadap kelas tanah/batuan.

2. Perubahan penyangga pada daerah yang digali.

Jika deformasi yang terjadi setelah penggalian lebih besar daripada yang diperkirakan, atau konvergensi dan/atau penurunan permukaan melampaui kriteria batas, maka pola penyangga harus diubah, seperti dengan baut batuan tambahan, beton semprot tambahan dan memasang lantai kerja beton untuk memperkuat penyangga yang telah ada. Dalam kasus seperti ini, untuk menghindari deformasi yang berlebihan, maka sangat penting untuk mempelajari bentuk, material dan susunan penyangga tambahan, juga untuk segera melakukan tindakan pencegahan. Pada Tabel 4-18 dapat dilihat tipikal perubahan penyangga yang dapat terjadi pada saat konstruksi.

Tabel 4-18 Tipikal perubahan penyangga pada saat konstruksi (JSCE, 2006)

Item	Tipikal Perubahan
Beton semprot	Perubahan tebal, material, dll.
Baut batuan	Perubahan panjang, kualitas, kekuatan, ikatan material, tipe ikatan, dll.
Penyangga baja	- Adopsi atau penolakan ( <i>rejection</i> ) penyangga baja; - Perubahan pada ukuran, spasi, material, dll. - Penggunaan <i>lattice arch girder</i>
Lantai kerja beton ( <i>invert concrete</i> )	- Adopsi atau penolakan ( <i>rejection</i> ) lantai kerja beton; - Perubahan pada bentuk, waktu pelaksanaan, material, dll.
Faktor lain	- Perubahan panjang lengkungan ( <i>round length</i> ); - Aplikasi metode tambahan; - Pemeriksaan pada struktur dinding terowongan.

Seperti telah disebutkan sebelumnya, kemungkinan terjadinya perubahan penyangga pada kondisi media yang jelek cukup besar karena kondisi media yang tidak homogen yang akan mempengaruhi kondisi stabilitas tanah-batuannya. Untuk menghadapi kondisi yang seperti ini, metode tambahan dapat digunakan sesuai dengan kondisi muka bidang galian yang ditemui saat konstruksi dilakukan. Metode tambahan merupakan suatu metode yang digunakan untuk menjamin kestabilan muka galian dan keamanan terowongan, serta melindungi lingkungan jika penyangga konvensional tidak cukup memadai. Beberapa metode tambahan yang dapat digunakan ditunjukkan pada Tabel 4-19.



Tabel 4-19 Metode tambahan dan kegunaannya (JSCE, 2006)

Metode / Tujuan		Kegunaan Metode Tambahan						Kondisi Media		
		Stabilitas Atap	Stabilitas Muka Bidang Galian	Stabilitas Bagian Bawah	Pengendalian Aliran Air	Penurunan Permukaan Tanah	Proteksi Struktur di sekitarnya	Batuan Keras	Batuan Lunak	Tanah
Penyangga Awal (presupport)	<i>Filling type forepiling</i>	XX	X				X	X	XX	XX
	<i>Injection type forepiling</i>	XX	X			X	X	X	XX	XX
	<i>Steel pipe forepiling</i>	X	X			X	X		X	XX
Perkuatan Muka Bidang Galian	<i>Spray concrete to face</i>		XX					X	XX	XX
	<i>Bolting to face</i>		XX					X	X	X
Perkuatan Kaki Terowongan	<i>Temporary invert of top heading</i>			X		X			X	X
Pengendalian aliran air	<i>Drainage boring</i>	X	X		XX			XX	XX	XX
	<i>Well point</i>	X	X		X					X
	<i>Deep well</i>	X	X		X					X

Catatan: XX : Metode yang sering digunakan  
 X : Metode yang digunakan tergantung kasusnya

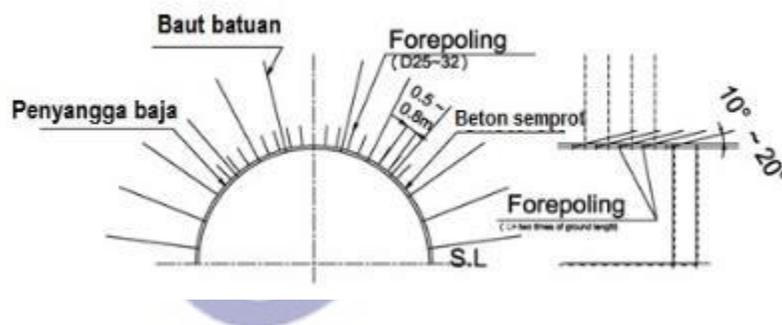
Seperti terlihat pada Tabel 4-19, metode tambahan dikelompokkan menjadi 4 kelompok, yaitu:

1. Penyangga awal (*pre-support*).

Pada kondisi media yang tidak terlalu bagus, yaitu media dengan waktu penyanggaan sendirinya (*standup time*) tidak cukup lama, metode penyangga awal yang berfungsi untuk memperkuat stabilitas mahkota dan muka bidang galian dapat diterapkan. Selain itu metode ini dapat pula mencegah terjadinya penurunan permukaan tanah dan melindungi struktur yang telah ada di sekitarnya. Terdapat beberapa metode penyangga awal yang dapat digunakan, di antaranya adalah:

a) *Filling type forepoling*.

*Filling type forepoling* merupakan metode penyangga tambahan yang menggunakan baut, batang baja, atau pipa dengan panjang kurang dari 5 m, yang dipasang masuk ke dalam tanah/batuan pada bagian atas lengkung, seperti dapat ditunjukkan pada Gambar 4-7.



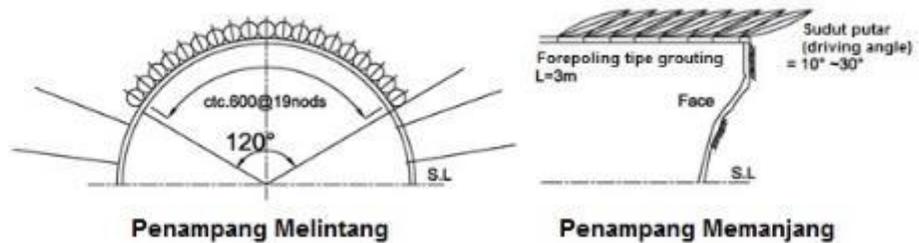
Gambar 4-7 Contoh metode penyangga tambahan *filling type forepoling* (JSCE, 2006)

Tujuan dari metode ini adalah untuk meningkatkan kuat geser tanah/batuan pada bagian mahkota dan untuk mencegah berkurangnya kekuatan tanah/batuan di belakang muka bidang galian. Metode ini biasa digunakan untuk mencegah keruntuhan mahkota dan sering dipasang pada tahap awal stabilisasi.

b) *Injection type forepoling*.

*Injection type forepoling* merupakan metode tambahan yang menggunakan baut atau pipa dengan panjang kurang dari 5 m, yang dipasang secara

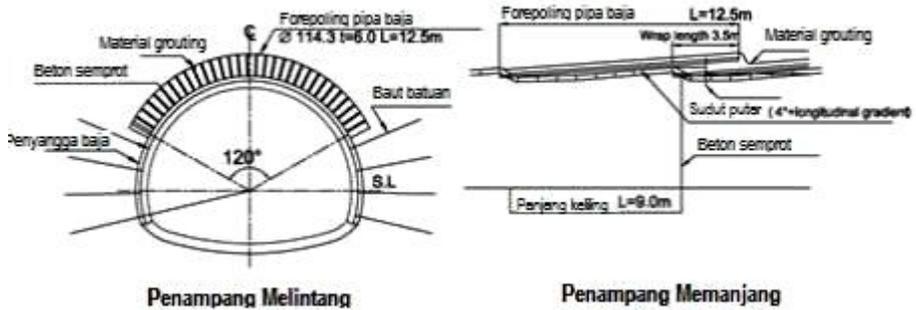
diagonal masuk ke dalam tanah/batuan di belakang muka galian bersama-sama dengan injeksi (di bawah tekanan) pasta semen cepat kering (*quick-setting cement paste*) atau *grout* kimia. Berfungsi untuk meningkatkan stabilitas mahkota di belakang muka bidang galian, seperti ditunjukkan pada Gambar 4-8.



Gambar 4-8 Contoh metode penyangga tambahan *injection type forepiling* (JSCE, 2006)

c) *Steel pipe forepiling*.

*Steel pipe forepiling* merupakan metode penyangga tambahan untuk memperkuat tanah yang tidak stabil, di mana efek busur diabaikan. Manfaat tambahan dari penggunaan metode ini adalah pengurangan pada pergerakan yang sebelumnya terjadi. Umumnya metode ini menggunakan pipa baja dengan panjang 12,5 m. Metode ini terutama digunakan untuk menstabilkan mahkota terowongan. Penggunaan metode ini, mungkin memerlukan perubahan penggalian penampang terowongan atau jenis mesin yang digunakan. Oleh karena itu, pengaturan jadwal konstruksi perlu dievaluasi sebelum mengadopsi metode ini. Pipa dipasang ke dalam tanah/batuan pada bagian atas sepanjang area profil rencana penggalian terowongan, seperti ditunjukkan pada Gambar 4-9. Pemasangan perkuatan ini dengan menggunakan mesin khusus atau menggunakan *drill jumbo*.



Gambar 4-9 Contoh metode penyangga tambahan *steel pipe forepiling* (JSCE, 2006)

2. Perkuatan muka bidang galian.

Stabilitas muka bidang galian dipengaruhi baik oleh skala dan ukurannya. Dan biasanya, penggalian dengan skema membagi area bidang galian menjadi bagian-bagian yang kecil dan bertahap dilakukan untuk meningkatkan stabilitas muka bidang galian. Umumnya penggalian yang disertai dengan penyemprotan beton pada muka bidang galian segera setelah penggalian dapat pula meningkatkan stabilitas muka bidang galian. Namun, penggalian dengan bagian yang lebih besar dapat saja dilakukan, dengan menerapkan metode penyangga tambahan seperti dengan melakukan penyemprotan beton pada muka bidang galian dan memasang baut pada muka bidang galian. Untuk memutuskan penggunaan metode ini, maka perlu dilakukan pemeriksaan terhadap kondisi tanah/batuan, kondisi lokasi atau kemungkinan pelaksanaan praktis dengan cara yang komprehensif. Metode-metode penyemprotan beton dan pembautan pada muka bidang galian, secara singkat akan dijelaskan sebagai berikut:

a) Penyemprotan beton pada muka bidang galian (*spray concrete to face*).

Penyemprotan beton pada muka bidang galian dilakukan dengan ketebalan antara 3 cm hingga 10 cm, segera setelah penggalian untuk meningkatkan waktu penyanggaan sendiri muka bidang galian, seperti ditunjukkan pada Gambar 4-10.

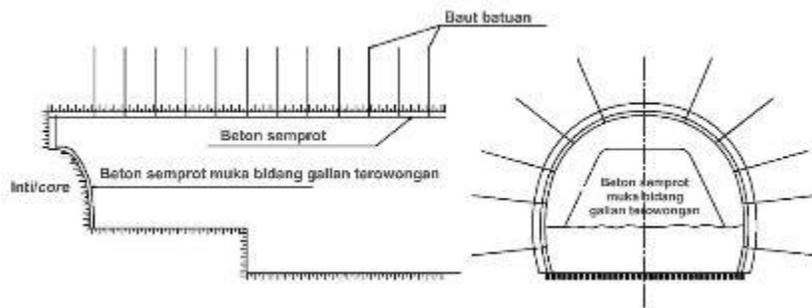
b) Pembautan muka bidang galian (*bolting to face*).

Tujuan dari pembautan muka bidang galian adalah menstabilkan muka bidang galian dan mengurangi penurunan permukaan tanah dengan menyangga sebagian atau keseluruhan muka bidang galian dengan baut

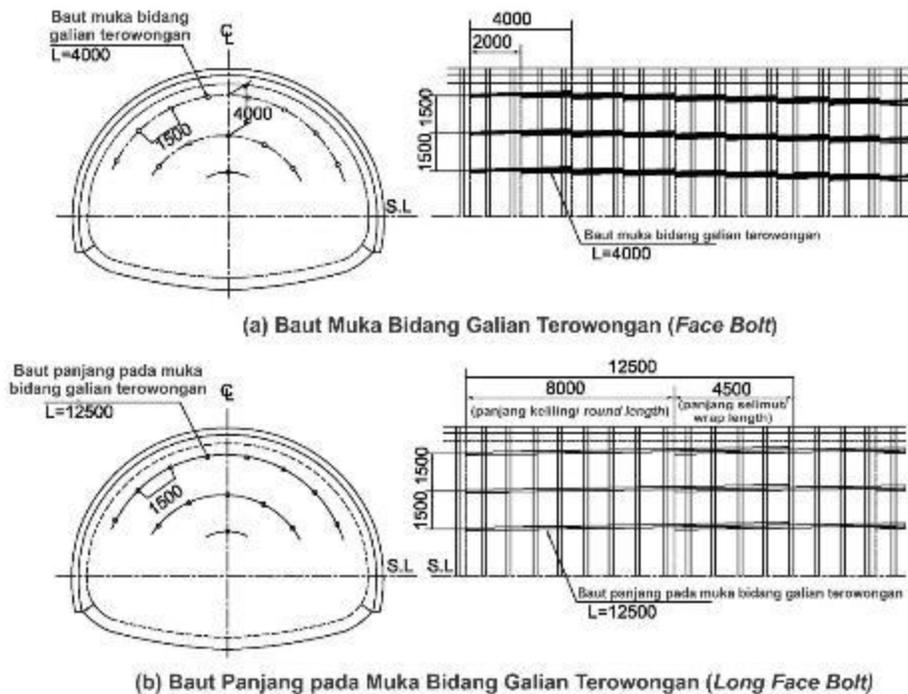
batuan. Pembautan muka bidang galian menjadi lebih efektif bila diterapkan bersama-sama dengan penyemprotan beton pada muka bidang galian. Panjang baut muka bidang galian ini idealnya harus dapat mempertahankan panjang residual efektifnya pada saat dipotong ketika penggalian dilakukan. Terdapat dua tipe pembautan muka bidang galian (Gambar 4-11), yaitu:

- Pembautan dengan panjang kurang dari 5 m.
- Pembautan dengan panjang lebih dari 5 m.

Baut muka bidang galian menggunakan pipa baja dinding tipis atau plastik dari serat gelas (*glass fiber reinforced plastic bolts*) sering digunakan karena mudah dipotong.



Gambar 4-10 Contoh metode penyangga tambahan dengan penyemprotan beton pada muka bidang galian (JSCE, 2006)



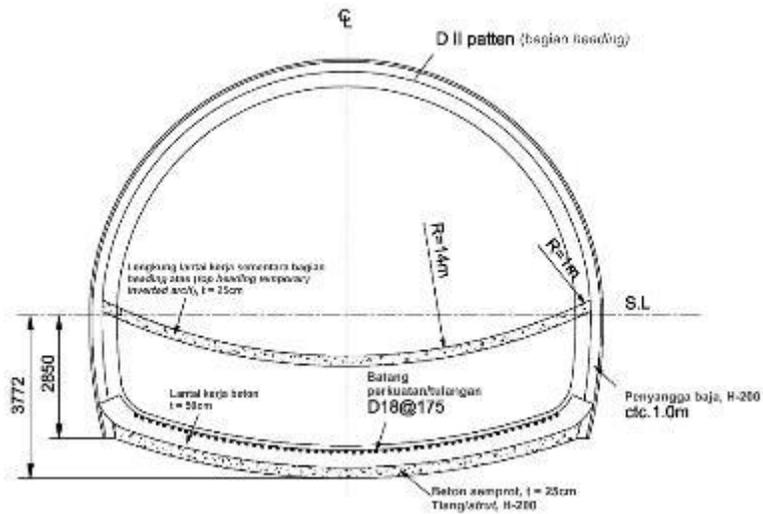
Gambar 4-11 Contoh metode penyangga tambahan dengan pembautan muka bidang galian (JSCE, 2006)

### 3. Perkuatan kaki terowongan.

Metode stabilisasi pada kaki terowongan dapat membantu melindungi kerusakan yang disebabkan oleh penurunan kaki terowongan dan yang terkait dengan penurunan kekuatan tanah/batuan (yang diakibatkan oleh kapasitas daya dukung tanah di kaki terowongan dari penyangga tidak memadai). Tujuan dari metode perkuatan kaki ini adalah untuk meningkatkan kapasitas daya dukung tanah. Metode lantai kerja sementara pada *heading* atas (*temporary invert of top heading*) merupakan salah satu metode yang dapat digunakan sebagai perkuatan kaki terowongan, seperti dapat dilihat pada Gambar 4-12.

Umumnya, lengkung lantai kerja sementara pada *heading* atas dibuat dengan cara menutup sementara dasar *heading* atas dengan beton semprot. Hal ini merupakan metode yang efisien, salah satu keuntungannya adalah juga dapat memberikan kestabilan pada muka bidang galian sehingga metode konstruksi dapat ditentukan berdasarkan kondisi muka bidang galian dan hasil pemantauan. Namun hal ini mengurangi kemudahan pelaksanaan penggalian *heading* atas

dan menurunkan efisiensi kerja pada *bench* karena sebelum dilakukan penggalian lantai kerja sementara harus dihancurkan. Sebagai tambahan, karena pergerakan yang besar dapat terjadi ketika membongkar lantai kerja, maka pemeriksaan awal yang cermat perlu dilakukan sebelum menerapkan metode ini.



Gambar 4-12 Contoh metode penyangga tambahan dengan lantai kerja sementara pada heading atas (JSCE, 2006)

#### 4. Pengendalian aliran air.

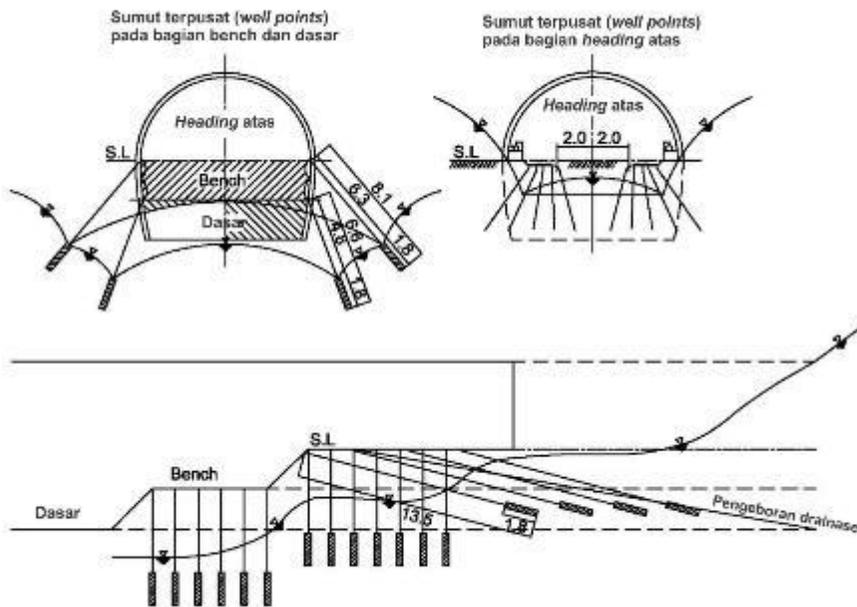
Jika tingkat aliran air tanah yang mengalir ke dalam terowongan tinggi, hal ini akan mengakibatkan beberapa permasalahan, seperti: menurunkan stabilitas muka bidang galian (yang mengakibatkan kesulitan pada saat penggalian), keruntuhan muka bidang galian, daya lekat beton semprot dan baut batuan yang tidak memadai, dan penurunan efisiensi kerja penerowongan. Metode-metode yang dapat dilakukan untuk mengendalikan aliran air ini, di antaranya adalah:

##### a) Pengeboran drainase (*drainage boring*).

Pengeboran drainase merupakan metode yang sering digunakan di mana air dibuang melalui lubang bor dengan menggunakan mesin bor atau *drill jumbo* dengan tujuan untuk menurunkan tekanan dan muka air tanah. Namun, pada kondisi tanah yang tidak terkonsolidasi, harus dijaga agar partikel-partikel tanah tidak terbawa oleh aliran air.

b) Sumur terpusat (*well point*).

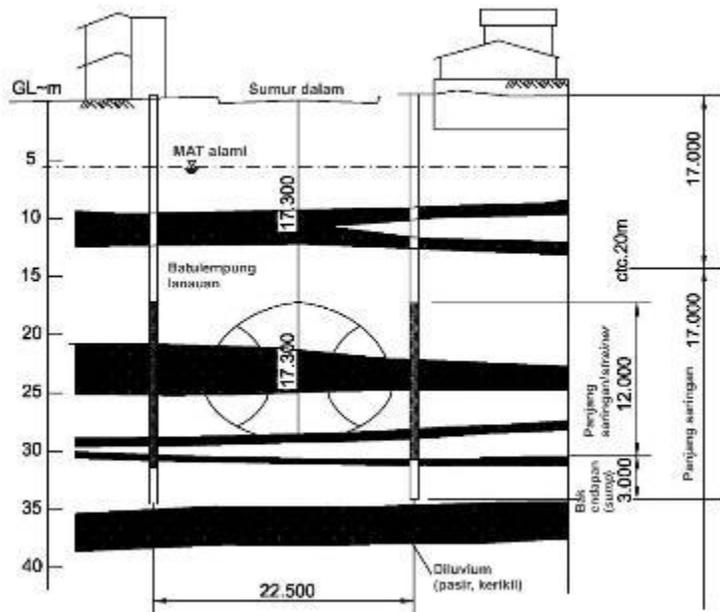
Metode sumur terpusat, seperti dapat dilihat pada Gambar 4-13, merupakan metode yang digunakan untuk menurunkan muka air tanah di bawah elevasi penggalian terowongan.



Gambar 4-13 Contoh sumur terpusat (JSCE, 2006)

c) Sumur dalam (*deep well*).

Sumur dalam merupakan metode drainase dengan melakukan pembuatan sumur dalam, biasanya dengan diameter antara 300 mm hingga 600 mm, dari permukaan tanah eksisting hingga kedalaman tertentu di bawah area kerja penggalian terowongan dan sebuah pompa (*submersible pump*) digunakan untuk membuang air (Gambar 4-14).

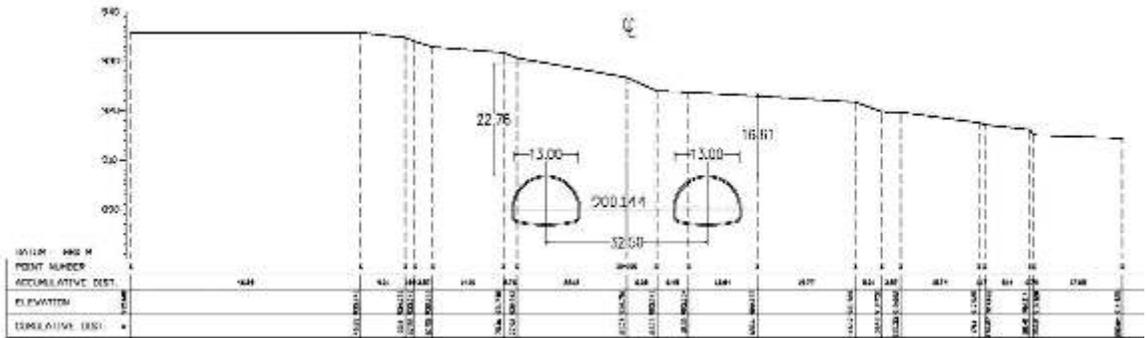


Gambar 4-14 Contoh sumur dalam (JSCE, 2006)

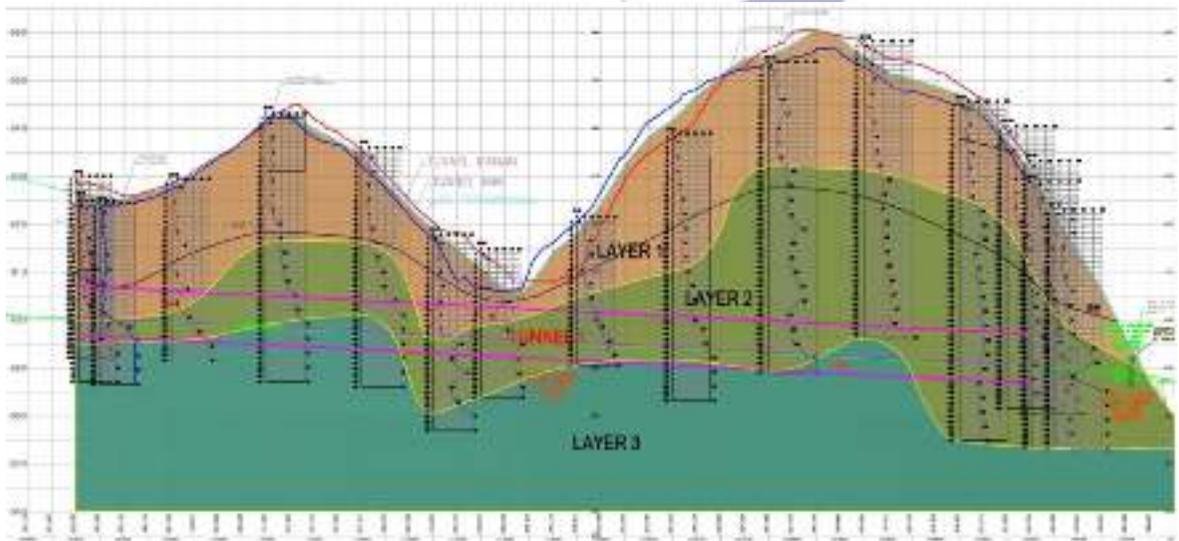
### 3.3 Evaluasi metode penggalian dan perkuatan tambahan untuk meningkatkan stabilitas muka bidang galian

Untuk mempelajari tahapan pemodelan penggalian terowongan beserta perkuatan yang diperlukan untuk menjaga stabilitas muka bidang galian, maka dilakukan analisis prediksi menggunakan bantuan piranti lunak Flac 3d. Contoh kasus yang diambil untuk pemodelan adalah rencana terowongan Cisumdawu. Penampang melintang terowongan Cisumdawu dapat dilihat pada Gambar 3.1, sedangkan stratifikasi tanah dan parameter tanah berdasarkan hasil pengujian lapangan yang digunakan untuk pemodelan dapat dilihat pada Gambar 3.2 dan Tabel 3-1. Stratifikasi tanah tersebut dibuat berdasarkan pada 15 profil bor yang di plotkan pada penampang memanjang bukit dan posisi alinyemen terowongan. Terowongan -1 diperkirakan sebagian besar akan melewati lapisan 2 (*Layer 2*), yaitu lapisan tanah lempung lanauan dengan konsistensi kenyal-keras, sedangkan daerah portal diperkirakan akan melalui lapisan 1 (*layer 1*), yaitu lempung lanauan dengan konsistensi teguh. Modulus tanah yang digunakan sebagai parameter model adalah

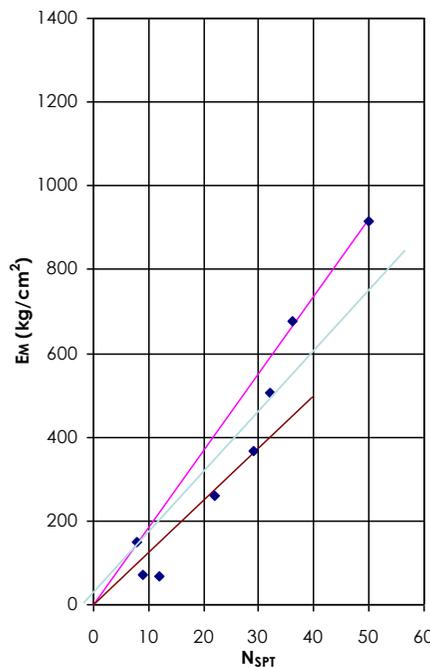
hasil yang didapatkan dari uji pressuremeter seperti diperlihatkan pada Gambar 3.3, sedangkan parameter sudut geser dalam didapatkan dari korelasi empiris nilai penetrasi standar dan CUR (1996).



Gambar 3.1. Penampang melintang terowongan Cisumdawu (Balai Pelaksanaan Jalan Nasional IV, 2013)



Gambar 3.2. Stratifikasi tanah pada penampang memanjang terowongan-1 (Balai Pelaksanaan Jalan Nasional IV, 2013)

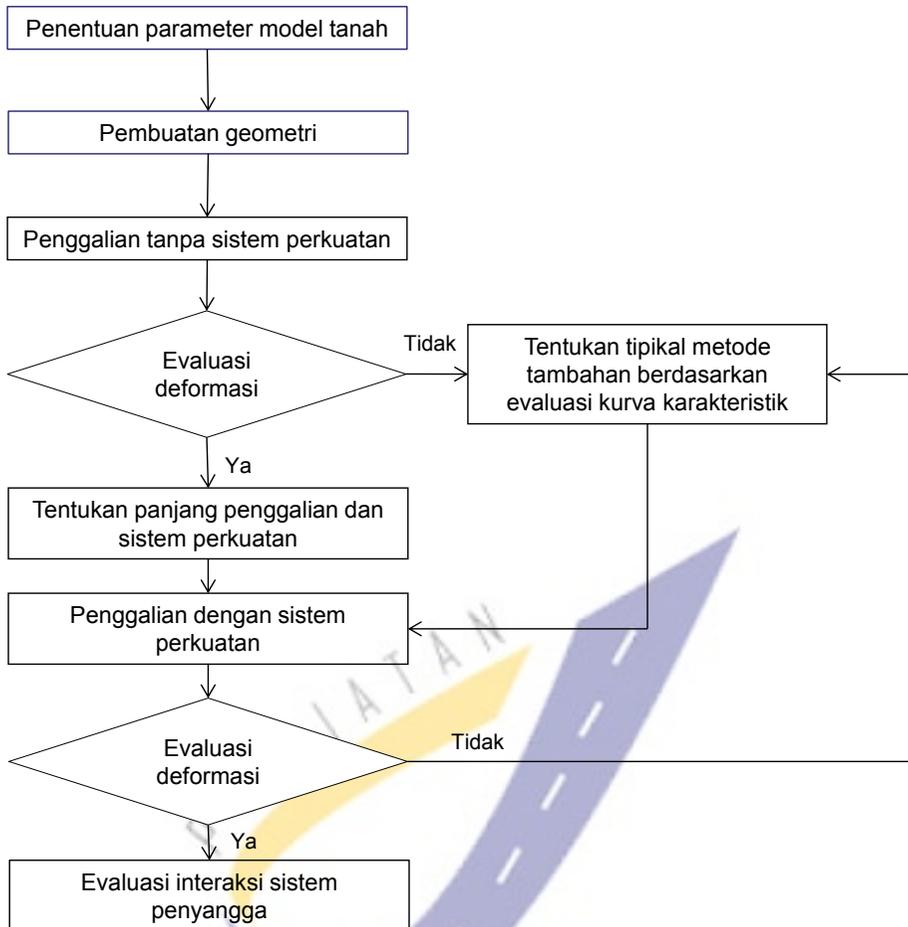


Gambar 3.3. Korelasi uji modulus tanah dan uji penetrasi standar (Balai Pelaksanaan Jalan Nasional IV, 2013)

Tabel 3-1. Parameter tanah menggunakan model Mohr-Coulomb

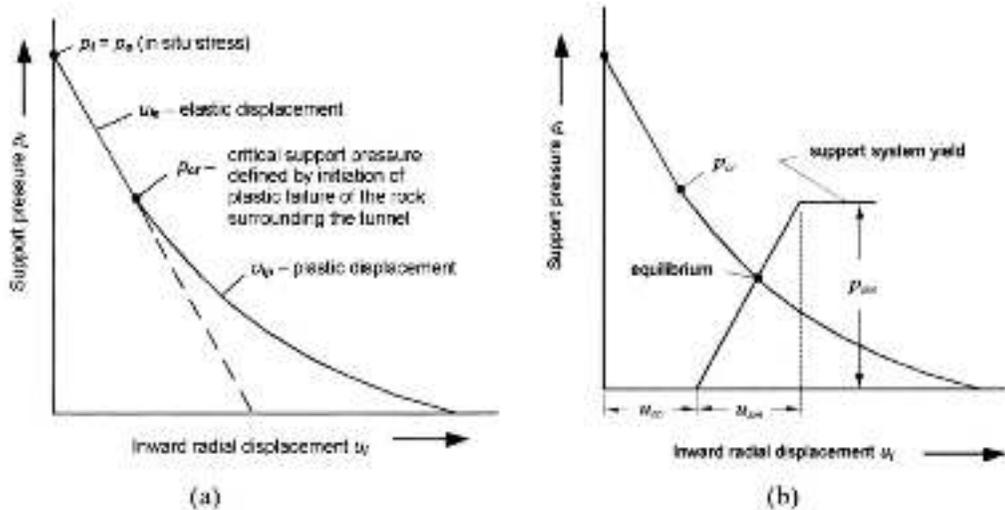
Layer	Modulus Young's (E)	Kohesi (c)	Sudut geser dalam ( $\phi$ )	Ratio poisson ( $\nu$ )	Bulk modulus (K)	Shear modulus (G)	Tension modulus (T)
	kPa	kPa					
Layer 1	30 000	10	20	0.3	2.50E+04	1.15E+04	2.75E+01
Layer 2	60 000	20	28	0.3	5.00E+04	2.31E+04	3.76E+01
Layer 3	150 000	30	35	0.3	1.25E+05	5.77E+04	4.29E+01

Evaluasi perilaku muka bidang galian terowongan dilakukan dengan tahapan seperti diperlihatkan pada Gambar 3.4. Evaluasi dilakukan pada kondisi tanpa perkuatan dan dengan perkuatan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui efektivitas skema perkuatan yang digunakan dalam mengatasi permasalahan stabilitas dan deformasi yang terjadi.



Gambar 3.4. Tahapan evaluasi perilaku penggalian terowongan

Evaluasi awal umumnya didasarkan pada model penyederhanaan untuk mengetahui secara global perilaku dan permasalahan penggalian terowongan serta interaksi antara sistem penyangga dan deformasi selama proses penggalian seperti diperlihatkan pada Gambar 3.5.



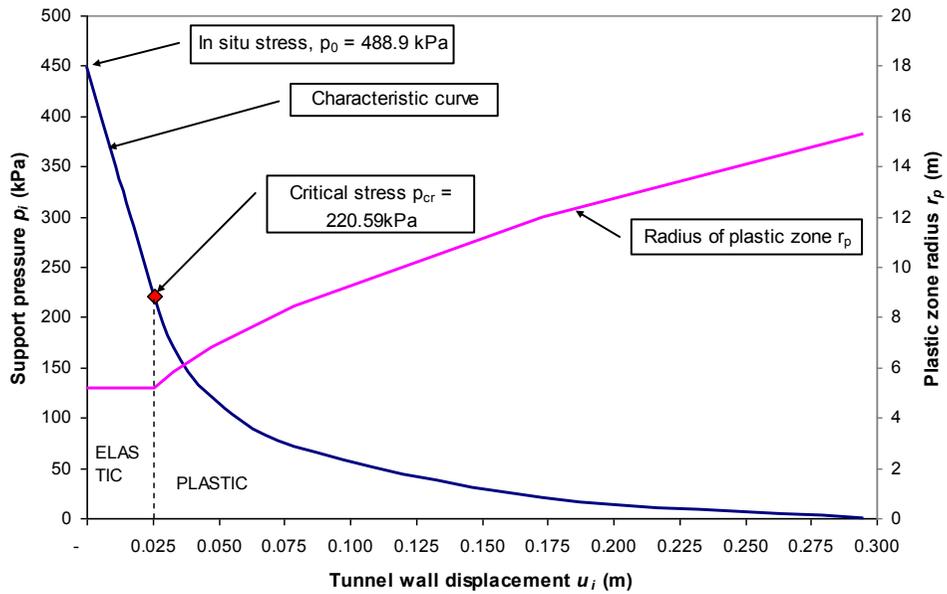
Gambar 3.5. Kurva metode analitis elastis reaksi tanah/batuan antara tekanan penyokong (*support pressure*) dan perpindahan (*displacement*) (Hoek et al, 1995); Further research by N. Vlachopoulos and M. S. Diederichs, 2009

Hasil evaluasi awal perilaku perpindahan (*displacement*) tanpa perkuatan menggunakan pendekatan analitis (N. Vlachopoulos and M. S. Diederichs, 2009) menunjukkan bahwa ketika deformasi sebesar 2.5cm terjadi, tegangan kritis (*critical stress*) tercapai dan kondisi plastis terjadi (lihat Gambar 3.6). Kurva tersebut didasarkan pada asumsi bahwa tanah pada muka bidang galian memberikan tekanan penyangga awal (*initial support pressure*) yang setara dengan tegangan awal (*in situ stress*).

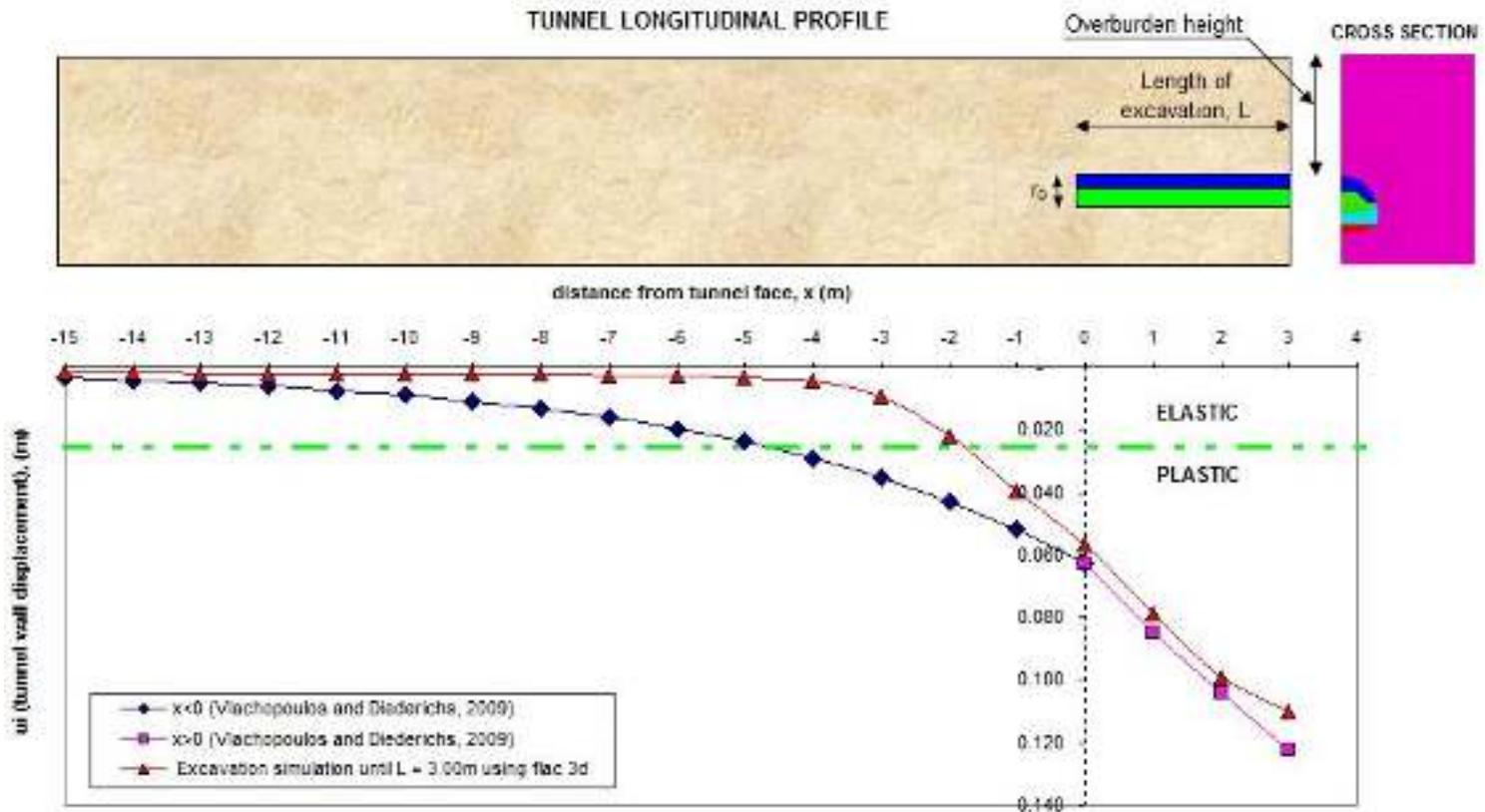
Pada saat penggalian dilakukan dan muka bidang galian berpindah, maka tekanan penyangga awal mengalami penurunan hingga mencapai nol pada suatu jarak dibelakang muka bidang galian. Untuk mengetahui perpindahan arah memanjang terowongan, maka dilakukan perbandingan antara model analitis dan model numerik menggunakan piranti lunak flac 3d. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa model konstitutif tanah mencapai batas ultimit dan mengalami keruntuhan pada panjang penggalian 4m.

Model analitis menggunakan pendekatan konstitutif *linear elastic*, sehingga model ini tidak dapat digunakan untuk memprediksi batas laju penggalian aman sebelum batas

ultimit tercapai. Model analitis menunjukkan hasil yang cukup sesuai dalam memprediksi perpindahan vertikal pada muka bidang galian. Akan tetapi hasil yang cukup berbeda terlihat pada prediksi perpindahan didepan muka bidang galian seperti diperlihatkan pada Gambar 3.7.

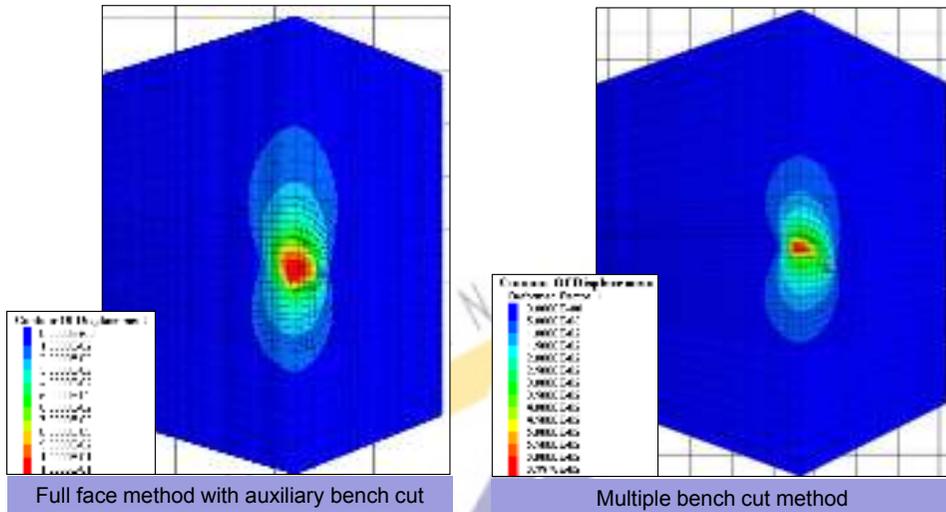


Gambar 3.6. Perilaku deformasi model menggunakan pendekatan pendekatan analitis (N. Vlachopoulos and M. S. Diederichs, 2009)



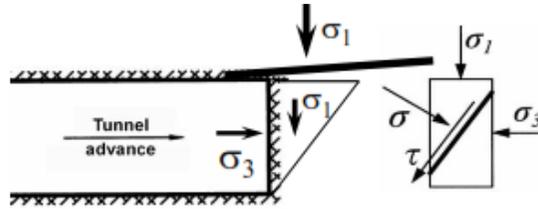
Gambar 3.7. Perilaku perpindahan arah memanjang terowongan

Evaluasi metode penggalian dan sistem penyangga menunjukkan metode *multiple bench cut* lebih memungkinkan untuk digunakan pada kondisi terowongan Cisumdawu dibandingkan dengan metode penggalian keseluruhan muka (*full face*) seperti diperlihatkan pada Gambar 3.8. Sistem penyangga standar (berdasarkan standar Jepang) tidak dapat digunakan karena permasalahan stabilitas muka bidang galian. Untuk meningkatkan stabilitas muka bidang galian, sistem penyangga menggunakan metode tambahan diperlukan.

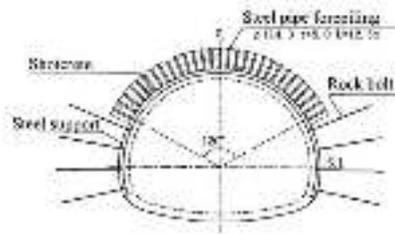


Gambar 3.8. evaluasi metode penggalian tanpa perkuatan

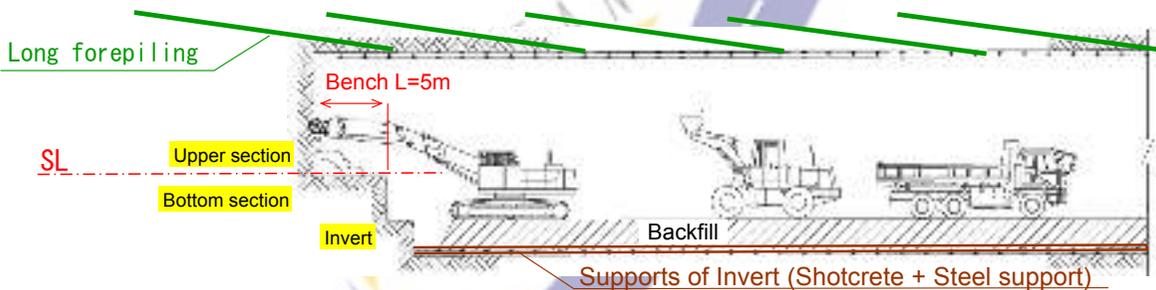
Skema stabilisasi muka bidang galian berdasarkan standar Jepang adalah menggunakan forepiling. Konsep dasar yang terjadi saat dilakukan penggalian adalah berkurangnya  $\sigma_3$  hingga mendekati nol yang mengakibatkan terjadinya ketidakstabilan muka bidang galian. Penggunaan forepiling sebagai model balok kaku yang dipasang di bagian atas terowongan kearah memanjang daerah galian dapat mengurangi tegangan vertikal ( $\sigma_1$ ) pada muka bidang galian seperti diperlihatkan pada Gambar 3.9. Skema penggunaan forepiling yang akan dievaluasi efektivitasnya menggunakan piranti lunak flac 3d diperlihatkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.9. Ilustrasi penggunaan forepiling untuk mengurangi tegangan vertikal ( $\sigma_1$ )



a) penampang melintang



b) penampang memanjang

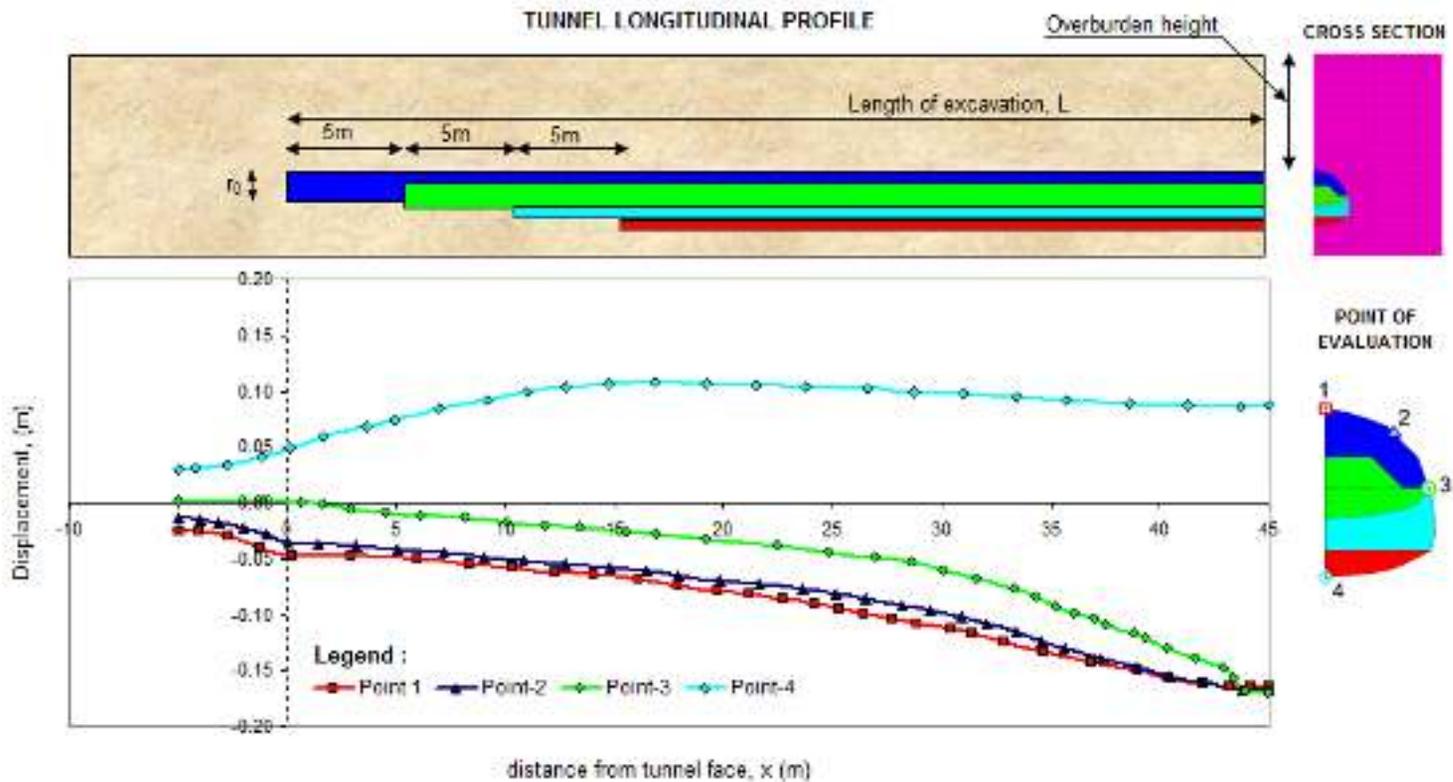
Gambar 3.10. Skema stabilisasi muka bidang galian menggunakan pipe forepiling (JSCE 2006)

Hasil evaluasi stabilisasi muka bidang galian dengan pipe forepiling dan metode penggalian bench cut method dengan panjang bench 5m menunjukkan bahwa metode tersebut dapat meningkatkan stabilitas terowongan. Hal ini ditunjukkan dengan tidak runtuhnya model saat metode tersebut diterapkan. Setelah dilakukan simulasi penggalian hingga 45m, deformasi pada atap terowongan di muka bidang galian adalah 5cm, sedangkan pada lokasi awal penggalian terlihat deformasi terbesar terjadi sebesar 16cm (lihat Gambar 3.11). Selain itu terlihat pula pengangkatan pada lantai galian (*invert*) sebesar 10cm. Hal ini menunjukkan perlunya penutupan dini penampang melintang terowongan dengan dinding (*lining*)

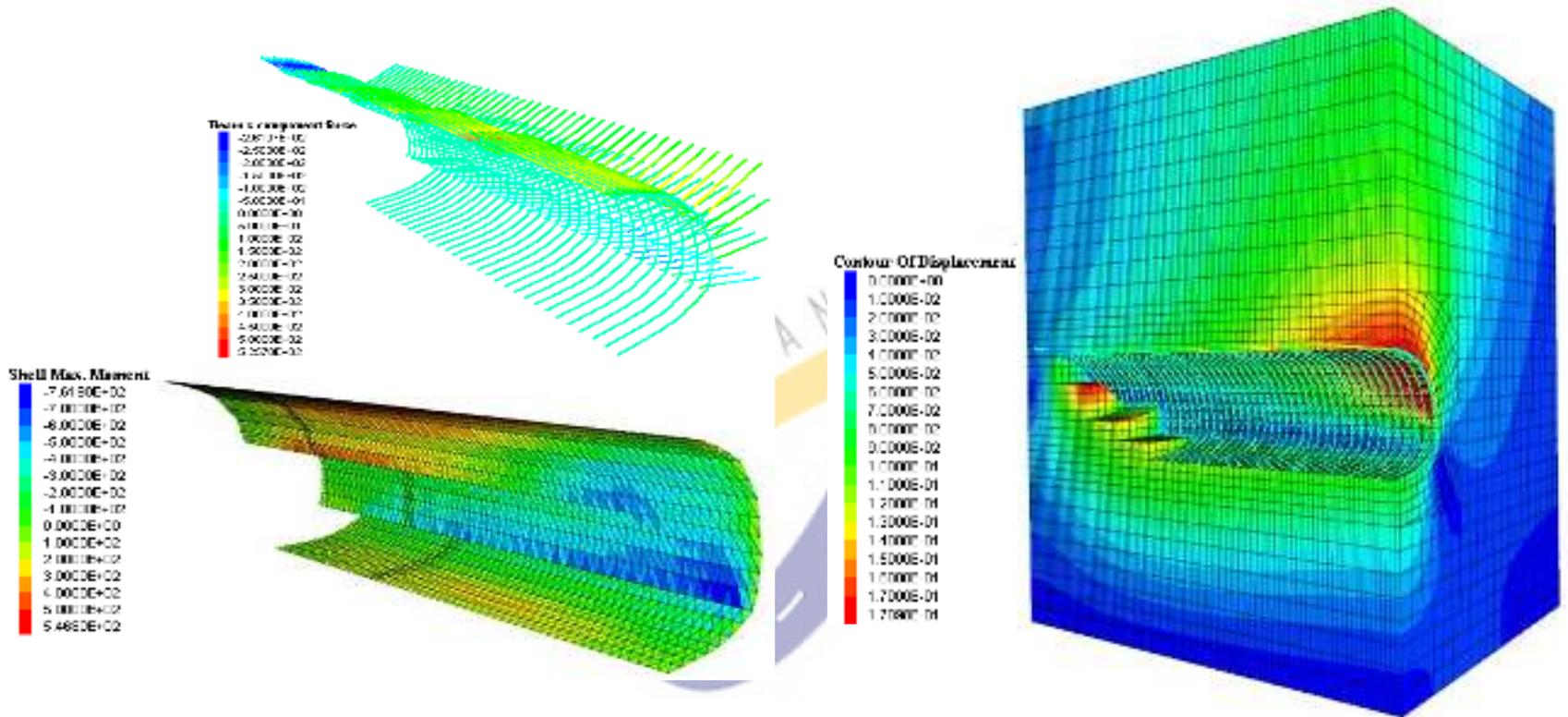
segera setelah penggalian dilakukan untuk mengurangi deformasi yang terjadi. Pola deformasi saat penggalian dan pemasangan sistem penyangga dilakukan beserta gaya-gaya yang bekerja pada sistem perkuatan terowongan dapat dilihat pada Gambar 3.12.

Berdasarkan hasil evaluasi awal, diketahui bahwa stabilisasi muka bidang galian menggunakan pipe forepiling dan multiple bench cut method dengan lebar bench = 5m dapat meningkatkan stabilitas muka bidang galian. Meski demikian, perpindahan pada atap setelah penggalian dengan panjang penggalian 45 dilakukan lebih besar dibandingkan kriteria batas yang disyaratkan JSCE (2006), yaitu (perpindahan >10cm). Hal ini menunjukkan perlunya kombinasi metode tambahan dengan metode tambahan menggunakan pipe forepiling dan penutupan segera penampang melintang galian terowongan dengan dinding beton bertulang.





Gambar 3.11. Hasil evaluasi perilaku deformasi terowongan dengan stabilisasi muka bidang galian menggunakan *pipe forepiling*



Gambar 3.12. Pola deformasi dan gaya-gaya yang bekerja pada perkuatan terowongan

## 4 Penutup

Untuk kondisi dimana terowongan dibangun dekat ke permukaan/tebal lapis penutup tipis, efek busur tidak dapat diharapkan. Stabilitas atap dan muka bidang galian menjadi kunci dalam menentukan metode konstruksi dan perkuatan yang diperlukan. Metode yang mengedepankan sistem perkuatan sebelum penggalian (*pre-support method*) dapat menjadi salah satu solusi untuk pembangunan terowongan pada kondisi tersebut.

Jika deformasi yang terjadi pada saat evaluasi metode penggalian lebih besar daripada yang diperkirakan, atau konvergensi dan/atau penurunan permukaan melampaui kriteria batas, maka pola penyangga harus diubah, seperti dengan baut batuan tambahan, beton semprot tambahan dan memasang lantai kerja beton untuk memperkuat penyangga yang telah ada. Dalam kasus seperti ini, untuk menghindari deformasi yang berlebihan, maka sangat penting untuk mempelajari bentuk, material dan susunan penyangga tambahan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Awaji, 2013. A construction procedure of auxiliary method for tunnel face instability, The 10th Work Shop on Tunnel, October 30, 2013, Tokyo.
- CUR, 1996, Building on soft soils, design and construction of earth structures both on and into highly compressible subsoils of low bearing capacity, Centre for Civil Engineering Research and Codes, ISBN 90 5410 146 6 A.A. Balkema, Rotterdam.
- Evert Hoek, 1998, Practical Rock Engineering, Everet Hoek Consulting Engineer Inc, Canada.
- FHWA. 2009. Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels - Civil Elements. FHWA-NHI-10-034, December.
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE). 2007. Standard Specifications for Tunneling-2006: Mountain Tunnels. Tokyo: JSCE.
- Károly Széchy, 1973, The art of tunneling , second English edition, Akademiai, Budapest, 1973.
- Vlachopoulos, N., Diederichs, M.S., 2009. Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels. Rock Mech.& Rock Eng.. 42:2, 131-146.