

LAMPIRAN
SURAT EDARAN MENTERI PEKERJAAN
UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT
NOMOR : 30/SE/M/2015
TENTANG
PEDOMAN PERENCANAAN PENGGALIAN DAN
SISTEM PERKUATAN TEROWONGAN JALAN
PADA MEDIA CAMPURAN TANAH-BATUAN

PEDOMAN

Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil

**Metode perencanaan
penggalian dan sistem perkuatan terowongan jalan
pada media campuran tanah-batuan**



**KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT**

Daftar isi

Daftar isi	i
Prakata	ii
Pendahuluan	iii
1 Ruang lingkup.....	1
2 Acuan normatif	1
3 Istilah dan definisi	3
4 Ketentuan	5
4.1 Umum.....	5
4.2 Penyelidikan lapangan dan laboratorium	5
4.3 Penentuan kategori batuan/tanah	5
4.4 Pendekatan empiris	6
4.4.1 Pemilihan metode penggalian	6
4.4.2 Pemilihan sistem perkuatan	6
4.5 Pendekatan analitis.....	6
5 Perencanaan metode penggalian dan sistem perkuatan terowongan pada media campuran tanah-batuan.....	7
5.1 Penyelidikan lapangan dan laboratorium	8
5.1.1 Penyelidikan lapangan dan laboratorium untuk pendekatan empiris	8
5.1.2 Penyelidikan lapangan dan laboratorium untuk pendekatan analitis.....	9
5.2 Penentuan kategori batuan/tanah	12
5.3 Pendekatan empiris	16
5.3.1 Pemilihan metode penggalian	16
5.3.2 Pemilihan sistem perkuatan	20
5.4 Pendekatan analitis.....	29
Lampiran A	32
Lampiran B	35
Lampiran C.....	39
Lampiran D.....	41
Bibliografi.....	45
Gambar 1 - Diagram alir perencanaan metode penggalian dan sistem perkuatan terowongan pada media campuran tanah-batuan	7
Gambar 2 - Tipikal pola perkuatan dan dinding terowongan	22
Gambar 3 - Mekanisme tegangan yang bekerja saat terjadi penggalian terowongan.....	29
Gambar 4 - Ilustrasi perilaku deformasi pada penggalian terowongan	29
Tabel 1 - Parameter penentuan kategori batuan/tanah	9
Tabel 2 - Pengujian lapangan untuk tanah.....	10
Tabel 3 - Pengujian lapangan untuk batuan.....	10
Tabel 4 - Pengujian geofisika untuk tanah dan batuan.....	11
Tabel 5 - Pengujian laboratorium untuk tanah dan batuan	11
Tabel 6 - Klasifikasi tanah dan batuan	15
Tabel 7 - Metode penggalian dan karakteristiknya	17
Tabel 8 - Kriteria pemilihan jenis perkuatan	20
Tabel 9 - Skema tipikal pola perkuatan dan dinding serta deformasi izin	21
Tabel 10 - Tipikal metode tambahan dan kegunaannya (JSCE, 2006).....	23
Tabel 11 - Ilustrasi metode tambahan dan penjelasannya	24

Prakata

Pedoman metode perencanaan penggalian dan sistem perkuatan terowongan jalan pada media campuran tanah-batuan ini disusun dari hasil kajian ilmiah Litbang terowongan Balai Geoteknik Jalan, Puslitbang Jalan dan Jembatan, serta mengacu dari *Standard Specifications for Tunneling-2006: Mountain Tunnels* (Japan Society of Civil Engineers/JSCE). Pedoman ini diharapkan dapat menjadi acuan untuk perencana, akademisi, pemilik pekerjaan dan para pemangku kepentingan (*stakeholders*) dalam merencanakan penggalian terowongan jalan di media campuran tanah-batuan.

Pedoman ini dipersiapkan oleh Panitia Teknis 91-01 Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil pada Subpanitia Teknis Rekayasa Jalan dan Jembatan 91-01/S2 melalui Gugus Kerja Geoteknik Jalan, Pusat Litbang Jalan dan Jembatan.

Tata cara penulisan disusun mengikuti Pedoman Standardisasi Nasional (PSN) 08:2007 dan dibahas dalam rapat Konsensus yang diselenggarakan pada tanggal 12 September 2014 di Bandung, yang melibatkan para narasumber, pakar dan lembaga terkait.

Pendahuluan

Kondisi geologi Indonesia yang terdiri atas berbagai satuan formasi geologi dengan karakteristik yang berbeda-beda memungkinkan ditemuinya kondisi media campuran tanah-batuan (*mixed-face*) dalam pembangunan suatu terowongan. Kondisi media campuran ini dapat menimbulkan permasalahan khususnya pada stabilitas muka bidang galian. Media campuran umumnya tidak mempunyai kekuatan yang cukup lama untuk menahan beban massanya sendiri (*stand-up time*), sehingga diperlukan perkuatan sebelum dilakukan penggalian terowongan, atau pemasangan sistem perkuatan segera sesaat setelah dilakukan penggalian terowongan. Selain itu, biasanya terdapat aliran air pada media campuran karena ada perbedaan sifat permeabilitas material. Saat penggalian, hal ini juga akan mempengaruhi dan menurunkan stabilitas material yang secara alami sudah memiliki kekuatan menahan beban massanya sendiri yang pendek. Untuk menghadapi hal ini pemasangan perkuatan yang memadai serta pengendalian air yang berkesinambungan perlu dilakukan untuk meningkatkan kekuatan tanah/batuan tersebut.

Sifat-sifat media campuran tanah-batuan dan permasalahan yang dapat timbul pada saat konstruksi, perlu dipahami dengan baik untuk membantu perencanaan/kontraktor ketika merencanakan/membangun terowongan jalan pada kondisi media tersebut. Untuk itu diperlukan suatu pedoman yang dapat digunakan sebagai acuan teknis, sehingga pembangunan terowongan jalan pada media campuran tanah-batuan dapat dilakukan dengan baik.

Metode perencanaan penggalian dan sistem perkuatan terowongan jalan pada media campuran tanah-batuan

1 Ruang lingkup

Pedoman ini menetapkan ketentuan dan prosedur metode perencanaan penggalian dan sistem perkuatan terowongan jalan pada media campuran tanah-batuan, yang meliputi penyelidikan lapangan dan laboratorium, penentuan kategori batuan/tanah dan penentuan metode penggalian dan sistem perkuatan terowongan yang terdiri dari beton semprot, baut batuan, penyangga baja, lantai kerja dan metode tambahan menggunakan pendekatan empiris dan analitis.

2 Acuan normatif

Dokumen referensi di bawah ini harus digunakan dan tidak dapat ditinggalkan untuk melaksanakan pedoman ini.

SNI 03-2437-1991, *Metode pengujian laboratorium untuk menentukan parameter sifat fisika contoh batu*

SNI 03-2455-1991, *Tanah, Metode pengujian laboratorium triaksial A*

SNI 03-2814-1992, *Metode pengujian indeks kekuatan batu dengan beban titik*

SNI 03-3420-1994, *Metode kuat geser langsung tanah tidak terkonsolidasi tanpa drainase*

SNI 03-3637-1994, *Metode pengujian berat isi tanah berbutir halus dengan cetakan benda uji*

SNI 03-4813-1998, *Metode pengujian triaksial untuk tanah kohesif dalam keadaan tanpa konsolidasi dan drainase*

SNI 03-6453-2000, *Metode pengujian kelulusan air untuk lapisan tanah pondasi dengan cara pemompaan di lapangan*

SNI 06-2485-1991, *Metode pengujian laboratorium cepat rambat ultrasonik dan konstanta elastis benda uji batu*

SNI 13-4180-1996, *Penentuan tegangan in situ pada batuan dengan metode rekah hidraulik*

SNI 13-6581-2001, *Penentuan kekerasan batuan dengan uji palu Schmidt*

SNI 13-6584-2001, *Metode identifikasi mineral lempung dengan sinar-X*

SNI 13-6664-2002, *Penentuan modulus deformasi massa batuan dengan uji dilatometer probex-1*

SNI 1965:2008, *Cara uji penentuan kadar air untuk tanah dan batuan*

SNI 1966:2008, *Cara uji penentuan batas plastis dan indeks plastisitas tanah*

SNI 1967:2008, *Cara uji penentuan batas cair tanah*

SNI 2411:2008, *Cara uji kelulusan air bertekanan di lapangan*

SNI 2417:2008, *Cara uji keausan agregat dengan mesin abrasi Los Angeles*

SNI 2435:2008, *Cara uji kelulusan air benda uji tanah di laboratorium dengan tekanan tetap*

SNI 2486:2011, *Cara uji laboratorium kuat tarik benda uji batu dengan cara tidak langsung*

SNI 2528:2012, *Tata cara pengukuran geolistrik wenner untuk eksplorasi air tanah*

SNI 2813:2008, *Cara uji kuat geser langsung tanah terkonsolidasi dan terdrainase*

SNI 2815:2011, *Cara uji tekan triaksial pada batu di laboratorium*

SNI 2818: 2012, *Metode eksplorasi air tanah dengan geolistrik susunan Schlumberger*

SNI 2824:2011, *Metode pengujian geser langsung batu*

SNI 2825:2008, *Cara uji kuat tekan batu uniaksial*

SNI 2826:2008, *Cara uji modulus elastisitas batu dengan tekanan sumbu tunggal*

SNI 2827:2008, *Cara uji penetrasi lapangan dengan alat sondir*

SNI 2436:2008, *Tata cara pencatatan dan identifikasi hasil pengeboran inti*

SNI 3406:2011, *Cara uji sifat tahan legang batu*

SNI 3422:2008, *Cara uji penentuan batas susut tanah*

SNI 3638:2012, *Metode pengujian kuat tekan bebas tanah kohesif*

SNI 6424:2008, *Cara uji potensi pengembangan atau penurunan satu dimensi tanah kohesif*

SNI 7573:2010, *Analisis petrografi dan minegrafi*

Pd T-03.2-2005-A, *Penyelidikan geoteknik untuk fondasi bangunan air, Volume II Pengujian lapangan dan laboratorium*

ASTM D1195 / D1195M – 09, *Standard Test Method for Repetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements*

ASTM D2113-08, *Standard Practice for Rock Core Drilling and Sampling of Rock for Site Investigation*

ASTM D2845-08, *Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock*

ASTM D4044-96(2008), *Standard Test Method for (Field Procedure) for Instantaneous Change in Head (Slug) Tests for Determining Hydraulic Properties of Aquifers*

ASTM D4395-08, *Standard Test Method for Determining In Situ Modulus of Deformation of Rock Mass Using Flexible Plate Loading Method*

ASTM D4428 / D4428M-14, *Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing*

ASTM D4506-13e1, *Standard Test Method for Determining In Situ Modulus of Deformation of Rock Mass Using Radial Jacking Test*

ASTM D4525-13e1, *Standard Test Method for Permeability of Rocks by Flowing Air*

ASTM D4623-08, *Standard Test Method for Determination of In Situ Stress in Rock Mass by Overcoring Method—USBM Borehole Deformation Gauge*

ASTM D4630-96(2008), *Standard Test Method for Determining Transmissivity and Storage Coefficient of Low-Permeability Rocks by In Situ Measurements Using the Constant Head Injection Test*

ASTM D4644-08, *Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks*

ASTM D4645-08, *Standard Test Method for Determination of In-Situ Stress in Rock Using Hydraulic Fracturing Method*

ASTM D4719-07, *Standard Test Methods for Prebored Pressuremeter Testing in Soils*

ASTM D4729-08, *Standard Test Method for In Situ Stress and Modulus of Deformation Using Flatjack Method*

ASTM D4971-08, *Standard Test Method for Determining In Situ Modulus of Deformation of Rock Using Diametrically Loaded 76-mm (3-in.) Borehole Jack*

ASTM D5731-08, *Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications*

ASTM D5753-05(2010), *Standard Guide for Planning and Conducting Borehole Geophysical Logging*

ASTM D5777-00(2011)e1, *Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation*

ASTM D5778-12, *Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils*

ASTM D6032-08, *Standard Test Method for Determining Rock Quality Designation (RQD) of Rock Core*

ASTM D6034-96(2010)e1, *Standard Test Method (Analytical Procedure) for Determining the Efficiency of a Production Well in a Confined Aquifer from a Constant Rate Pumping Test*

ASTM D6167-11, *Standard Guide for Conducting Borehole Geophysical Logging: Mechanical Caliper*

ASTM D6431-99(2010), *Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation*

ASTM D6432-11, *Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation*

ASTM D6635-01(2007), *Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer*

ASTM D7012-14, *Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures*

ASTM D7128-05(2010), *Standard Guide for Using the Seismic-Reflection Method for Shallow Subsurface Investigation*

ASTM D7263-09, *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens*

ASTM D7400-08, *Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing*

ASTM D7625-10, *Standard Test Method for Laboratory Determination of Abrasiveness of Rock Using the CERCHAR Method*

ASTM E794-06(2012), *Standard Test Method for Melting And Crystallization Temperatures By Thermal Analysis*

ASTM G57-06(2012), *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method*

ASTM G187-12a, *Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Two-Electrode Soil Box Method*

3 Istilah dan definisi

Untuk tujuan penggunaan pedoman ini, istilah dan definisi berikut digunakan.

3.1

beton semprot

material perkuatan berupa beton yang disemprotkan dengan peralatan bertekanan tinggi untuk melekat pada permukaan dinding terowongan

3.2

kondisi kualitas batuan (*rock quality designation/RQD*)

penilaian kualitas batuan berdasarkan kondisi keutuhan inti di antaranya

3.3

media

material yang dilalui sepanjang trase terowongan dalam proyek pembangunan terowongan

3.4

media campuran tanah-batuan

adanya dua atau lebih jenis material yang memiliki sifat atau karakteristik yang sangat berbeda pada muka bidang galian dan di belakangnya

3.5

metode konvensional

metode penggalian yang dilakukan tanpa menggunakan mesin di antaranya terowongan, seperti dengan ekskavator, alat pemecah batuan (*breaker*), *road header*

3.6

metode penerowongan (*tunnel driving method*)

suatu metode yang digunakan untuk menggali terowongan seperti dengan peledakan, peralatan mekanis (ekskavator, *breaker*, *road header*), mesin ataupun tenaga manusia dengan pertimbangan utama efisiensi kerja

3.7

metode penggalian

suatu metode yang digunakan untuk membagi segmen muka bidang galian terowongan pada saat penggalian dengan pertimbangan utama adalah stabilitas muka bidang galian (*face*)

3.8

metode tambahan

metode yang digunakan untuk mengamankan bagian muka kerja penggalian dan stabilitas bagian atap terowongan (*crown*), kontrol air masuk atau kontrol penurunan permukaan, ditambahkan pada metode penerowongan pada umumnya

3.9

muka bidang galian

bagian permukaan media yang akan digali

3.10

perkuatan

suatu cara yang memasang suatu struktur baik sebelum maupun setelah kegiatan penggalian, untuk menjaga stabilitas batuan/tanah di sekitar terowongan dan untuk mencegah terjadinya deformasi

3.11

stand-up time

waktu yang dimiliki oleh massa batuan untuk menahan bebannya sendiri sebelum runtuh

3.12

terowongan jalan

terowongan yang dibuat untuk kepentingan lalu lintas

4 Ketentuan

4.1 Umum

- a. Metode penggalian dan sistem perkuatan terowongan harus direncanakan dengan cara yang tepat dengan memanfaatkan kemampuan batuan/tanah menyangga dirinya sendiri, mempertimbangkan karakteristik batuan/tanah, dampak pekerjaan penerowongan terhadap lingkungan sekitar, efek dari konstruksi-konstruksi di sekitar terowongan, gempa, tekanan air tanah, dan efek-efek lain serta kondisi-kondisi desain yang diperlukan.
- b. Pendekatan empiris digunakan pada kategori batuan/tanah A dan B dan pada proyek yang mempunyai kondisi perencanaan yang serupa dengan kondisi yang pernah dibangun.
- c. Pendekatan empiris dan analitis digunakan pada kategori batuan/tanah CI, CII, DI, DII dan E serta pada daerah dengan perilaku kondisi batuan/tanah yang dapat menimbulkan permasalahan dan memerlukan persyaratan perencanaan khusus, seperti:
 - Lokasi proyek yang berdekatan dengan infrastruktur yang telah ada;
 - Kondisi lapisan penutup (*overburden*) yang tipis;
 - Kondisi batuan/tanah yang telah mengalami deformasi dan gaya tekan bumi (*earth pressure*);
 - Kondisi batuan dan tanah yang memiliki karakteristik yang sangat berbeda (campuran tanah-batuan);
 - Terowongan dengan rongga yang besar (*cave in*) dan berpenampang besar.
- d. Hasil analisis menggunakan pendekatan analitis dapat menghasilkan keluaran dengan variasi yang besar tergantung pada kondisi analitisnya, seperti penentuan modelnya, kondisi batasnya, dan nilai-nilai parameter fisik yang dimasukkan. Oleh karena itu, penentuan kondisi analitis dan evaluasi terhadap hasilnya harus dilakukan dengan hati-hati oleh tenaga ahli di bidangnya.

4.2 Penyelidikan lapangan dan laboratorium

- a. Penyelidikan harus dilakukan dengan menggunakan metode dan jumlah titik penyelidikan yang sesuai agar diperoleh karakteristik dan sifat-sifat batuan/tanah yang dapat menggambarkan kondisi bawah permukaan sepanjang trase terowongan. Oleh karena itu, cara dan metode penyelidikan harus konsisten dengan:
 1. ruang lingkup proyek, yaitu: lokasi, ukuran, dan anggaran;
 2. tujuan proyek, yaitu: toleransi risiko, kinerja jangka panjang;
 3. kendala proyek, yaitu: geometri, kemampuan untuk dilaksanakan (*constructability*), dampak pada pihak ketiga, estetika, dan dampak lingkungan.
- b. Pihak-pihak yang terlibat dalam pelaksanaan penyelidikan harus memiliki pemahaman yang sama terhadap parameter-parameter dasar untuk kebutuhan desain.

4.3 Penentuan kategori batuan/tanah

- a. Kondisi batuan/tanah harus diklasifikasikan berdasarkan cara pandang yang komprehensif. Klasifikasi batuan/tanah dilakukan berdasarkan parameter kecepatan gelombang elastis, kondisi geologi (pengaruh air dan faktor litologi, interval dan kondisi diskontinuitas), kondisi inti hasil pengeboran (kondisi kualitas batuan/RQD), faktor kompetensi, serta situasi penerowongan dan batas deformasi
- b. Klasifikasi batuan/tanah pada pedoman ini pada dasarnya dirancang untuk perencanaan terowongan jalan dengan dua lajur atau tiga lajur yang mempunyai lapisan penutup (*overburden*) lebih dari 20 m tetapi kurang dari 500 m.
- c. Klasifikasi batuan/tanah pada pedoman ini tidak dapat diterapkan untuk kasus-kasus khusus seperti batuan/tanah di dekat portal yang terdapat tekanan tanah lokal, daerah dengan potensi tanah longsor dan kasus dengan pembatasan penurunan tanah.

- d. Penggunaan kelas tanah E harus dibatasi untuk lokasi proyek dengan konvergensi sebesar 200 mm atau lebih, dengan karakter litologi khusus (batuan/tanah dengan tekanan tanah yang besar, seperti karena adanya endapan talus yang luas dan zona rekahan akibat patahan yang luas).

4.4 Pendekatan empiris

- a. Pendekatan empiris yang digunakan pada pedoman ini mengacu pada tipikal lebar penampang melintang 12,5 m hingga 14 m. Untuk lebar penampang melintang lebih besar dari 14 m, pendekatan empiris tidak dapat digunakan.
- b. Pendekatan empiris yang digunakan dalam menentukan pemilihan metode penggalian dan sistem perkuatan didasarkan pada kategori batuan/tanah yang tercantum dalam pedoman ini. Untuk kondisi batuan/tanah yang tidak tercakup pada pedoman ini, maka pendekatan empiris tidak dapat digunakan.

4.4.1 Pemilihan metode penggalian

- a. Pemilihan metode penggalian untuk media campuran tanah-batuan harus dilakukan secara bertahap agar distribusi tekanan tanah tidak terkonsentrasi dan terdistribusi menjadi lebih merata, serta dapat mencegah terjadinya deformasi yang berlebihan.
- b. Pemilihan metode penggalian untuk media campuran tanah-batuan harus mempertimbangkan kemungkinan digunakannya kombinasi metode penerowongan untuk mengantisipasi perubahan dan penyesuaian pelaksanaan penggalian.
- c. Pemilihan metode penggalian harus ditentukan oleh tenaga ahli terkait dan berdasarkan hasil kajian yang komprehensif.

4.4.2 Pemilihan sistem perkuatan

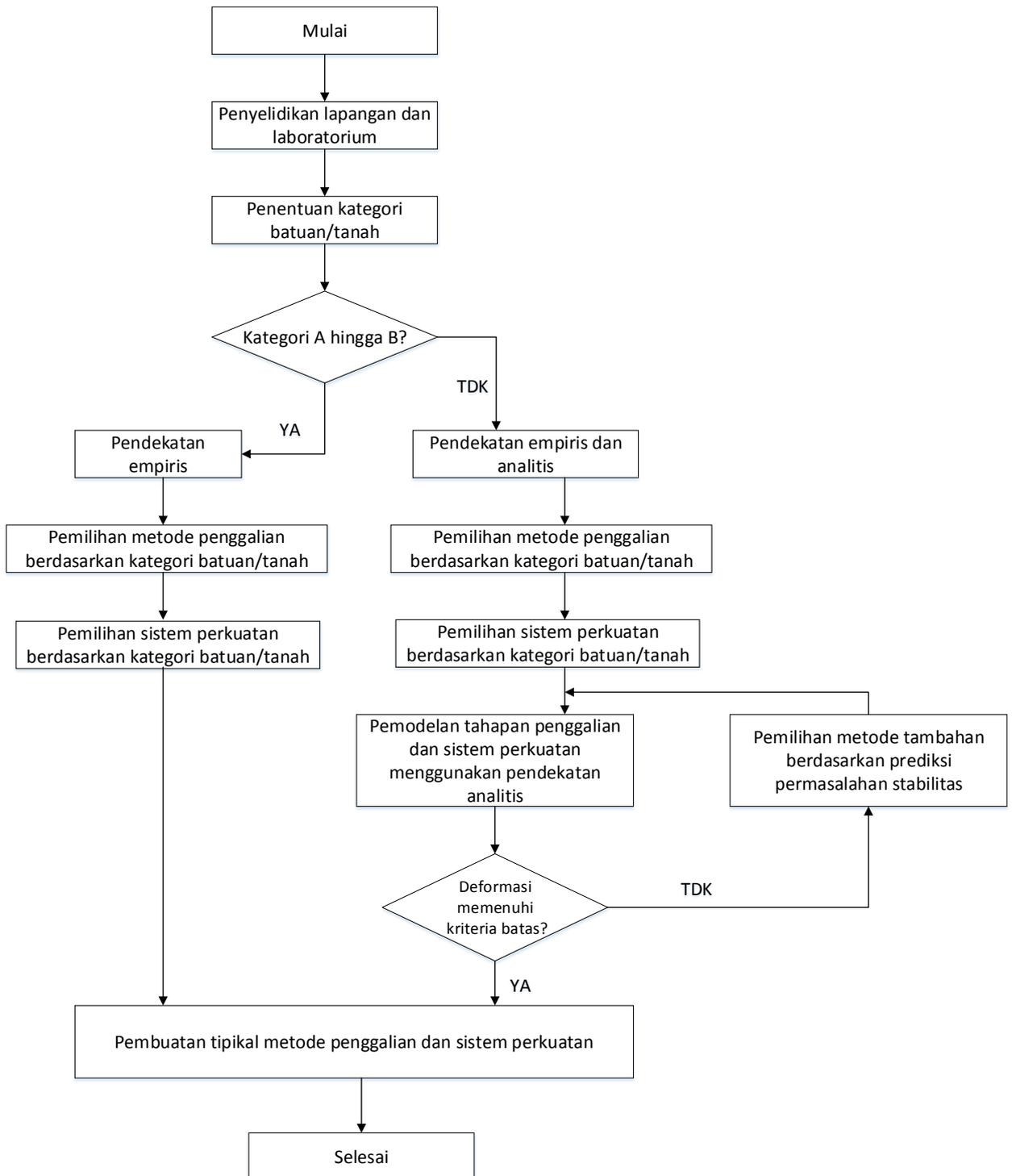
- a. Perkuatan terowongan harus direncanakan agar terowongan dan media disekitarnya menjadi stabil. Oleh karena itu, perkuatan terowongan harus dapat bekerja dan terintegrasi dengan media disekitarnya untuk menahan tekanan dan pergerakan yang diakibatkan oleh penggalian terowongan. Perkuatan terowongan standar terdiri dari beton semprot, baut batuan dan perkuatan baja. Untuk perencanaan perkuatan terowongan yang efektif, harus dilakukan analisis terhadap karakteristik masing-masing perkuatan, dan penerapan satu jenis perkuatan atau kombinasi.
- b. Dalam memilih dan menentukan metode tambahan yang akan digunakan, efek, efisiensi biaya, dan periode kerjanya harus dipertimbangkan. Begitu juga evaluasi yang tepat terhadap kesesuaian metode tambahan dengan metode penggalian dan pola perkuatan standar.
- c. Pemilihan sistem perkuatan harus ditentukan oleh tenaga ahli terkait dan berdasarkan hasil kajian yang komprehensif.

4.5 Pendekatan analitis

- a. Perencanaan dengan pendekatan analitis harus dilakukan dengan mempertimbangkan sifat-sifat batuan/tanah seperti parameter kekuatan, parameter deformasi, stabilitas muka bidang galian dan aliran air.
- b. Tekanan tanah (*earth pressure*) yang harus diperhitungkan meliputi tekanan yang bekerja pada perkuatan atau dinding terowongan akibat batuan/tanah yang mengalami pelepasan dan tekanan pada perkuatan akibat perpindahan yang terjadi pada tahap penggalian.
- c. Analisis metode penggalian dan sistem perkuatan dengan pendekatan analitis harus dilakukan oleh tenaga ahli terkait.

5 Perencanaan metode penggalian dan sistem perkuatan terowongan pada media campuran tanah-batuan

Secara garis besar langkah-langkah dalam perencanaan metode penggalian dan sistem perkuatan terowongan berdasarkan kategori batuan/tanah ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 - Diagram alir perencanaan metode penggalian dan sistem perkuatan terowongan pada media campuran tanah-batuan

5.1 Penyelidikan lapangan dan laboratorium

Penyelidikan lapangan dan laboratorium dilakukan untuk mendapatkan parameter-parameter desain sebagai dasar dalam penentuan metode penggalian dan sistem perkuatan terowongan menggunakan pendekatan empiris dan analitis.

Adapun tujuan penyelidikan bawah permukaan adalah:

- a. untuk mendapatkan profil bawah permukaan (perlapisan, struktur geologi dan tipe batuan/tanah);
- b. menentukan sifat-sifat material tanah dan batuan serta karakteristik massa tanah dan batuan;
- c. mengidentifikasi anomali geologi dan zona patahan;
- d. mengidentifikasi kondisi hidrogeologi (muka air tanah, akuifer, tekanan hidrostatik, dll.);
- e. mengidentifikasi potensi risiko konstruksi.

Penyelidikan bawah permukaan secara tipikal terdiri dari pengeboran, pengambilan contoh uji, pengujian lapangan (*in situ*), penyelidikan geofisika dan uji laboratorium. Prinsip utama penyelidikan bawah permukaan adalah:

- a. Pengeboran digunakan untuk mengidentifikasi perlapisan bawah permukaan dan untuk mendapatkan contoh uji terganggu dan tidak terganggu untuk klasifikasi visual dan pengujian laboratorium.
- b. Pengujian lapangan digunakan untuk mendapatkan sifat-sifat indeks dan parameter lainnya melalui pengujian batuan/tanah di lokasi proyek untuk menghindari terjadinya gangguan pada saat pengambilan contoh uji, transportasi dan penanganan contoh uji pada proses pengeboran.
- c. Pengujian geofisika dilakukan untuk mendapatkan informasi (perlapisan dan karakteristik umum lainnya) pada area yang luas untuk membantu mendefinisikan perlapisan dan mengidentifikasi lokasi yang sesuai untuk dilakukan pengeboran.
- d. Pengujian laboratorium dapat menghasilkan sifat-sifat indeks dan parameter kekuatan untuk kebutuhan perencanaan berdasarkan contoh tanah atau batuan yang didapatkan dari pengeboran.

5.1.1 Penyelidikan lapangan dan laboratorium untuk pendekatan empiris

Perencanaan untuk metode penggalian dan perkuatan dengan pendekatan empiris ditentukan berdasarkan kategori batuan/tanahnya. Berdasarkan diagram alir perencanaan metode penggalian dan perkuatan pada Gambar 1. Parameter-parameter yang digunakan untuk menentukan kategori batuan/tanah pada pendekatan empiris ditunjukkan pada Tabel 1. Langkah-langkah untuk menentukan kategori batuan/tanah akan dibahas pada bagian selanjutnya (5.1.3).

Tabel 1 - Parameter penentuan kategori batuan/tanah

Jenis pengujian	Parameter yang didapatkan	Standar pengujian
<ul style="list-style-type: none"> • Uji kuat tekan bebas tanah • Uji kuat tekan bebas batuan 	Kuat tekan bebas batuan/tanah, q_u (kN/m ²)	<ul style="list-style-type: none"> • SNI 3638:2012 • SNI 2825:2008
Uji berat isi tanah	Berat isi, γ (kN/m ³)	<ul style="list-style-type: none"> • SNI 03-3637-1994
Penyelidikan geofisika: <ul style="list-style-type: none"> • Uji seismik refraksi • Uji crosshole • Uji downhole • Uji seismik refleksi 	Kecepatan gelombang elastis batuan/tanah, V_p (km/detik)	<ul style="list-style-type: none"> • ASTM D5777 - 2011 • ASTM D4428 / D4428M - 14 • ASTM D7400 - 08 • ASTM D7128 – 05(2010)
Uji laboratorium cepat rambat ultrasonik dan konstanta elastik	Kecepatan gelombang ultrasonik contoh uji, u_p (km/detik)	<ul style="list-style-type: none"> • SNI 06-2485-1991
Pengambilan contoh batuan inti dan Penamaan Mutu Batu, PMB (<i>Rock Quality Designation</i> , RQD)	PMB/RQD	SNI 2436:2008

Parameter kecepatan gelombang elastis dan faktor kompetensi merupakan salah satu pendekatan yang dapat digunakan dalam penentuan klasifikasi batuan/tanah. Meski demikian, karena pendekatan yang dihasilkan cukup kasar, maka pendekatan tersebut merupakan penunjang dari penyelidikan geologi lokal, pengeboran teknik dan pengambilan contoh batuan/tanah.

5.1.2 Penyelidikan lapangan dan laboratorium untuk pendekatan analitis

Pendekatan analitis digunakan sebagai metode untuk memeriksa kondisi tegangan dan interaksi antara kekuatan batuan dan tanah sekitarnya akibat penggalian terowongan, dalam suatu bentuk model geometri sederhana. Beberapa parameter tanah diperlukan dalam perhitungan analitis untuk menganalisa dan mengevaluasi kondisi dan interaksi batuan/tanah. Pada Tabel 2 hingga Tabel 5 diperlihatkan parameter-parameter batuan/tanah yang diperlukan untuk pendekatan analitis.

Tabel 2 - Pengujian lapangan untuk tanah

Metode	Tipe tanah yang sesuai	Parameter yang didapatkan	Standar pengujian																		
<i>Electric cone penetrometer</i> (CPT)	Lanau, pasir, lempung dan gambut	<ul style="list-style-type: none"> • Pendugaan tipe tanah dan perlapisan tanah • Pasir: ϕ', D_r, σ_{ho}' • Lempung: s_u, σ_p' 	SNI 2827:2008																		
<i>Piezocone penetrometer</i> (CPTu)	Lanau, pasir, lempung dan gambut	<ul style="list-style-type: none"> • Pendugaan tipe tanah dan perlapisan tanah • Pasir: ϕ', D_r, σ_{ho}', u_0 dan muka air tanah • Lempung: s_u, σ_p', c_h, k_h, OCR 	ASTM D5778-12																		
<i>Flat Plate Dilatometer</i> (DMT)	Lanau, pasir, lempung dan gambut	<ul style="list-style-type: none"> • Pendugaan tipe tanah dan perlapisan tanah, berat isi tanah • Pasir: ϕ', E, D_r, m_v • Lempung: s_u, σ_p', K_o, m_v, E, c_h, k_h 	ASTM D6635-1(2007)																		
Pre-bored pressuremeter (PMT)	Lempung, lanau, gambut, beberapa jenis pasir dan kerikil	E , G , m_v , s_u	ASTM D4719 – 07																		
Catatan: <table style="width:100%; border:none;"> <tr> <td style="width:33%;">ϕ' adalah sudut geser efektif</td> <td style="width:33%;">G_{max} adalah modulus geser regangan kecil</td> </tr> <tr> <td>D_r adalah densitas relatif</td> <td>G adalah modulus geser</td> </tr> <tr> <td>σ_{ho}' adalah tekanan efektif horisontal insitu</td> <td>E_{max} adalah modulus young regangan kecil</td> </tr> <tr> <td>S_u adalah kuat geser niralir</td> <td>E adalah modulus young</td> </tr> <tr> <td>σ_p' adalah tekansan pre-konsolidasi</td> <td>ρ_{tot} adalah total densitas</td> </tr> <tr> <td>c_h adalah koefisien konsolidasi horisontal</td> <td>e_o adalah rasio rongga insitu</td> </tr> <tr> <td>k_h adalah konduktivitas hidrolik horisontal</td> <td>m_v adalah koefisien kompresibilitas volumetrik</td> </tr> <tr> <td>OCR adalah rasio konsolidasi berlebih</td> <td>K_o adalah koefisien tekanan tanah saat diam</td> </tr> <tr> <td>V_s adalah kecepatan gelombang geser</td> <td>S_t adalah sensitivitas</td> </tr> </table>				ϕ' adalah sudut geser efektif	G_{max} adalah modulus geser regangan kecil	D_r adalah densitas relatif	G adalah modulus geser	σ_{ho}' adalah tekanan efektif horisontal insitu	E_{max} adalah modulus young regangan kecil	S_u adalah kuat geser niralir	E adalah modulus young	σ_p' adalah tekansan pre-konsolidasi	ρ_{tot} adalah total densitas	c_h adalah koefisien konsolidasi horisontal	e_o adalah rasio rongga insitu	k_h adalah konduktivitas hidrolik horisontal	m_v adalah koefisien kompresibilitas volumetrik	OCR adalah rasio konsolidasi berlebih	K_o adalah koefisien tekanan tanah saat diam	V_s adalah kecepatan gelombang geser	S_t adalah sensitivitas
ϕ' adalah sudut geser efektif	G_{max} adalah modulus geser regangan kecil																				
D_r adalah densitas relatif	G adalah modulus geser																				
σ_{ho}' adalah tekanan efektif horisontal insitu	E_{max} adalah modulus young regangan kecil																				
S_u adalah kuat geser niralir	E adalah modulus young																				
σ_p' adalah tekansan pre-konsolidasi	ρ_{tot} adalah total densitas																				
c_h adalah koefisien konsolidasi horisontal	e_o adalah rasio rongga insitu																				
k_h adalah konduktivitas hidrolik horisontal	m_v adalah koefisien kompresibilitas volumetrik																				
OCR adalah rasio konsolidasi berlebih	K_o adalah koefisien tekanan tanah saat diam																				
V_s adalah kecepatan gelombang geser	S_t adalah sensitivitas																				

Sumber: FHWA (2009)

Tabel 3 - Pengujian lapangan untuk batuan

Metode pengujian	Parameter yang didapatkan	Standar pengujian
<i>Hydraulic fracturing</i>	Tegangan lapangan (<i>in situ stress</i>)	SNI 13-4180-1996
<i>Overcoring</i>		ASTM D4623 – 08
<i>Flat Jack test</i>		ASTM D4729 – 08
<i>Plate bearing test</i>	Modulus deformasi	ASTM D1195 / D1195M – 09
<i>Borehole dilatometer test</i>		SNI 13-6664-2002
<i>Flat Jack test</i>		ASTM D4729 – 08
<i>Radial jacking test</i>		ASTM D4506 - 13e1
<i>Pressuremeter</i>		Pd T-03.2-2005-A
<i>Dynamic measurement</i>		ASTM D4395 – 08 ASTM D4971 – 08
<i>Acoustic televiwing</i>		Pencitraan dan ketidakseragaman (<i>discontinuities</i>)
<i>Borehole video televiwing</i>	ASTM D5753 - 05(2010)	
<i>Slug test</i>	Permeabilitas	ASTM D4044 - 96(2008)
<i>Packer test</i>		SNI 2411:2008
<i>Pumping test</i>		SNI 03-6453-2000

Sumber: FHWA (2009)

Tabel 4 - Pengujian geofisika untuk tanah dan batuan

Metode pengujian	Informasi yang didapatkan	Standar pengujian
Seismik refraksi	<ul style="list-style-type: none"> • Perlapisan tanah atau batuan • Kedalaman batuan dasar • Kedalaman muka air tanah • Topografi batuan dasar • Perubahan litologi lateral tanah atau batuan 	ASTM D5777 - 2011
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Resistivity</i> elektrik dengan metode Wenner • <i>Resistivity</i> elektrik dengan metode Schlumberger 	<ul style="list-style-type: none"> • Kedalaman batuan dasar • Kedalaman muka air tanah • Lokasi batuan dengan rekahan tinggi atau zona patahan • Rongga • Sisipan pasir, bongkah atau material organik • Batuan dan tanah yang memiliki kelulusan air (<i>permeable rock</i>) • Perubahan litologi lateral tanah atau batuan 	<p>SNI 2528:2012</p> <p>SNI 2818:2012</p>
<i>Ground penetrating radar</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Kedalaman batuan dasar • Kedalaman muka air tanah • Rongga 	ASTM D6432 – 11
Propagasi gelombang seismik (<i>Seismic wave propagation</i>): <i>cross-hole, up-hole atau down-hole dan parallel seismic.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Perlapisan tanah atau batuan • Kedalaman batuan dasar • Sisipan pasir, bongkah atau material organik • Batuan dan tanah yang memiliki kelulusan air (<i>permeable rock</i>) 	Pd T-03.2-2005-A

Sumber: FHWA (2009)

Tabel 5 - Pengujian laboratorium untuk tanah dan batuan

Metode pengujian	Parameter yang didapatkan	Standar pengujian
Densitas	Sifat-sifat indeks	a. SNI 03-3637-1994
a. Tanah		b. SNI 03-2437-1991
b. Batuan		SNI 03-2437-1991
Porositas		SNI 1965:2008
Kadar air		SNI 3406:2011
<i>Slake durability</i>		SNI 6424:2008
<i>Swelling index</i>		SNI 03-2814-1992
<i>Point load index</i>		a. SNI 1966:2008, SNI 1967:2008, SNI 3422:2008
Konsistensi (<i>hardness</i>)		b. SNI 13-6581-2001
a. Tanah		ASTM D7625 – 10
b. Batuan	SNI 2417:2008	
<i>Abrasivity</i>	Kekuatan	a. SNI 3638:2012
Kuat tekan uniaksial		b. SNI 2825:2008
a. Tanah		a. SNI 03-2455-1991, SNI 03-4813-1998
b. Batuan		b. SNI 2815:2011
Kuat tarik		SNI 2486:2011
Kuat geser	Kuat geser	
a. Tanah	a. SNI 03-3420-1994, SNI 2813:2008	
b. Batuan	b. SNI 2824:2011	

Tabel 5 - Pengujian laboratorium untuk tanah dan batuan (lanjutan)

Metode pengujian	Parameter yang didapatkan	Standar pengujian
Modulus elastisitas a. Tanah b. Batuan	Kemampuan berdeformasi	a. SNI 03-2455-1991, SNI 03-4813-1998 b. SNI 2826:2008
Rasio Poisson a. Tanah b. Batuan		a. SNI 03-2455-1991, SNI 03-4813-1998 b. SNI 2826:2008
Permeabilitas a. Tanah b. Batuan	Koefisien permeabilitas atau kelulusan air	a. SNI 2435:2008 b. ASTM D4525 - 13e1
Analisis petrografi (<i>thin-sections analysis</i>)	Mineralogi dan ukuran butir	SNI 7573:2010
<i>Differential thermal analysis</i>		ASTM E794-06(2012)
<i>X-ray diffraction</i>		SNI 13-6584-2001

Sumber: FHWA (2009)

5.2 Penentuan kategori batuan/tanah

Klasifikasi batuan/tanah dibagi menjadi menjadi tujuh kelas, dan penggunaannya harus mempertimbangkan beberapa hal berikut ini:

a. Kecepatan gelombang elastis (km/detik).

Beberapa pertimbangan yang harus diperhatikan dalam penerapan kecepatan gelombang elastis:

- i. Efektivitas eksplorasi gelombang elastis praktis terbatas hingga kedalaman sekitar 100 m, karena panjang lintasan survei yang diperlukan adalah 5 hingga 6 kali kedalaman penyelidikan, dengan asumsi kekerasan massa batuan meningkat dari permukaan ke arah kedalaman (kecepatan gelombang elastis meningkat). Jika yang terjadi sebaliknya pendekatan ini tidak dapat digunakan.
- ii. Pada media yang telah mengalami tekanan/lipatan seperti serpih, batu sabak (*slate*), dan sekis (*schist*) atau batuan dengan banyak retakan-retakan minor, batuan tidak kompak (*loosen*). Pengelompokan kelas batuan/tanah untuk daerah seperti ini dapat dinilai satu peringkat lebih rendah daripada kelas awal yang diberikan dari hasil eksplorasi gelombang elastis.
- iii. Jika kecepatan gelombang elastis (kecepatan gelombang P) dan nilai faktor kompetensi berada di antara dua kelas, evaluasi harus berdasarkan pada karakteristik topografi, kondisi batuan/tanah, dan lain-lain.
- iv. Pada kondisi kedalaman lapisan penutup dan ketebalan lapisan di sisi terowongan kecil, seperti area di dekat portal dan sungai kecil, maka nilai kecepatan gelombang elastis dan kelas massa batuan yang ditunjukkan dapat dinilai lebih rendah (diturunkan) dari kelas awal.
- v. Jika batuan/tanah dalam jangkauan sekitar 15 m di atas rencana elevasi terowongan terdiri atas lapisan yang memiliki lebih dari satu kecepatan tunggal, maka digunakan kecepatan elastis yang paling rendah.
- vi. Perhatian khusus diperlukan pada lokasi dengan kedalaman lapisan penutup kecil karena hasil pengujian yang diperoleh dapat bervariasi dan mengakibatkan hasil analisis yang salah.
- vii. Untuk zona patahan dan rekahan, kriteria lain seperti arah, tebal dan kedalaman zona patahan juga harus dipertimbangkan selain kecepatan gelombang elastis.
- viii. Jika pengujian kecepatan gelombang elastis di dalam terowongan dilakukan pada saat konstruksi, data ini harus digunakan untuk mengkonfirmasi kelas massa batuan, dan jika perlu perubahan desain dapat dilakukan.

- b. Kondisi batuan/tanah
Perilaku batuan/tanah saat penggalian terowongan dipengaruhi oleh kekuatan fragmen batuan. Berikut ini adalah parameter yang digunakan dalam penilaian kondisi batuan/tanah:
- i. Litologi.
Litologi ditentukan berdasarkan kekuatan batuan/tanah secara langsung dan kuantitatif melalui uji laboratorium dari sampel pengeboran inti. Selama penggalian perlu dilakukan uji kuat tekan tidak terkekang (*unconfined compressive strength test*), uji beban titik (*point loading test*), uji pukul (*hammering test*) dalam menilai kekuatan batuan/tanah.
 - ii. Pengaruh air tanah.
Kekuatan batuan/tanah dapat menurun karena pengaruh air tanah, sehingga kondisi tersebut harus dipertimbangkan dengan memperhitungkan struktur terowongan dan kesulitan dalam konstruksi.
- c. Kondisi diskontinuitas.
Kuat geser suatu massa batuan ditentukan oleh geometri diskontinuitas dan jenis material zat pengisi celah permukaan diskontinuitas. Kekasaran diskontinuitas (geometri dan permukaan gelincir) dan material pengisi seperti lempung, serta evaluasi panjang (kontinuitas), lebar (jarak) dan kondisi pelapukan harus dipertimbangkan secara komprehensif.
- d. Jarak antara permukaan diskontinuitas.
Jarak antara permukaan diskontinuitas diwakili oleh garis retakan yang berkembang secara teratur dalam suatu stratifikasi, *schistosity* dan kekar. Ketidakteraturan retakan pada muka bidang galian dapat menimbulkan risiko terpisah dan jatuhnya blok-blok batuan karena adanya celah.
- e. Pengeboran inti (kondisi inti, RQD)
Hasil survei dari pengeboran inti digunakan untuk mengevaluasi kekuatan fragmen batuan, kondisi diskontinuitas, dan celah/rekahan. Kondisi pengeboran inti sulit untuk digunakan sebagai standar kriteria penilaian karena nilai RQD dipengaruhi oleh teknologi pengeboran dan diameternya. Namun, masih bisa digunakan untuk standar penilaian secara kasar. Standar ini berlaku untuk sampel inti bor yang diambil dengan tabung inti ganda pengeboran berdiameter luar 66 mm.
- f. Faktor kompetensi.
Faktor kompetensi didapatkan dengan menggunakan Persamaan (1) sebagai berikut:

$$\text{Faktor kompetensi} = q_u / (\gamma \cdot H) \quad (1)$$

Keterangan:

- q_u adalah kuat tekan bebas batuan/tanah (kN/m²);
 γ adalah berat isi batuan/tanah (kN/m³);
 H adalah tebal lapisan penutup (m).

Untuk kondisi batuan dengan rekahan, maka kekuatan batuan-semu (q_u') dihitung menggunakan Persamaan (2) sebagai berikut:

$$q_u' = (V_p / U_p)^2 \cdot q_u \quad (2)$$

Keterangan:

- V_p adalah kecepatan gelombang elastis batuan (gelombang P, km/detik);
 U_p adalah kecepatan gelombang ultrasonik contoh uji (gelombang P, km/detik);
 q_u adalah kuat tekan bebas batuan/tanah (kN/m²).

- g. Situasi penggalian terowongan dan titik referensi pergerakan.
Pergerakan harus diukur sedini mungkin segera setelah pengangkutan material galian (sekurang-kurangnya 3 jam atau kurang). Penentuan kategori kelas dapat dikoreksi,

dengan mempertimbangkan hubungan antara sumbu terowongan dan arah/inklinasi diskontinuitas dalam penggalian muka bidang galian selama tahap konstruksi.

h. Jenis batuan yang memerlukan perhatian khusus

Jenis batuan berikut ini harus diamati karena seringkali menyebabkan masalah dalam pekerjaan penerowongan. Jenis batuan ini dapat diberi peringkat yang lebih rendah daripada kelas aslinya pada beberapa kasus, yaitu:

- i) serpentin dan batuan yang telah mengalami serpentinisasi, batu lumpur (*mudstone*), serpih, tuf dan endapan piroklastik yang mudah memburuk kondisinya karena air, sehingga memerlukan perhatian yang menyeluruh.
- ii) batuan diabas, amfibolit, peridotit, dan gabro yang mengalami serpentinisasi.
- iii) serpentin, propilit, sekis hitam, batu lumpur dan tuf harus diturunkan menjadi kelas tanah DII atau E jika batuan ini bersifat mengembang.

Tabel 6 - Klasifikasi tanah dan batuan

Kategori tanah/batuan	Jenis batuan	Nama batuan yang mewakili	Kecepatan gelombang elastik (Vp, km/detik)						Kondisi geologi			Kondisi inti pengeboran	Faktor kompetensi tanah/batuan	Situasi penggalian terowongan dan standar pergerakan
			1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	Pengaruh oleh air dan karakter litologi	Interval diskontinuitas	Kondisi diskontinuitas			
A		Batuan metamorf, batuan plutonik, batuan Paleozoikum dan Mesozoikum, batuan intrusi vertikal (dike), batuan Tersier & lapisan bawah diluvial, dengan kondisi batuan sangat bagus							<ul style="list-style-type: none"> Batuan sangat keras dan segar, masif dan menerus dengan hampir tidak ada retakan dan bersifat stabil. Tidak rusak karena air. 	Interval retakan 100-50 atau lebih		<ul style="list-style-type: none"> Inti pengeboran umumnya berkondisi 90% atau lebih, dalam bentuk silinder yang hampir sempurna. Mempunyai panjang 20cm atau lebih, termasuk serpihan kecil. Nilai RQD 80 atau lebih. 	-----	Kondisi sangat baik, tidak ada kehilangan tekanan tanah dalam periode yang lama.
B	H Masif	Granit, granodiorit, Porfiri kuarsa, batu tanduk (<i>hornfels</i>)							<ul style="list-style-type: none"> Batuan sangat keras dan segar atau terlihat tanda-tanda sedikit lapuk. Kondisi batuan tidak terlihat retak-retak karena air. 	Interval retakan (<i>joint</i>) rata-rata sekitar 50 cm.	<ul style="list-style-type: none"> Hampir tidak memiliki cermin sesar dan milonit pada diskontinuitas. Diskontinuitas hampir tertutup. 	<ul style="list-style-type: none"> Bentuk inti pengeboran menunjukkan potongan-potongan yang besar, silinder atau batang pendek, panjang inti umumnya berkisar 10-20 cm, namun ada juga panjang inti 5 cm. Nilai RQD lebih dari 70. 	-----	<ul style="list-style-type: none"> Kekuatan batuan lebih besar daripada beban yang disebabkan oleh penggalian terowongan. Kondisi diskontinuitas baik, dan berkurangnya kekuatan ikatan dalam batuan (<i>looseness</i>) karena penggalian terowongan hampir tidak terjadi. Jatuhan batuan dari penggalian muka bidang terowongan jarang terjadi, dan konvergensi yang terjadi karena penggalian menimbulkan deformasi elastis sekitar 15 mm atau kurang. Kemampuan penyanggaan muka bidang galian (<i>cutting face stands up</i>).
	M Masif	Andesit, basal, riolit, dasit												
	L Masif	Batupasir atau konglomerat Tersier												
	M Berlapis	Batu sabak (<i>slate</i>), Serpih Paleozoikum & Mesozoikum												
	L Berlapis	Sekis hitam, sekis hijau												
C I	H Masif	Granit, granodiorit, porfiri kuarsa, batu tanduk							<ul style="list-style-type: none"> Batuan relatif keras dan segar atau terlihat tanda-tanda sedikit lapuk. Batuan lunak yang relatif terkonsolidasi. Kondisi batuan tidak terlihat retak-retak karena air. 	Interval retakan rata-rata sekitar 30 cm.	<ul style="list-style-type: none"> Memiliki sedikit cermin sesar dan milonit pada diskontinuitas. Meskipun diskontinuitas terbuka sebagian, lebarnya kecil. 	<ul style="list-style-type: none"> Panjang inti umumnya berkisar 5-20 cm, namun terdapat juga dengan panjang on 5 cm atau kurang. Nilai RQD 40-70. 	-----	<ul style="list-style-type: none"> Kekuatan batuan lebih besar daripada beban yang disebabkan oleh penerowongan. Kondisi diskontinuitas baik, dan berkurangnya kekuatan ikatan dalam batuan karena penerowongan terjadi sebagian. Sebagian jatuhnya batuan disepanjang diskontinuitas yang mudah tergelincir relatif jarang terjadi, dan konvergensi karena penggalian menimbulkan deformasi elastis sekitar 15-20 mm. Kemampuan penyanggaan muka bidang galian (<i>cutting face stands up</i>)
	M Masif	Andesit, basal, riolit, dasit												
	L Masif	Batupasir atau konglomerat Tersier												
	M Berlapis	Batu sabak, Serpih Paleozoikum & Mesozoikum												
	L Berlapis	Sekis hitam, sekis hijau												
C II	H Masif	Granit, granodiorit, porfiri kuarsa, batu tanduk							<ul style="list-style-type: none"> Batuan relatif keras dan segar atau terlihat tanda-tanda sedikit lapuk. Batuan menjadi agak lunak akibat pelapukan dan alterasi. Batuan lunak yang relatif terkonsolidasi. Terlihat sedikit retak-retak atau lepas-lepas karena air. 	Interval retakan rata-rata sekitar 20 cm.	<ul style="list-style-type: none"> Memiliki cermin sesar dan milonit pada diskontinuitas. Bukan diskontinuitas bertambah besar, begitu juga dengan lebar diskontinuitas. Batuan dengan pergeseran kecil, dan lebar yang sempit. 	<ul style="list-style-type: none"> Panjang inti umumnya 10 cm atau kurang, dan dengan banyak potongan-potongan berukuran 5 cm atau kurang. Nilai RQD 10-40. 	-----	<ul style="list-style-type: none"> Meskipun kekuatan batuan tidak lebih besar daripada beban yang disebabkan oleh penerowongan, tetapi masih dalam rentang deformasi plastis. Karena kondisi diskontinuitas buruk, bahkan apabila kekuatan batuan besar, blok batuan cenderung jatuh sepanjang diskontinuitas yang mudah tergelincir dan berkurangnya kekuatan ikatan dalam batuan karena penerowongan meningkat. Apabila kekuatan batuan lebih kecil daripada beban yang mempengaruhinya, konvergensi karena penggalian dicapai pada sekitar 30 mm yang merupakan batas elasto-plastisitas, namun konvergensi belum berakhir, hingga muka bidang galian terpisah pada pergerakan 2 kali diameter terowongan (2D). Kemampuan penyanggaan muka bidang galian (<i>cutting face stands up</i>)
	M Masif	Andesit, basal, riolit, dasit												
	L Masif	Batupasir atau konglomerat Tersier												
	M Berlapis	Batu sabak, Serpih Paleozoikum & Mesozoikum												
	L Berlapis	Sekis hitam, sekis hijau												
D I	H Masif	Granit, granodiorit, porfiri kuarsa, batu tanduk							<ul style="list-style-type: none"> Kondisi batuan sebagian masih segar, tetapi umumnya batuan mengalami pelapukan dan alterasi yang kuat. Perlapisan dan foliasi (<i>schistosity</i>) terlihat sangat jelas. Interval diskontinuitas sekitar rata-rata 10 cm atau kurang, dan umumnya terbuka. Diskontinuitas memiliki lebar yang besar dan umumnya merupakan cermin sesar (<i>slickenside</i>) and telah mengalami milonitasasi (<i>fault clay</i>). Batuan di dalam patahan kecil yang sempit dan berisi lempung. Material tanah bercampur dengan banyak batu apung, talus, dll. Terlihat retak-retak atau lepas-lepas dengan sangat jelas karena air. 	Interval retakan rata-rata sekitar 10 cm atau kurang, dan umumnya terbuka.	<ul style="list-style-type: none"> Memiliki cermin sesar dan milonit pada diskontinuitas. Bukan diskontinuitas bertambah besar, begitu juga dengan lebar diskontinuitas. Batuan dengan pergeseran kecil, dan lebar yang sempit. 	<ul style="list-style-type: none"> Inti hasil pengeboran berbentuk potongan-potongan kecil, tetapi terkadang berbentuk lempung, atau pasir yang tercampur dengan pecahan batuan. Nilai RQD 10 atau lebih kecil. 	4 - 2	<ul style="list-style-type: none"> Meskipun kekuatan batuan lebih besar daripada beban yang disebabkan oleh penerowongan, deformasi plastis dan deformasi elastis terjadi sebagian. Karena buruknya kondisi diskontinuitas, bahkan jika kekuatan batuan cukup memadai untuk memperbaiki deformasi plastis, berkurangnya kekuatan ikatan batuan karena penerowongan meningkat sepanjang diskontinuitas dan mudah tergelincir. Apabila kekuatan batuan lebih kecil daripada beban yang mempengaruhinya, konvergensi karena penggalian dicapai pada sekitar 30-60 mm tanpa kasus dimana penutupan lantai kerja lebih awal dilakukan, dan konvergensi hampir berakhir, hingga muka galian terpisah pada pergerakan 2 kali diameter terowongan (2D). Muka galian tidak stabil, dan diperlukan penggalian cincing (<i>ring cuts</i>) and mengaplikasikan beton semprot pada muka bidang galian sesuai dengan kondisi tanah/ground.
	M Masif	Andesit, basal, riolit, dasit												
	L Masif	Batupasir atau konglomerat Tersier												
	M Berlapis	Batu sabak, Serpih Paleozoikum & Mesozoikum												
	L Berlapis	Sekis hitam, sekis hijau												
D II	H Masif	Granit, granodiorit, porfiri kuarsa, batu tanduk							<ul style="list-style-type: none"> Sesar, daerah patahan, daerah rombakan lereng besar, dll. Mengandung formasi lempung dengan tekanan tanah tidak simetris. Perlunakan akibat perusakan oleh air. 	Interval retakan rata-rata sekitar 10 cm atau kurang, dan umumnya terbuka.	<ul style="list-style-type: none"> Memiliki cermin sesar dan milonit pada diskontinuitas. Bukan diskontinuitas bertambah besar, begitu juga dengan lebar diskontinuitas. Batuan dengan pergeseran kecil, dan lebar yang sempit. 	<ul style="list-style-type: none"> Inti hasil pengeboran berbentuk potongan-potongan kecil, tetapi terkadang berbentuk lempung, atau pasir yang tercampur dengan pecahan batuan. Nilai RQD 10 atau lebih kecil. 	2 - 1	<ul style="list-style-type: none"> Meskipun kekuatan batuan lebih kecil daripada beban yang disebabkan oleh penerowongan, terjadi deformasi plastis dan deformasi elastis yang besar. Karena kekuatan batuan kecil dan kondisi diskontinuitas sangat buruk, berkurangnya kekuatan ikatan batuan karena penerowongan meluas sepanjang diskontinuitas yang mudah tergelincir, dan pergerakan meningkat. Konvergensi karena penggalian dicapai pada sekitar 60-200 mm tanpa kasus dimana harus dilakukan penutupan lantai kerja lebih awal, dan konvergensi belum berakhir, bahkan apabila muka galian terpisah pada pergerakan 2 kali diameter terowongan (2D). Muka galian tidak stabil, dan diperlukan penggalian cincin dan beton semprot diaplikasikan pada muka bidang galian sesuai dengan kondisi tanah/ground.
	M Masif	Andesit, basal, riolit, dasit												
	L Masif	Batupasir atau konglomerat Tersier												
	M Berlapis	Batu sabak, Serpih Paleozoikum & Mesozoikum												
	L Berlapis	Sekis hitam, sekis hijau												
E		Batuan metamorf, batuan plutonik, batuan Paleozoikum dan Mesozoikum, batuan intrusi vertikal (dike), batuan Tersier & lapisan bawah diluvial, lapisan atas diluvial, lapisan aluvial, dengan kondisi batuan yang buruk (konvergensi lebih dari 200mm)						<ul style="list-style-type: none"> Sesar, daerah patahan, daerah rombakan lereng besar, dll. Mengandung formasi lempung dengan tekanan tanah tidak simetris. Perlunakan akibat perusakan oleh air. 			1 atau lebih kecil	<ul style="list-style-type: none"> Tanah terjerit akan terjadi pada muka bidang galian, dan dapat runtuh. Fenomena tanah terjerit akibat tekanan akan terjadi jika bukaan yang tidak disangga. 		

Catatan:
 1) Pembagian H, M, L: berdasarkan kekuatan pada batuan utama dan kondisi batuan segar, yang akan dibagi dengan kuat tekan uniaksial sebagai berikut:
 H: $qu \geq 80N/mm^2$, M: $20N/mm^2 \leq qu < 80N/mm^2$, L: $qu < 20N/mm^2$
 2) Pembagian untuk Masif, Berlapis:
 Masif: batuan dimana bidang retakan menjadi permukaan diskontinuitas yang dominan.
 Berlapis: batuan dimana bidang perlapisan atau foliasi menjadi permukaan diskontinuitas yang dominan.
 3) Konvergensi (convergence) adalah perubahan jarak antara permukaan dinding terowongan yang diukur dibawah penerowongan aktual, dan tidak ada pergerakan yang terjadi sebelum penggalian.

4) Berkurangnya kekuatan ikatan batuan (*looseness*) adalah blok batuan di lapangan yang cenderung runtuh sepanjang diskontinuitas akibat gravitasi, karena diskontinuitas pada massa batuan yang telah tertutup oleh tekanan, terbuka akibat pelepasan tekanan insitu karena penerowongan.
 5) Kekuatan batuan adalah kekuatan batuan yang tidak dipengaruhi oleh rekahan (*fissure*).

Sumber: JSCE (2007)

5.3 Pendekatan empiris

Pemilihan metode penggalian dan sistem perkuatan menggunakan pendekatan empiris ditentukan berdasarkan kategori batuan/tanah, kondisi media yang sesuai dan pembagian muka bidang galian dengan mempertimbangkan kelebihan dan kekurangan masing-masing metode penggalian.

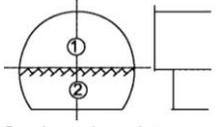
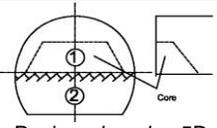
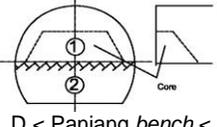
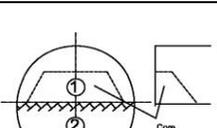
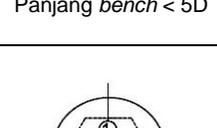
5.3.1 Pemilihan metode penggalian

Tipikal ilustrasi penampang melintang penggalian berdasarkan pembagian muka bidang galian, kondisi media yang sesuai dan kategori batuan/tanah dapat dilihat pada Tabel 7 dengan tahapan penggalian mengacu pada penomoran menggunakan nomor terkecil yang menjadi urutan penggalian pertama yang dilakukan.

Tahapan pemilihan metode penggalian adalah sebagai berikut:

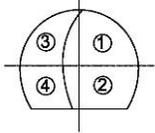
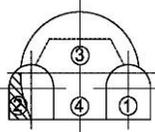
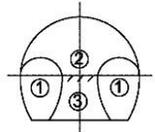
- a. Evaluasi kondisi media berdasarkan kajian pengujian lapangan dan laboratorium sesuai 5.1.
- b. Tentukan kategori batuan/tanah sesuai 5.2.
- c. Evaluasi kelebihan dan kekurangan metode penggalian dan pembagian muka bidang galian berdasarkan aspek-aspek teknis dan kemudahan pelaksanaan.
- d. Tentukan metode dan tipikal penggalian menggunakan Tabel 7 berdasarkan hasil evaluasi pada butir a, b dan c.

Tabel 7 - Metode penggalian dan karakteristiknya

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

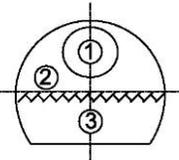
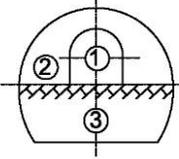
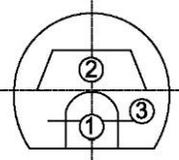
Sumber: JSCE (2007)

Tabel 7 - Metode penggalian dan karakteristiknya (lanjutan)

Metode penggalian		Pembagian muka bidang galian	Kondisi media yang sesuai	Kategori batuan/tanah	Kelebihan	Kekurangan
Metode diafragma tengah			<ul style="list-style-type: none"> • Media tanah dengan lapisan penutup yang tipis, sehingga penurunan permukaan tanah di atasnya harus dijaga seminimum mungkin • Media yang relatif buruk untuk terowongan dengan penampang yang besar 	DII dan E	<ul style="list-style-type: none"> • Muka bidang galian distabilisasi dengan membagi menjadi beberapa penampang kecil • Penurunan permukaan tanah dapat dikurangi • Penampang muka bidang galian yang terbagi lebih besar daripada yang menggunakan metode penggalian samping, dan peralatan yang lebih besar dapat digunakan 	<ul style="list-style-type: none"> • Pergerakan atau penurunan akibat pencabutan diafragma harus diperiksa • Pencabutan diafragma ditambahkan dalam proses konstruksi • Adopsi metode tambahan khusus sulit dilakukan
Metode penggalian samping (<i>side drift advancing method</i>)	Metode penggalian samping dengan dinding beton		<ul style="list-style-type: none"> • Media dengan kapasitas daya dukung yang tidak mencukupi dan harus ditingkatkan sebelum penggalian <i>heading</i> atas • Media batuan lunak atau media tanah dengan lapisan penutup yang tipis, sehingga tekanan tanah tidak simetris dan longsor harus diantisipasi 		<ul style="list-style-type: none"> • Secara keseluruhan dinding beton masif untuk penggalian samping meningkatkan kapasitas daya dukung dan memperkuat ketahanan terhadap tekanan tanah tidak simetris 	<ul style="list-style-type: none"> • Peralatan kecil harus digunakan untuk penggalian samping • Batuan/tanah di bagian atas akan berkurang ikatannya (<i>longgar</i>) akibat penggalian samping
	Metode penggalian samping tanpa dinding beton		<ul style="list-style-type: none"> • Media dengan kapasitas daya dukung tidak memadai untuk menerapkan metode <i>bench cut</i> • Media tanah dengan lapisan penutup yang tipis, sehingga penurunan permukaan tanah di atasnya harus dijaga seminimum mungkin 		<ul style="list-style-type: none"> • Penurunan permukaan tanah dapat dikurangi • Diafragma sementara dapat lebih mudah dilepas daripada seperti pada metode diafragma pusat 	<ul style="list-style-type: none"> • Peralatan kecil harus digunakan untuk penggalian samping

Sumber: JSCE (2007)

Tabel 7 - Metode penggalian dan karakteristiknya (lanjutan)

Metode penggalian		Pembagian muka bidang galian	Kondisi media yang sesuai	Kategori batuan/tanah	Kelebihan	Kekurangan
Metode penggalian samping lainnya	Metode penggalian samping bagian atas		<ul style="list-style-type: none"> Batuan/tanah yang memerlukan konfirmasi kondisi geologi, efek drainase dan penurunan pergeseran terdahulu dan tekanan pendukung TBM dapat diadopsi untuk penggalian samping (<i>advance drift</i>) 	DII dan E	<ul style="list-style-type: none"> Konfirmasi kondisi geologi, efek drainase dan penurunan pergeseran terdahulu dan tekanan pendukung dapat diperoleh dengan penggalian samping Penggalian bagian tengah (<i>center cut</i>) pada metode pengeboran dan peledakan tidak diperlukan. Getaran dan suara bising ledakan dapat dikurangi Stabilitas muka bidang galian dapat ditingkatkan jika diperlebar Dapat berfungsi sebagai ventilasi saak penggalian samping selesai 	<ul style="list-style-type: none"> Penggalian samping dengan TBM dapat berlangsung lama kecuali kondisi batuan/tanah cukup stabil Peralatan berukuran kecil harus digunakan untuk penggalian ini
	Metode penggalian samping bagian tengah		<ul style="list-style-type: none"> Batuan/tanah yang memerlukan konfirmasi kondisi geologi, efek drainase dan penurunan pergeseran terdahulu dan tekanan pendukung 		<ul style="list-style-type: none"> Konfirmasi kondisi geologi, efek drainase dan penurunan pergeseran terdahulu dan tekanan pendukung dapat diperoleh dengan penggalian samping Penggalian bagian tengah (<i>center cut</i>) pada metode pengeboran dan peledakan tidak diperlukan. Getaran dan suara bising ledakan dapat dikurangi Stabilitas muka bidang galian dapat ditingkatkan jika diperlebar 	<ul style="list-style-type: none"> Peralatan berukuran kecil harus digunakan untuk penggalian ini
	Metode penggalian samping bagian bawah		<ul style="list-style-type: none"> Batuan/tanah yang memerlukan metode dewatering 		<ul style="list-style-type: none"> Kondisi geologi dapat dikonfirmasi dengan penggalian samping Muka bidang galian tambahan dihasilkan, dan periode konstruksi dapat dipersingkat 	<ul style="list-style-type: none"> Sulit untuk menyeimbangkan siklus konstruksi setiap muka bidang galian Berbagai tipe peralatan diperlukan

Sumber: JSCE (2007)

5.3.2 Pemilihan sistem perkuatan

Tipikal pemilihan jenis perkuatan dan sistem perkuatan menggunakan pendekatan empiris terdiri dari beton semprot, baut batuan, penyangga baja dan lantai kerja beton serta ditentukan berdasarkan kategori batuan/tanah pada Tabel 8 dan Tabel 9.

Tahapan pemilihan sistem perkuatan adalah sebagai berikut:

- Evaluasi kondisi media berdasarkan kajian pengujian lapangan dan laboratorium sesuai 5.1.
- Tentukan kategori batuan/tanah sesuai 5.2.
- Tentukan jenis perkuatan berdasarkan kategori batuan/tanah menggunakan Tabel 8.
- Tentukan sistem perkuatan berdasarkan kategori batuan/tanah menggunakan Tabel 9.
- Buat skema tipikal pola perkuatan dan dinding pada penampang melintang dan memanjang terowongan mengacu pada ilustrasi Gambar 2.

Tabel 8 - Kriteria pemilihan jenis perkuatan

Kategori batuan/tanah		Bagian-bagian penyangga				Catatan
		Beton semprot	Baut batuan	Penyangga baja	Lantai kerja (<i>invert</i>)	
Batuan Keras (Kelas B, C)	Sedikit rekahan	△	△	×	×	
	Banyak rekahan	○	○	△	○	
Batuan Lunak (Kelas D)	Faktor Kompetensi 2-4 (Kelas DI)	○	○	×	△	Lantai kerja beton diperlukan untuk memastikan kondisi lapisan pondasi (<i>base course</i>) yang baik pada masa layan, terutama pada media batulempung (<i>mudstone</i>).
	Faktor Kompetensi 1-2 (Kelas DII)	○	○	○	○	Dipertimbangkan segera melakukan penempatan lantai kerja beton atau penutupan penampang melintang penggalian .
Media Tanah (Kelas E)	(<i>Overburden</i> Kecil)	○	△	○	○	Dinding dapat dianggap sebagai bagian dari penyangga.
Zona Patahan	(<i>Overburden</i> Besar)	○	○	○	○	Dipertimbangkan segera melakukan penutupan penampang melintang penggalian dan pembatasan besarnya deformasi berdasarkan kriteria deformasi izin.
<i>Squeezing Ground</i>		○	○	○	○	Dipertimbangkan segera melakukan penutupan awal penampang melintang penggalian, fungsi penyanggaan dari dinding dan pembatasan besarnya deformasi berdasarkan kriteria deformasi izin.

Catatan:

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

Sumber:

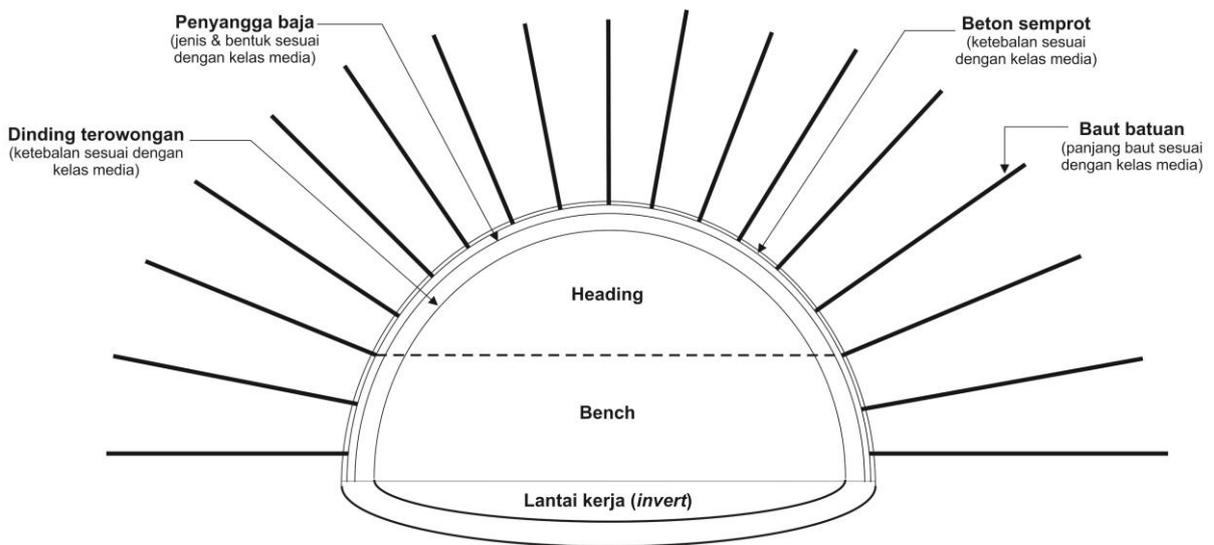
JSCE

(2007)

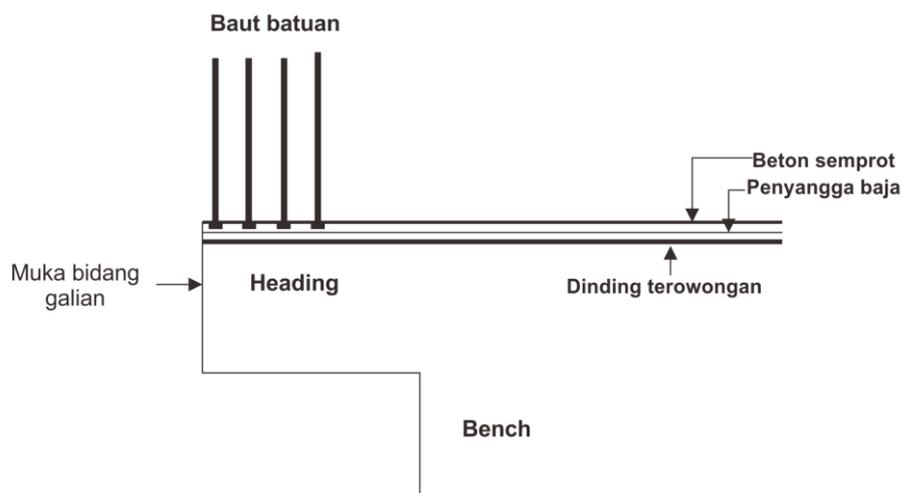
Tabel 9 - Skema tipikal pola perkuatan dan dinding serta deformasi izin

Kategori batuan/tanah	Panjang laju penggalian (m)	Baut batuan				Penyangga baja			Ketebalan beton semprot (cm)	Ketebalan dinding (<i>lining</i>)		Besarnya deformasi yang diizinkan (cm)
		Panjang (m)	Jarak		Area pemasangan	<i>Top heading</i>	<i>Bench</i>	Jarak (m)		Lengkung (<i>arch</i>), dinding samping (<i>side wall</i>) (cm)	Lantai kerja (cm)	
			Arah melengkung (m)	Arah memanjang (m)								
B	2.0	4.0	1.5	2.0	<i>Top heading</i>	-	-	-	10	40	-	0
C I	1.5	4.0	1.2	1.5	<i>Top heading, bench</i>	-	-	-	15	40	(45)	0
C II	1.2	4.0	1.2	1.2	<i>Top heading, bench</i>	H-150	-	1.2	15	40	(45)	0
D I	1.0	6.0	1.0	1.0	<i>Top heading, bench</i>	H-150	H-150	1.0	20	40	50	0
D II	1,0 atau kurang	6	1.0	1,0 atau kurang	<i>Top heading, bench</i>	H-200	H-200	1,0 atau kurang	25	40	50	10

Sumber: JSCE (2007)



a) Penampang melintang tipikal pola perkuatan dan dinding terowongan



b) penampang memanjang tipikal pola perkuatan dan dinding

Gambar 2 - Tipikal pola perkuatan dan dinding terowongan

Pada media campuran tanah-batuan, penggalian terowongan pada kondisi media yang memiliki 2 kategori berbeda dapat terjadi. Untuk menghadapi kondisi seperti ini, perencanaan perkuatan dengan pendekatan empiris umumnya dikombinasikan dengan metode perkuatan tambahan yang sesuai dengan permasalahan ketidakstabilan yang dihadapi. Beberapa tipikal metode tambahan yang dapat digunakan ditunjukkan pada Tabel 10.

Tahapan pemilihan metode tambahan adalah sebagai berikut:

- Tentukan kategori batuan/tanah sesuai 5.2.
- Identifikasi permasalahan yang mungkin terjadi berdasarkan kategori batuan/tanah
- Tentukan metode tambahan berdasarkan tujuan dan kegunaannya mengatasi permasalahan yang teridentifikasi pada butir b.
- Buat tipikal metode tambahan dengan ilustrasi mengacu pada Tabel 11.

Tabel 10 - Tipikal metode tambahan dan kegunaannya (JSCE, 2006)

Metode / Tujuan		Kegunaan Metode Tambahan					Kategori batuan/tanah			
		Meningkatkan stabilitas Atap	Meningkatkan stabilitas muka bidang galian	Meningkakan stabilitas kaki terowongan	Pengen dalian aliran air	Mengurangi penurunan permukaan tanah	Proteksi struktur disekitar konstruksi	Batuan Keras (Kelas B, C)	Batuan Lunak (Kelas D)	Tanah (Kelas E)
Perkuatan Awal (<i>presupport</i>)	Tipe <i>forepoling</i> dengan pengisi	XX	X				X	X	XX	XX
	Tipe <i>forepoling</i> dengan injeksi	XX	X			X	X	X	XX	XX
	Tipe <i>forepoling</i> dengan pipa baja	X	X			X	X		X	XX
Perkuatan Muka Bidang Galian	Beton semprot pada muka bidang galian		XX					X	XX	XX
	Pembautan pada muka bidang galian		XX					X	X	X
Perkuatan Kaki Terowongan	Lantai kerja sementara pada <i>heading</i> atas			X		X			X	X
Pengendalian Aliran Air	Pengeboran drainase	X	X		XX			XX	XX	XX
	Sumur terpusat (<i>Well point</i>)	X	X		X					X
	Sumur dalam (<i>Deep well</i>)	X	X		X					X

Catatan:

XX adalah metode yang sering digunakan

X adalah metode yang digunakan tergantung kasusnya

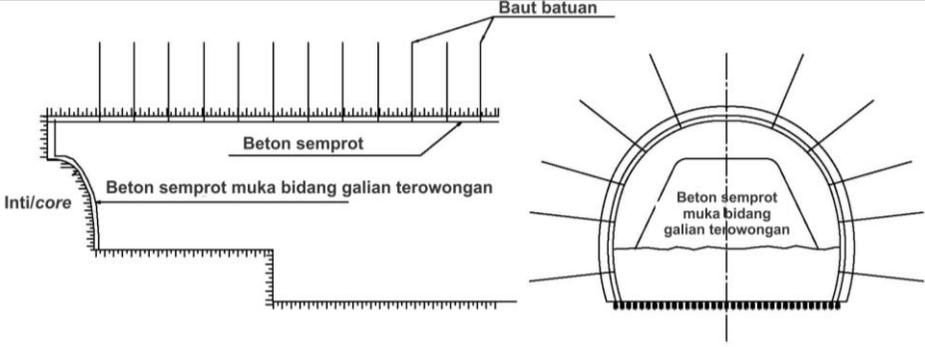
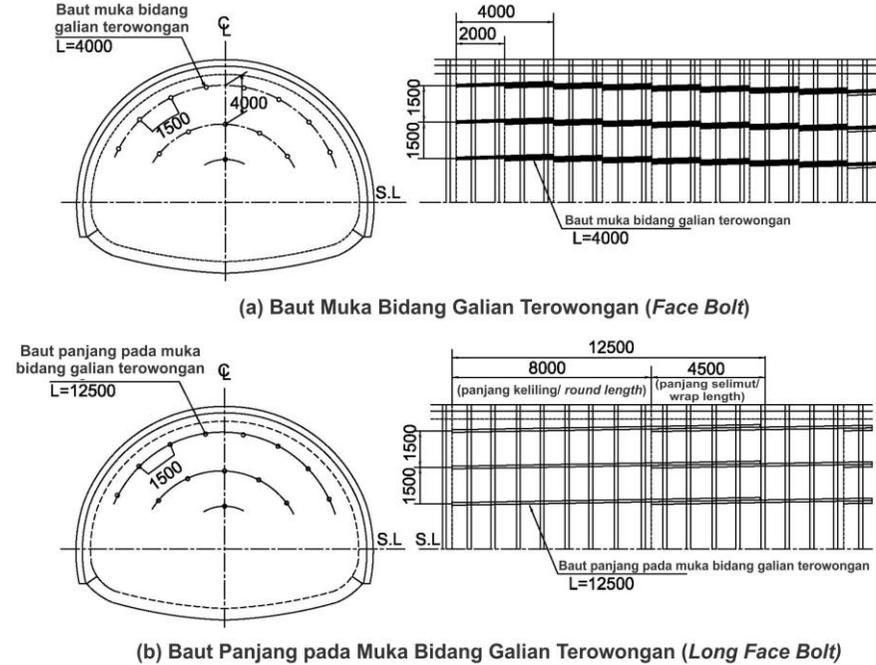
Sumber: JSCE (2007)

Tabel 11 - Ilustrasi metode tambahan dan penjelasannya

Metode		Ilustrasi	Keterangan
	Tipe <i>forepoling</i> dengan pengisi		<ul style="list-style-type: none"> Tipe <i>forepoling</i> dengan pengisi merupakan metode perkuatan tambahan yang menggunakan baut, batang baja, atau pipa dengan panjang kurang dari 5 m, yang dipasang masuk ke dalam batuan/tanah pada bagian atas lengkung. Tujuan metode ini adalah untuk meningkatkan kuat geser batuan/tanah pada bagian mahkota dan untuk mencegah berkurangnya kekuatan batuan/tanah di belakang muka bidang galian. Metode ini biasa digunakan untuk mencegah keruntuhan mahkota dan sering dipasang pada tahap awal stabilisasi.
Perkuatan Awal (<i>presupport</i>)	Tipe <i>forepoling</i> dengan injeksi		<ul style="list-style-type: none"> Tipe <i>forepoling</i> dengan injeksi merupakan metode tambahan yang menggunakan baut atau pipa dengan panjang kurang dari 5 m, yang dipasang secara diagonal masuk ke dalam batuan/tanah di belakang muka bidang galian bersama-sama dengan injeksi pasta semen cepat kering (<i>quick-setting cement paste</i>) atau grout kimia. Berfungsi untuk meningkatkan stabilitas mahkota di belakang muka bidang galian
	Tipe <i>forepoling</i> dengan pipa baja		<ul style="list-style-type: none"> Tipe <i>forepoling</i> dengan pipa baja merupakan metode perkuatan tambahan untuk memperkuat tanah yang tidak stabil, yang efek busurnya diabaikan. Manfaat tambahan dari penggunaan metode ini adalah pengurangan pada pergerakan yang sebelumnya terjadi. Umumnya metode ini menggunakan pipa baja dengan panjang lebih dari 5 m dan digunakan untuk menstabilkan mahkota terowongan.

Sumber: JSCE (2007)

Tabel 11 - Ilustrasi metode tambahan dan penjelasannya (Lanjutan)

Metode	Ilustrasi	Keterangan
<p>Beton semprot pada muka bidang galian</p>		<p>Penyemprotan beton pada muka bidang galian dilakukan dengan ketebalan antara 3 cm hingga 10 cm, segera setelah penggalian untuk meningkatkan waktu perkuatan sendiri muka bidang galian</p>
<p>Perkuatan Muka Bidang Galian</p> <p>Pembautan pada muka bidang galian</p>	 <p>(a) Baut Muka Bidang Galian Terowongan (<i>Face Bolt</i>)</p> <p>(b) Baut Panjang pada Muka Bidang Galian Terowongan (<i>Long Face Bolt</i>)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tujuan 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. • Baut muka bidang galian dengan grout dapat digunakan untuk meningkatkan efek perkuatan. Baut plastik tulangan serat gelas (<i>glass fiber reinforced plastic bolts</i>) sering digunakan karena mudah dipotong

Sumber: JSCE (2007)

Tabel 11 - Ilustrasi metode tambahan dan penjelasannya (Lanjutan)

Metode		Ilustrasi	Keterangan
<p>Perkuatan Kaki Terowongan</p>	<p>Lantai kerja sementara pada <i>heading</i> atas</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Metode stabilisasi untuk kaki terowongan dapat membantu melindungi kerusakan yang disebabkan oleh penurunan pada kaki terowongan dan yang terkait dengan penurunan kekuatan batuan/tanah yang diakibatkan oleh penurunan kapasitas daya dukung tanah di kaki terowongan. • Tujuan dari metode perkuatan kaki ini adalah untuk meningkatkan kapasitas daya dukung tanah. Metode lantai kerja sementara pada <i>heading</i> atas (<i>temporary invert of top heading</i>) merupakan salah satu metode yang dapat digunakan sebagai perkuatan kaki terowongan • Umumnya, lengkung lantai kerja sementara pada <i>heading</i> dibuat menggunakan beton semprot. Salah satu keuntungannya adalah dapat memberikan kestabilan pada muka bidang galian dengan cepat. Namun hal ini mengurangi kemudahan penggalian <i>heading</i> atas dan menurunkan efisiensi kerja pada <i>bench</i> karena perlu dilakukan pembongkaran lantai kerja sementara. • Sebagai tambahan, karena pergerakan yang besar dapat terjadi ketika membongkar lantai kerja sementara, maka pemeriksaan awal yang detail perlu dilakukan sebelum menerapkan metode ini.
<p>Pengendalian Aliran Air</p>	<p>Pengeboran drainase</p>	<p>a) Penampang melintang posisi pengeboran drainase</p> <p>b) tampak atas posisi pengeboran drainase</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pengeboran drainase merupakan metode yang sering digunakan, yaitu dengan cara mengalirkan air dengan gravitasi melalui lubang pengeboran menggunakan mesin bor atau drill jumbo yang bertujuan untuk menurunkan tekanan dan muka air tanah. • Pada kondisi tanah yang tidak terkonsolidasi, harus dijaga agar partikel-partikel tanah tidak terbawa oleh aliran air

Sumber: JSCE (2007)

Tabel 11 - Ilustrasi metode tambahan dan penjelasannya (Lanjutan)

Metode	Ilustrasi	Keterangan
<p>Pengendalian Aliran Air</p> <p>Sumur terpusat (<i>Well point</i>)</p>	<p>Sumur terpusat (<i>well points</i>) pada bagian bench dan dasar</p> <p>Sumur terpusat (<i>well points</i>) pada bagian heading atas</p> <p>Heading atas</p> <p>S.L.</p> <p>Bench</p> <p>Dasar</p> <p>6.3</p> <p>8.1</p> <p>1.8</p> <p>2.0:2.0</p> <p>S.L.</p> <p>Dasar</p> <p>Bench</p> <p>S.L.</p> <p>1:3.5</p> <p>Pengeboran drainase</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Metode sumur terpusat merupakan metode yang digunakan untuk membuang air tanah dengan memasang pipa-pipa pengumpul air tanah atau disebut “sumur terpusat” yang dimasukkan ke dalam tanah. • Air tanah dikeluarkan dengan bantuan pompa yang bekerja terus menerus untuk menjaga agar elevasi muka air berada dibawah dasar area kerja. • Pada kondisi tanah yang tidak terkonsolidasi, harus dijaga agar partikel-partikel tanah tidak terbawa oleh aliran air

Sumber: JSCE (2007)

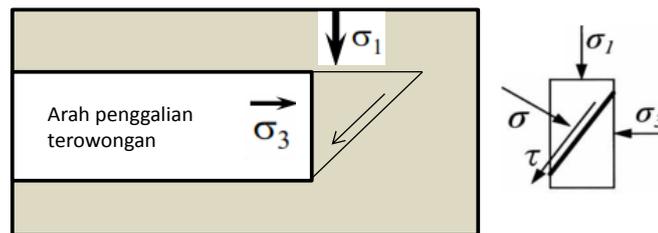
Tabel 11 - Ilustrasi metode tambahan dan penjelasannya (Lanjutan)

Metode	Ilustrasi	Keterangan
Sumur dalam (<i>Deep well</i>)	<p>The diagram illustrates a deep well (Sumur dalam) with a diameter of 17.300 meters. The vertical axis represents depth in meters (GL-m) from 0 to 40. The horizontal axis represents diameter in meters (17.300). The well is shown in cross-section, with a diameter of 22.500 meters at the bottom. The well is located in a geological area with layers of MAT alami (0-5m), Batulempung lanauan (5-20m), and Diluvium (pasir, kerikil) (20-40m). The well is equipped with a saringan/strainer (12.000m long), a sump (3.000m long), and a filter (17.000m long). The well is shown in cross-section, with a diameter of 22.500 meters at the bottom.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Sumur dalam merupakan metode drainase dengan membuat sumur yang biasanya mempunyai diameter antara 300 mm dan 600 mm, hingga kedalaman tertentu, dan menggunakan sebuah pompa (<i>submersible pump</i>) untuk membuang air. Air tanah dikeluarkan dengan bantuan pompa yang bekerja terus menerus untuk menjaga agar elevasi muka air berada dibawah dasar area kerja. Pada kondisi tanah yang tidak terkonsolidasi, harus dijaga agar partikel-partikel tanah tidak terbawa oleh aliran air

Sumber: JSCE (2007)

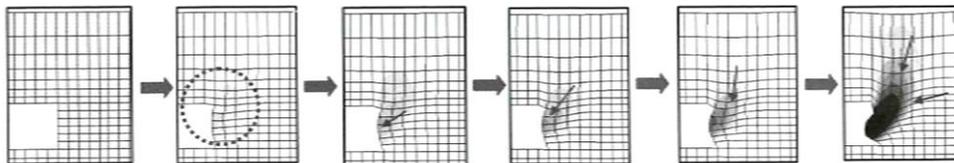
5.4 Pendekatan analitis

Pada saat terowongan digali, tipikal ketidakstabilan yang berlaku secara sederhana dapat dilihat pada Gambar 3. Penentuan waktu pemasangan perkuatan atau optimalisasi pemasangan perkuatan berdasarkan kapasitas perpindahan (*displacement*) sangatlah penting. Oleh karena itu, pembuatan prediksi profil perpindahan pada penampang memanjang terowongan diperlukan sebagai tahap awal identifikasi perilaku terowongan saat dilakukan penggalian.



Gambar 3 - Mekanisme tegangan yang bekerja saat terjadi penggalian terowongan

Penggalian terowongan mengakibatkan pengurangan tekanan keliling (*confining pressure*, σ_3) pada muka bidang galian yang mengakibatkan terjadinya ketidakstabilan. Untuk kondisi media campuran tanah-batuan, pemodelan menggunakan pendekatan persamaan sederhana tidak dapat mengakomodasi kompleksitas kondisi geologi dan geoteknik. Oleh karena itu, disarankan untuk menggunakan pendekatan numerik. Pada model numerik, mekanisme ketidakstabilan dapat terlihat oleh besarnya deformasi yang terjadi pada muka bidang galian seperti diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4 - Ilustrasi perilaku deformasi pada penggalian terowongan

Tahapan pendekatan analitis menggunakan metode numerik adalah sebagai berikut:

- Identifikasi dan evaluasi hasil penyelidikan lapangan dan laboratorium yang didapatkan dari penyelidikan pada 5.1.2.
- Buat per lapisan batuan/tanah sepanjang rencana terowongan berdasarkan hasil pada butir a beserta penempatan posisi penampang terowongan pada per lapisan batuan/tanah tersebut.
- Tentukan parameter desain masing-masing per lapisan tanah dengan mempertimbangkan kondisi kritis yang mungkin terjadi.
- Tentukan kategori batuan/tanah sesuai 5.2.
- Tentukan metode penggalian dan sistem perkuatan awal menggunakan pendekatan empiris.
- Tentukan parameter desain material yang akan digunakan sebagai material perkuatan berdasarkan spesifikasi teknis beserta jenis elemen struktur yang akan digunakan dalam analisis numerik.

- g. Identifikasi kebutuhan bentuk jaring (*mesh*) yang diperlukan untuk mendapatkan bentuk penampang galian dan sistem perkuatan yang akan dimodelkan. Tipikal jenis elemen struktur untuk perkuatan terowongan dapat mengacu pada Lampiran A.
- h. Lakukan pembuatan geometri model dengan sistem koordinat lokal model numerik yang digunakan.
- i. Tentukan kondisi pengekangan (*fixities*) model, yaitu kondisi perpindahan yang ditentukan sama dengan nol. Kondisi ini dapat ditentukan pada garis geometri atau titik pada geometri model. Untuk model 3 dimensi, pengekangan arah memanjang (sumbu y) dinyatakan berdasarkan pengekangan arah lainnya (sumbu x dan sumbu z). Umumnya untuk model 3d, pengekangan dilakukan arah horizontal ($u_x = 0$), vertikal ($u_z = 0$) dan memanjang ($u_y = 0$).
- j. Lakukan perhitungan tegangan awal akibat berat batuan/tanah sendiri dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma_{v,0} = \sum_i \gamma_i \cdot h_i - p_i; \quad \sigma_{h,0} = K_0 \cdot \sigma_{v,0} \quad (3)$$

Keterangan:

γ_i adalah berat isi setiap lapisan batuan/tanah (kN/m^3)

h_i adalah kedalaman lapisan batuan/tanah (m)

p_i adalah tekanan air pori awal pada suatu titik tinjau

K_0 adalah koefisien tekanan tanah saat diam (*at rest*), $K_0 = 1 - \sin \phi$

- k. Untuk menghindarkan terjadinya penambahan perpindahan akibat perhitungan tegangan awal pada saat dilakukan tahapan penggalian, maka dilakukan pengembalian kondisi perpindahan menjadi nol (*reset displacement to zero*) agar pada saat proses penggalian, gaya yang bekerja pada bidang galian adalah gaya vertikal akibat pengaruh berat batuan/tanah sendiri.
- l. Tentukan penampang galian yang akan dimodelkan beserta urutan penggalian dan panjang laju penggaliannya.
- m. Lakukan tahapan penggalian berdasarkan urutan penggalian dan panjang laju penggalian yang telah ditentukan pada butir l. Evaluasi perpindahan total yang terjadi pada beberapa titik tinjau (misal pada atap, samping dan muka bidang galian) hingga kondisi kesetimbangan gaya tercapai.
- n. Bila penampang yang ditentukan menunjukkan bahwa perpindahan total yang terjadi tidak melampaui kriteria batas deformasi seperti dinyatakan pada Tabel 9, maka panjang laju penggalian maksimum dan metode penggalian dapat ditentukan. Bila kriteria batas deformasi terlampaui, maka perlu di tinjau bentuk penampang penggalian lainnya atau penggunaan metode tambahan berdasarkan permasalahan stabilitas yang dihadapi dengan metode penentuan mengacu pada Tabel 10.

Bila kriteria batas deformasi terlampaui dan metode tambahan ditentukan berdasarkan permasalahan stabilitas yang dihadapi, maka tahapan selanjutnya adalah sebagai berikut:

- a. Tentukan tipikal perkuatan terowongan dan perkuatan tambahan yang akan dimodelkan beserta urutan penggunaannya. Tipikal jenis elemen struktur untuk perkuatan terowongan dan perkuatan tambahan dapat mengacu pada Lampiran A.
- b. Tentukan parameter perencanaan yang dibutuhkan pada setiap jenis elemen struktur dengan mengacu pada kebutuhan parameter pada Lampiran A.
- c. Tempatkan setiap jenis elemen struktur perkuatan pada penampang melintang dan memanjang terowongan berdasarkan tahapan penggalian dan metode penggalian yang telah ditentukan.
- d. Lakukan tahapan awal (siklus ke-1) penggalian dan penempatan elemen struktur perkuatan dengan panjang laju penggalian yang telah ditentukan. Evaluasi perpindahan total yang terjadi pada beberapa titik tinjau (misal pada atap, samping dan muka bidang galian) hingga kondisi kesetimbangan gaya tercapai.

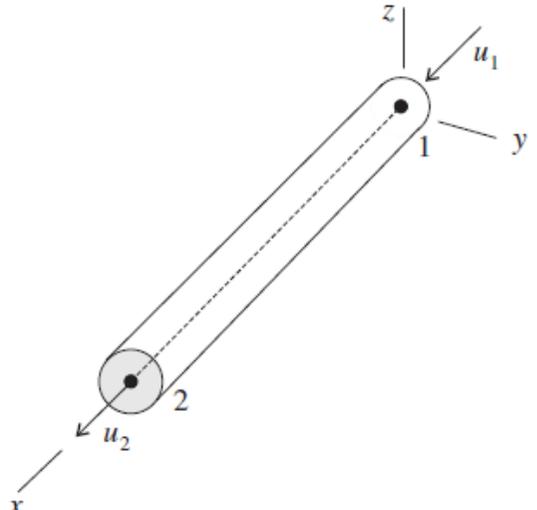
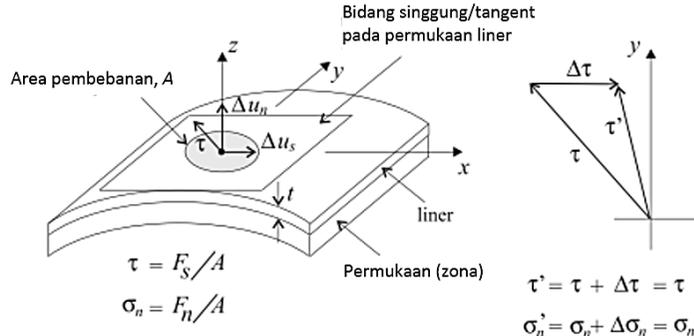
- e. Bila sistem perkuatan yang ditentukan menunjukkan bahwa perpindahan total yang terjadi tidak melampaui kriteria batas deformasi seperti dinyatakan pada Tabel 4, maka dapat dilakukan tahapan penggalian selanjutnya hingga panjang rencana terowongan tercapai. Bila kriteria batas deformasi terlampaui, maka perlu di tinjau penggunaan metode tambahan lainnya berdasarkan permasalahan stabilitas yang dihadapi. Pastikan pula gaya yang bekerja pada elemen struktur tidak melebihi kapasitas ultimit kekuatan materialnya.
- f. Buat gambar perencanaan penggalian dan perkuatan terowongan berdasarkan hasil yang dicapai pada butir e.

Lampiran A
(informatif)

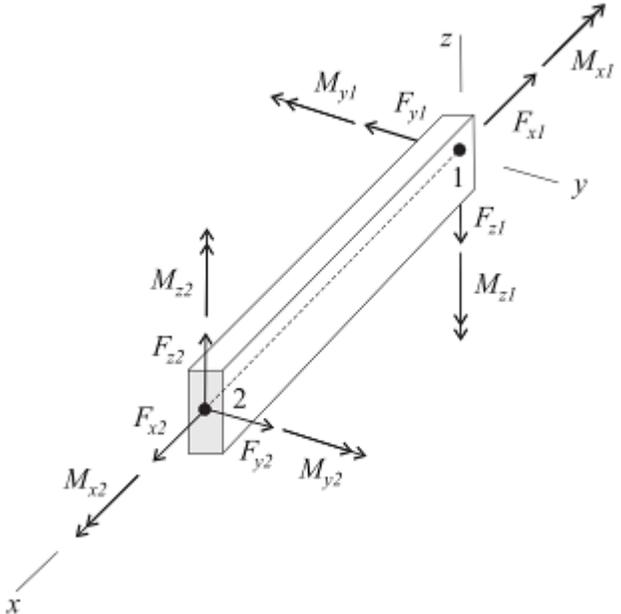
Tabel A - Tipikal jenis elemen struktur perkuatan terowongan

No.	Jenis elemen struktur	Penjelasan	Peruntukan	Parameter yang dibutuhkan	Ilustrasi arah gaya pada elemen struktur
1	Balok kolom (<i>beam</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Merupakan elemen dua nodal, lurus dan berhingga (<i>finite</i>), dengan 6 (enam) derajat kebebasan (<i>degree of freedom</i>) per nodal: 3 (tiga) komponen translasi dan 3 (tiga) komponen rotasi. • Setiap komponen balok berperilaku sebagai material elastis linear tanpa batas keruntuhan; namun momen plastis terbatas atau bahkan sendi plastis masih mungkin diberikan di antara komponen balok. • Elemen balok dapat disambungkan secara kaku ke <i>grid</i> sedemikian rupa sehingga gaya dan momen tekuk terjadi di dalam balok ketika <i>grid</i> berdeformasi, dan dapat diberi beban titik atau beban merata. 	<ul style="list-style-type: none"> • Untuk memodelkan komponen perkuatan-struktur dengan tahanan tekuk dan momen tekuk terbatas terjadi, • Untuk memodelkan <i>strut</i> penopang pada penggalian terbuka • Untuk memodelkan struktur rangka umum yang memiliki beban titik atau beban merata 	<ul style="list-style-type: none"> • Kerapatan massa material, ρ (kN/m³) • Modulus Young, E (kN/m²) • Rasio poisson, ν • Kapasitas momen plastis, M^P (opsional – jika tidak ditentukan, M^P diasumsikan tak terhingga) (kN.m) • Koefisien muai termal, α_t (digunakan apabila dilakukan analisis termal) • Luas penampang melintang, A (m²) • Momen inersia arah sumbu y, I_y (m⁴) • Momen inersia arah sumbu z, I_z (m⁴) • Momen inersia polar = I_y+I_z (m⁴) 	

Tabel A - Tipikal jenis elemen struktur perkuatan terowongan (lanjutan)

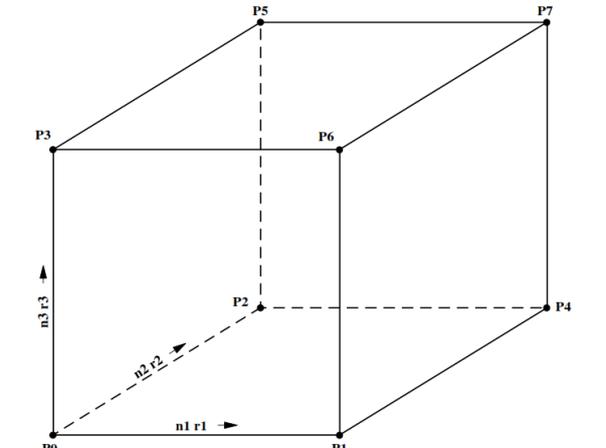
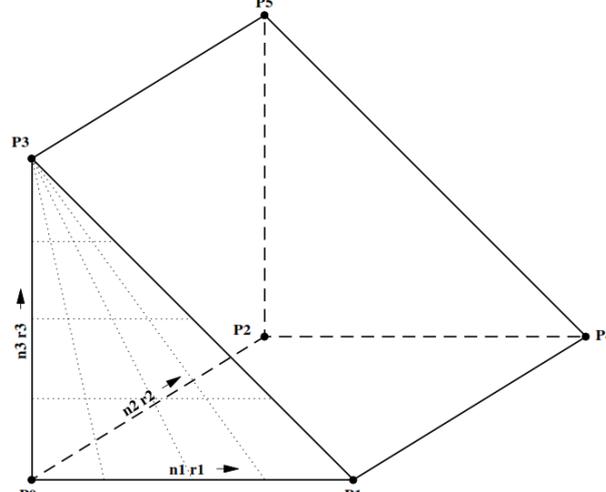
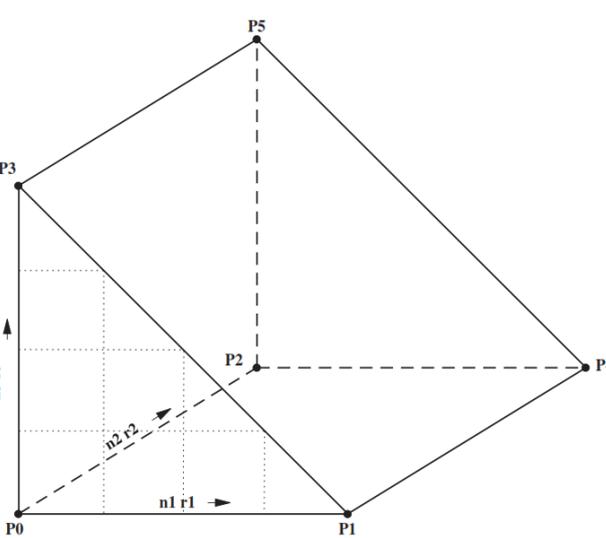
No.	Jenis elemen struktur	Penjelasan	Peruntukan	Parameter yang dibutuhkan	Ilustrasi arah gaya pada elemen struktur
2	Kabel (<i>cable</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Elemen struktur kabel merupakan elemen dua nodal, lurus dan berhingga, dengan satu derajat kebebasan translasi aksial per nodal. • Setiap elemen struktur kabel dapat menahan tarik atau tekan tetapi tidak dapat menahan momen tekuk. • Interaksi friksi arah-geser (paralel dengan sumbu kabel) terjadi antara kabel dan <i>grid</i>. • Kabel dapat diangkur pada titik tertentu di <i>grid</i>, atau diinjeksi sehingga gaya terjadi di sepanjang panjang kabel sebagai respons terhadap gerak relatif antara kabel dan <i>grid</i>. Kabel dapat juga diberi beban titik atau prategang. 	Untuk memodelkan berbagai komponen perkuatan-struktur yang kapasitas tariknya penting, termasuk baut kabel (<i>cable bolt</i>) dan <i>tieback</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Kerapatan massa material, ρ (kN/m³) • Modulus Young, E (kN/m²) • Kekuatan kohesif pengisi (<i>Grout cohesive strength</i>), c_g (kN/m) • Sudut geser grout, ϕ_g (°) • Kekakuan grout per satuan panjang, k_g (kN/m²) • Radius material pengisi, p_g (m) • Luas penampang melintang, A (m²) • Kekuatan luluh tekan, Fc (kN) • Kekuatan luluh tarik, Ft (kN) 	
3	Pelapis (<i>liner</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Elemen struktur pelapis merupakan elemen tiga-nodal, datar dan berhingga yang dapat diberi jenis mana pun dari lima jenis elemen-hingga yang tersedia. • Di samping untuk memberikan perilaku struktur kerangka, interaksi friksi berarah-geser (dalam bidang tangen/singgung terhadap permukaan pelapis) terjadi di antara pelapis dan <i>grid</i>. • Gaya tekan dan tarik dapat dilakukan dalam arah normal, dan pelapis dapat melepaskan diri dari (dan selanjutnya berhubungan kembali dengan) <i>grid</i>. 	Untuk memodelkan pelapis tipis baik untuk interaksi tekan/tarik dalam arah normal dan interaksi gesekan geser (<i>shear-directed</i>) dengan media asal (<i>host medium</i>) yang terjadi, seperti beton semprot sebagai pelapis/dinding terowongan atau dinding penahan.	<ul style="list-style-type: none"> • Kerapatan massa material, ρ (kN/m³) • Modulus Young, E (kN/m²) • Rasio poisson, ν • Ketebalan, t (m) 	 <p>(a) tegangan geser, τ, dan inkremental geser relatif dan pergeseran normal, Δu_s dan Δu_n, antara liner dan permukaan</p> <p>(b) tegangan geser dan baru (update) pada s timestep</p>

Tabel A - Tipikal jenis elemen struktur perkuatan terowongan (lanjutan)

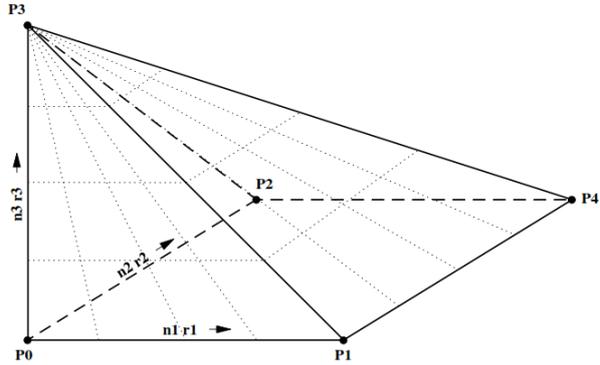
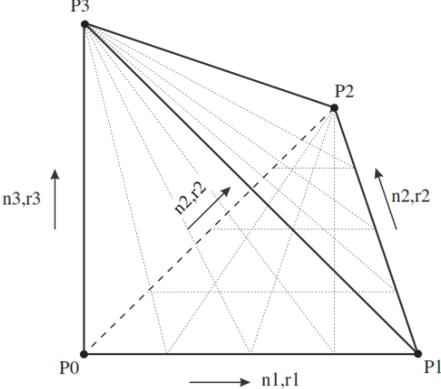
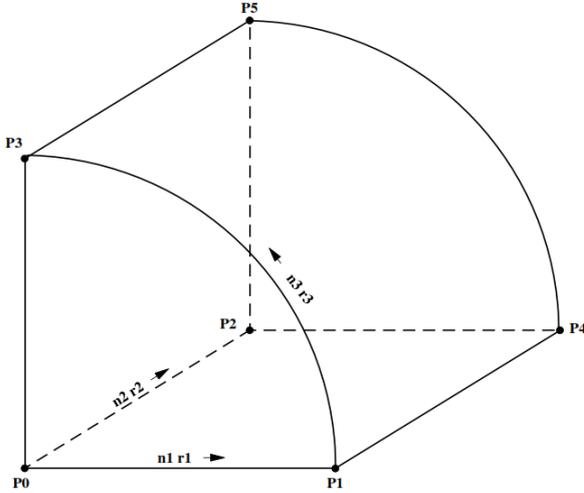
No.	Jenis elemen struktur	Penjelasan	Peruntukan	Parameter yang dibutuhkan	Ilustrasi arah gaya pada elemen struktur
4	Balok kolom tiang (<i>pile</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Elemen struktur tiang merupakan elemen dua nodal, lurus dan berhingga, dengan 6 (enam) derajat kebebasan per nodal. • Matriks kekakuan tiang identik dengan matriks kekakuan balok, namun, di samping memberikan perilaku struktur sebuah balok, interaksi friksi arah-normal (tegak lurus terhadap sumbu tiang) dan arah-geser (paralel dengan sumbu tiang) terjadi antara tiang dan grid. • Tiang memberikan karakteristik kombinasi dari balok dan kabel, yaitu selain pengaruh tahanan gesek, pengaruh tahanan ujung juga dapat dimodelkan. • Tiang dapat diberi beban titik atau beban merata 	Untuk memodelkan komponen perkuatan-struktur, seperti tiang fondasi dan perkuatan baja.	<ul style="list-style-type: none"> • Kerapatan massa material, ρ (kN/m³) • Modulus Young, E (kN/m²) • Rasio poisson, ν • Kapasitas momen plastis, M^P (opsional – jika tidak ditentukan, M^P diasumsikan tak terhingga) (kN.m) • Koefisien muai termal, α_t (digunakan apabila dilakukan analisis termal) • Luas penampang melintang, A (m²) • Momen inersia arah sumbu y, I_y (m⁴) • Momen inersia arah sumbu z, I_z (m⁴) • Momen inersia polar = I_y+I_z (m⁴) 	

Lampiran B
(Informatif)

Tabel B - Tipikal bentuk jaring untuk pembuatan geometri terowongan

No	Tipikal nama jaring	Ilustrasi bentuk
1	Bata (<i>brick</i>)	
2	Membaji (<i>wedge</i>)	
3	Membaji seragam	

**Tabel B - Tipikal bentuk jaring untuk pembuatan geometri terowongan
(lanjutan)**

No	Tipikal nama jaring	Ilustrasi bentuk
4	Piramida	 <p>The diagram shows a pyramid with apex P3 and base vertices P0, P1, and P2. The net is formed by unfolding the lateral faces. Radial lines from P3 to the base vertices are labeled n1,r1, n2,r2, and n3,r3. Dotted lines represent the unfolded lateral faces.</p>
5	<i>Tetrahedron</i>	 <p>The diagram shows a tetrahedron with apex P3 and base vertices P0, P1, and P2. The net is formed by unfolding the lateral faces. Radial lines from P3 to the base vertices are labeled n1,r1, n2,r2, and n3,r3. Dotted lines represent the unfolded lateral faces.</p>
6	Silinder	 <p>The diagram shows a cylinder net with apex P5 and base vertices P0, P1, P2, P3, and P4. The net is formed by unfolding the lateral surface into a sector. Radial lines from P5 to the base vertices are labeled n1,r1, n2,r2, and n3,r3. Dotted lines represent the unfolded lateral surface.</p>

Tabel B - Tipikal bentuk jaring untuk pembuatan geometri terowongan (lanjutan)

No	Tipikal nama jaring	Ilustrasi bentuk
7	Bata radial	
8	Silinder radial	
9	Shell silinder	

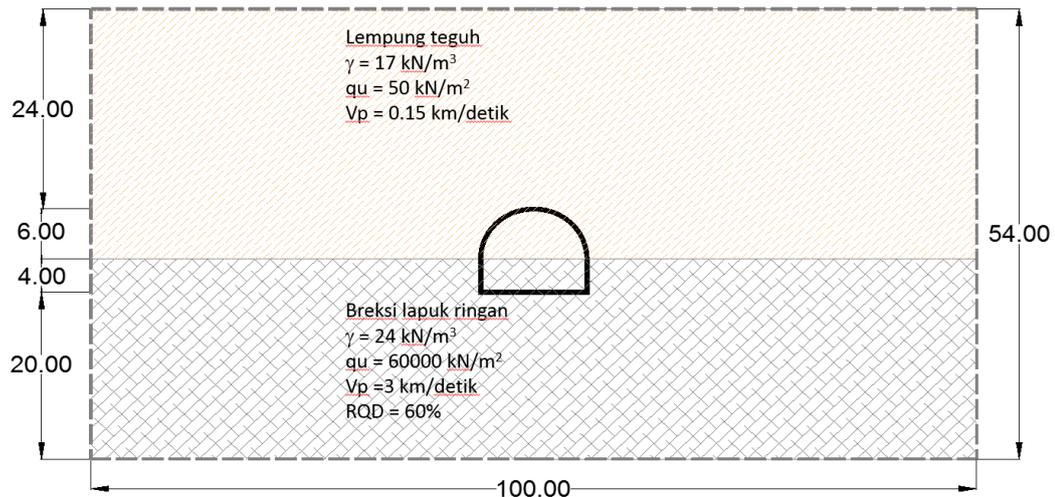
**Tabel B - Tipikal bentuk jaring untuk pembuatan geometri terowongan
(lanjutan)**

No	Tipikal nama jaring	Ilustrasi bentuk
10	Persimpangan silinder	<p>The diagram illustrates a cylindrical intersection network. It features a 3D perspective of a rectangular prism with nodes P0 through P13. P0, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, and P13 are marked at various vertices and intersections. Dashed lines represent hidden edges. Parameters d_1 through d_6 are shown as distances between nodes. Parameters n_1, n_2, n_3 and r_1, r_2, r_3 are shown as ratios of zone spacing, with arrows indicating their directions relative to the nodes.</p>
<p>Catatan: P0, P1,...P11 adalah koordinat posisi sudut sisi jaring n1, n2,...n5 adalah jumlah zona sesuai bentuk model jaring r1, r2,...r5 adalah rasio spasi zona sesuai bentuk model jaring</p>		

Lampiran C (Informatif)

Contoh penentuan tipikal metode penggalian dan sistem perkuatan menggunakan pendekatan empiris

Misal, diketahui rencana alinyemen vertikal terowongan untuk kebutuhan 2 lajur lalu lintas dengan lebar 12 m melewati dua media yang berbeda karakteristik, yaitu lempung teguh diatas breksi lapuk ringan dengan ilustrasi penampang melintang dan parameter berdasarkan hasil penyeldikan bawah permukaan diperlihatkan pada Gambar C.1.



Gambar C.1 - Ilustrasi penampang melintang rencana terowongan pada media campuran tanah-batuan

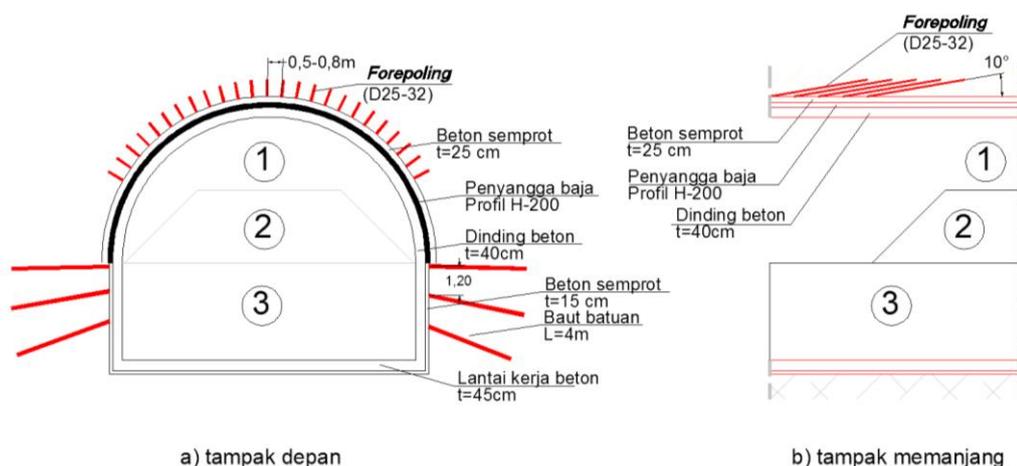
Berdasarkan ilustrasi pada Gambar C.1, maka dapat ditentukan metode penggalian dan sistem perkuatan terowongan menggunakan pendekatan empiris dengan tahapan sebagai berikut:

- a. Tentukan kategori batuan/tanah dengan cara:
 - 1) Tentukan kriteria klasifikasi tanah lempung berdasarkan hasil penyelidikan lapangan:
 - Faktor kompetensi = $q_u/(\gamma \cdot H)$, = $50/(17 \times 24) = 0,123$
 - Kecepatan gelombang elastik (v_p , km/detik) = 0,15 km/detik
 - 2) Tentukan parameter rencana breksi berdasarkan hasil penyelidikan lapangan:
 - Faktor kompetensi = $q_u/(\gamma \cdot H)$, = $60.000/(24 \times 30) = 83,33$
 - Kecepatan gelombang elastik (v_p , km/detik) = 3 km/detik
 - RQD = 60%
 - 3) Berdasarkan evaluasi parameter rencana lempung pada butir a dan mengacu pada pada Tabel 6, diketahui bahwa material lempung masuk pada kategori kelas E.
 - 4) Berdasarkan evaluasi parameter rencana breksi pada butir b dan mengacu pada Tabel 6, diketahui bahwa faktor kompetensi tidak dapat dijadikan acuan karena nilainya lebih besar dari 4. Penentuan kategori material breksi selanjutnya dinyatakan menggunakan parameter kecepatan gelombang elastik ($v_p = 3 \text{ km/detik}$) dan RQD (60%), yaitu masuk pada kategori kelas C1.
- b. Tentukan tipikal metode penggalian berdasarkan kondisi batuan/tanah yang sesuai seperti dinyatakan pada Tabel 7 dengan cara:
 - 1) Identifikasi kondisi media dan kesesuaiannya dengan tipikal metode penggalian
 - Untuk material lempung (kelas E), permasalahan yang mungkin terjadi dapat diidentifikasi berdasarkan tujuan metode tambahan pada Tabel 10, yaitu:
 - Permasalahan stabilitas atap

- Permasalahan stabilitas pada muka bidang galian
- Permasalahan aliran air

Berdasarkan permasalahan tersebut, maka metode penggalian dengan bench, metode diagframa tengah, metode penggalian samping dapat digunakan dengan pertimbangan kemudahan pelaksanaan.

- Untuk material breksi (kelas CI), metode penggalian dengan bench dapat digunakan mengingat kelas batuan ini cukup stabil.
- c. Tentukan skema perkuatan dan tebal dinding tipikal berdasarkan kategori kelas batuan/tanah dengan cara:
- 1) Tentukan jenis perkuatan berdasarkan kriteria pada Tabel 8
 - Untuk material lempung (kelas E), disarankan untuk menggunakan jenis perkuatan beton semprot, perkuatan baja dan lantai kerja beton. Dinding dapat dianggap sebagai bagian dari perkuatan.
 - Untuk material breksi (kelas CI), disarankan untuk menggunakan jenis perkuatan beton semprot, baut batuan dan lantai kerja beton.
 - 2) Tentukan tipikal skema perkuatan dan tebal dinding terowongan berdasarkan kriteria pada Tabel 9.
 - Untuk material lempung (kelas E), tipikal skema perkuatan dan tebal dinding terowongan dapat mengacu pada kelas DII dengan menggunakan tipikal metode tambahan mengacu pada Tabel 11. Mengingat keterbatasan metode empiris pada katagori kelas E, maka diharuskan untuk melakukan evaluasi tipikal perkuatan dan tebal dinding menggunakan pendekatan analitis. Tipikal skema perkuatan untuk material lempung (kelas E) adalah sebagai berikut:
 - Beton semprot dengan tebal 25 cm
 - Perkuatan baja profil H-200 dengan jarak antar perkuatan baja 1m atau kurang
 - Tebal dinding lengkung dan samping 40 cm.
 - Metode tambahan berupa perkuatan awal menggunakan *forepoling*,
 - Metode tambahan berupa perkuatan muka bidang galian menggunakan beton semprot atau pembautan pada muka bidang galian,
 - Metode tambahan berupa pemboran drainase bila disinyalir muka air tanah di lokasi proyek tinggi.
 - Untuk material breksi (kelas CI), tipikal pola perkuatan adalah sebagai berikut:
 - Beton semprot dengan tebal 15 cm,
 - Baut batuan dengan panjang 4m, dengan jarak arah melengkung dan memanjang 1,2 m dan 1,5 m. Area pemasangan pada bench, karena *heading* atas menggunakan kategori untuk material lempung (kelas E),
 - Ketebalan lantai kerja beton = 45 cm.
 - 3) Pembuatan gambar tipikal metode penggalian dan sistem perkuatan berdasarkan penjelasan pada butir b dan c dapat dilihat pada Gambar C.2.



Gambar C.2 - Contoh tipikal skema penggalian terowongan

Lampiran D (Informatif)

Contoh penentuan tipikal metode penggalian dan sistem perkuatan menggunakan metode beda hingga

Diketahui rencana terowongan dengan deskripsi seperti diperlihatkan pada Lampiran A. Untuk mengetahui metode penggalian dan perkuatan terowongan yang diperlukan, maka dilakukan pendekatan numerik dengan tahapan sebagai berikut:

1. Penentuan parameter perencanaan

Parameter perencanaan didapatkan berdasarkan penyelidikan bawah permukaan dengan jenis pengujian yang dijelaskan pada sub bab 7.2. Untuk model material *mohr-coloumb*, parameter yang dibutuhkan beserta asumsi parameter untuk material lempung (Kelas E) dan material breksi (kelas CI) diperlihatkan pada Tabel D.1.

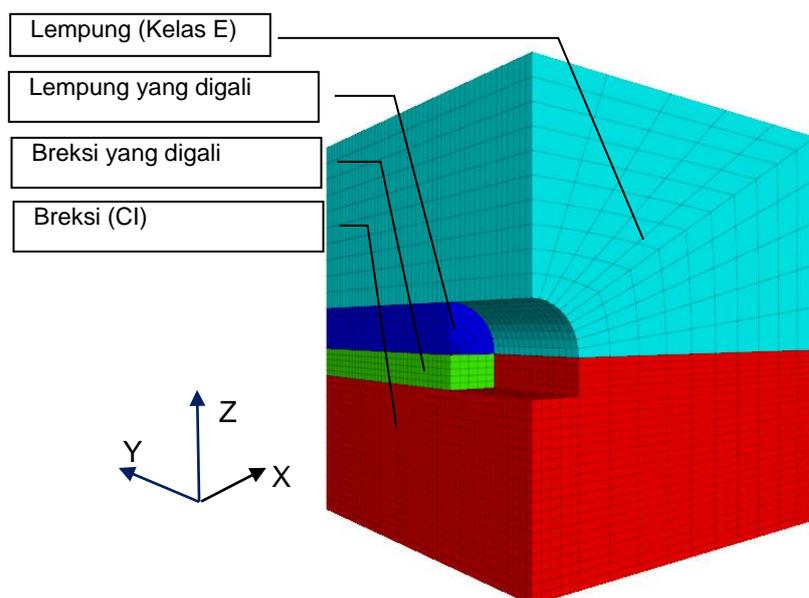
Tabel D.1 Parameter model *mohr-coloumb*

Lapisan	Modulus youngs, E	Kohesi, c	Sudut geser dalam, ϕ	rasio poisson, ν	Bulk modulus, K	Shear modulus, G	Tension modulus, T
	kPa	Kpa	°				
Lempung (Kelas E)	5,000	20	25	0.3	4.17E+03	1.92E+03	4.29E+01
Breksi (Kelas CI)	500,000	350	40	0.3	4.17E+05	1.92E+05	4.17E+02

2. Pembuatan geometri terowongan

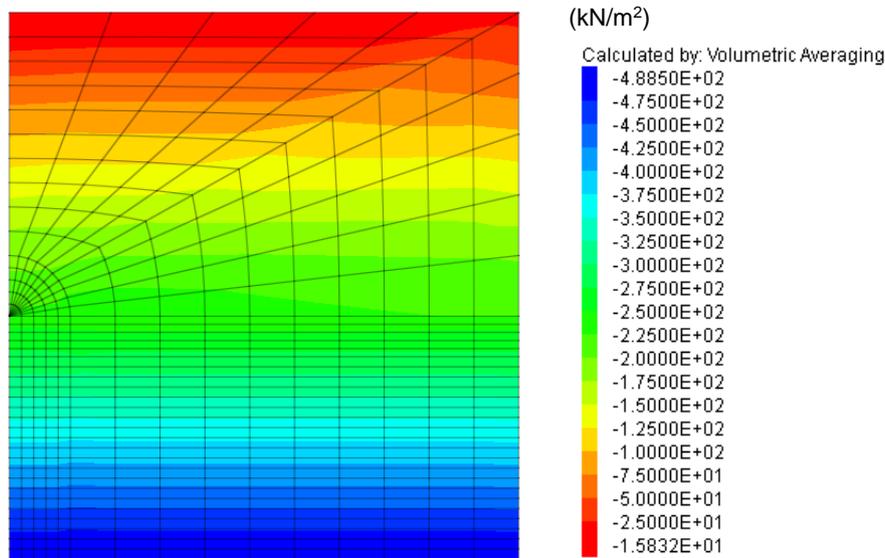
Tahapan yang dilakukan mengacu pada 5.1.2, yaitu:

- a. Buat perlapisan batuan/tanah yang akan dimodelkan mengacu pada Gambar C.1.
- b. Tentukan posisi elevasi rencana terowongan yang akan dimodelkan mengacu pada Gambar C.1.
- c. Tentukan bentuk penampang penggalian yang akan dimodelkan pada tahap awal evaluasi adalah penggalian dengan 2 bagian, yaitu bagian bench atas dan bench bawah.
- d. Pembuatan geometri dengan sistem koordinat lokal dilakukan berdasarkan kelompok jenis material batuan/tanah dan area penggalian muka bidang galian terowongan seperti contoh model yang diperlihatkan pada Gambar D.1.



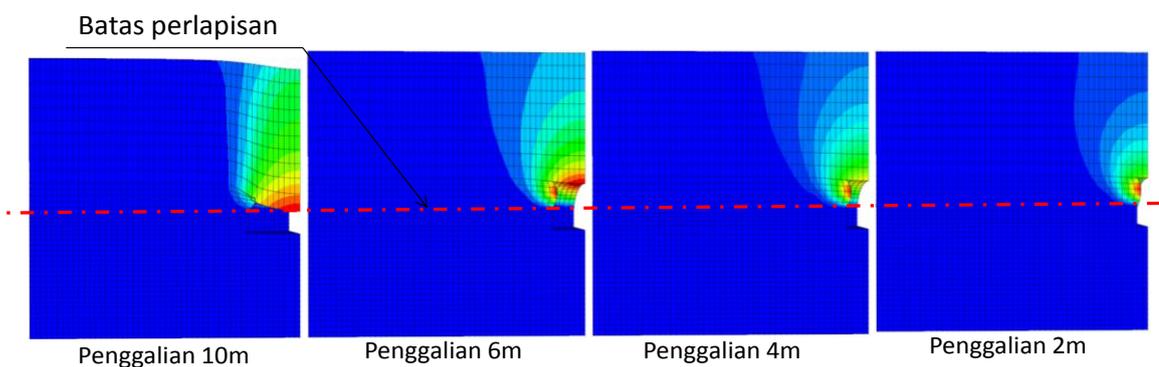
Gambar D.1- Contoh pengelompokan bentuk jaring berdasarkan jenis material

- e. Pengekangan dilakukan pada arah sumbu X dan Y pada kedua sisi bidang permukaan agar tidak terjadi perpindahan pada kedua sumbu tersebut. Pengekangan dilakukan pula pada sumbu dasar Z agar tidak terjadi perpindahan pada dasar permodelan. Sumbu permukaan atas Z tidak dikekang agar perpindahan arah $-Z$ (arah kebawah sumbu Z) dapat terjadi agar deformasi arah vertikal akibat beban gravitasi dapat diketahui.
3. Setelah geometri terowongan telah selesai dibuat, maka tahapan selanjutnya adalah sebagai berikut:
- a. Lakukan perhitungan tegangan awal menggunakan persamaan 3 dengan hasil permodelan diperlihatkan pada Gambar D.2.



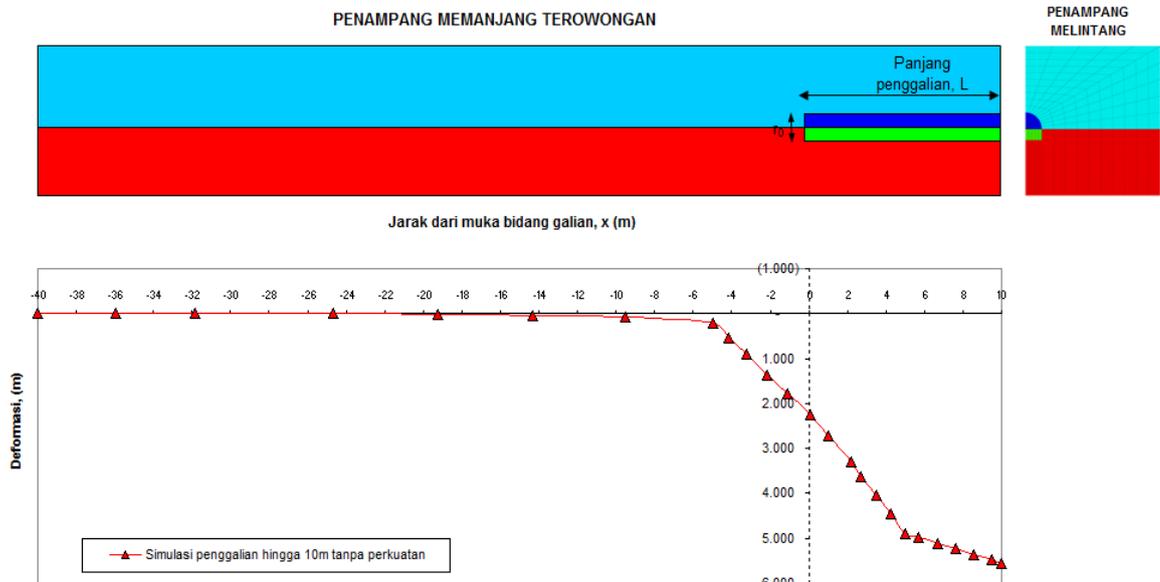
Gambar D.2- Contoh kontur *Initial principal stress*

- b. Lakukan pengembalian kondisi perpindahan menjadi nol untuk menghindarkan terjadinya penambahan perpindahan akibat perhitungan tegangan awal.
- c. Tahapan penggalian tanpa perkuatan dilakukan dengan laju penggalian setiap 1 m, berdasarkan Tabel 8, dengan hasil permodelan hingga model mencapai keruntuhan diperlihatkan pada Gambar D-3.



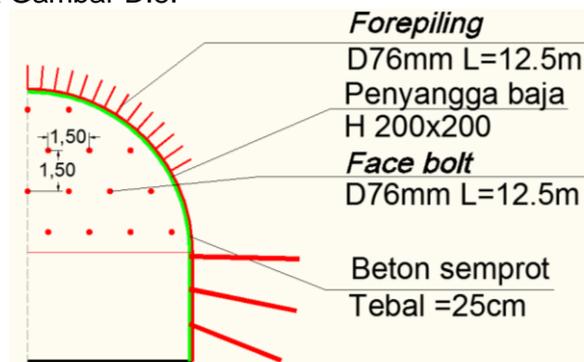
Gambar D.3- Contoh hasil perilaku deformasi pada media campuran saat tahapan penggalian tanpa perkuatan dilakukan hingga model mengalami keruntuhan

- d. Tampilkan perpindahan total pada titik tinjau yang memiliki kontur perpindahan terbesar. Dalam hal ini, titik tinjau terbesar adalah pada atap terowongan dengan hasil tampilan perpindahan total pada atap terowongan diperlihatkan pada Gambar D-4.



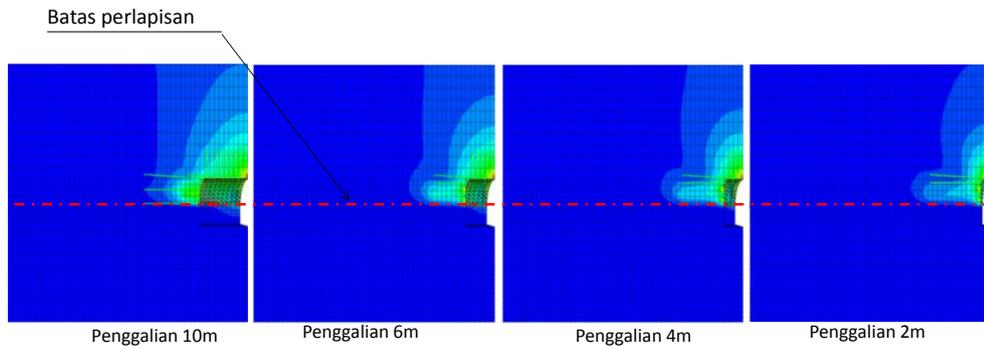
Gambar D.4 – Contoh tampilan perpindahan total pada atap terowongan saat dilakukan penggalian tanpa perkuatan hingga 10m.

- e. Hasil permodelan menunjukkan bahwa perpindahan total pada atap saat dilakukan penggalian terowongan dengan panjang penggalian 1 m adalah 0,78 m. Deformasi yang terjadi lebih besar dari deformasi izin (10 cm), oleh karenanya diperlukan metode tambahan untuk meningkatkan stabilitas pada atap terowongan sebelum dilakukan penggalian dengan skema perkuatan mengacu pada Tabel 11.
4. Permodelan metode penggalian terowongan dengan perkuatan dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:
- Skema perkuatan ditentukan dengan konsep untuk meningkatkan stabilitas muka bidang galian dengan menggunakan konsep perkuatan tambahan berupa kombinasi *forepiling* dengan penyangga baja, *face bolt* dan beton semprot dengan konfigurasi diperlihatkan pada Gambar D.5.



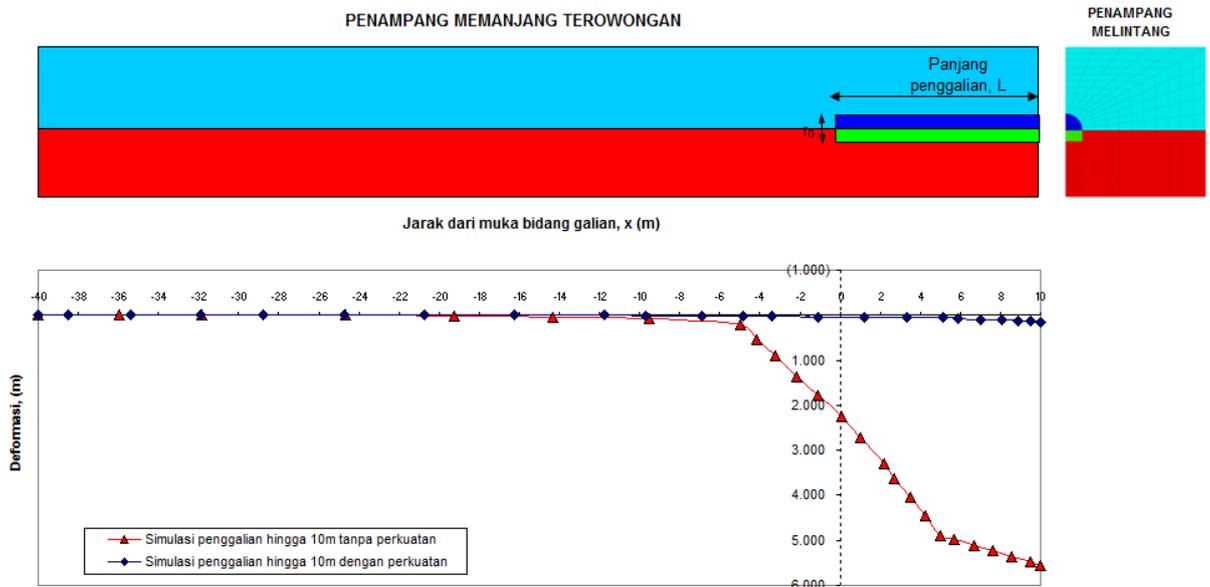
Gambar D.5 - Contoh konfigurasi perkuatan untuk meningkatkan stabilitas muka bidang galian

- Tahapan penggalian dan pemasangan sistem penyangga dilakukan secara simultan dan harus menggambarkan kondisi yang mendekati kondisi yang akan dilaksanakan pada konstruksi penggalian dan pemasangan penyangga. Evaluasi perpindahan total dilakukan pada titik tinjau atap, dinding dan muka bidang galian. Selanjutnya tampilkan pola deformasi pada setiap tahapan penggalian dan pemasangan penyangga seperti diperlihatkan pada Gambar D-6.



Gambar D - 6 Contoh pola deformasi pada media campuran saat tahapan penggalian dengan perkuatan dilakukan hingga penggalian 10m.

c. Untuk mengetahui efektifitas sistem perkuatan yang digunakan, maka tampilkan perpindahan total pada titik tinjau yang memiliki kontur perpindahan terbesar untuk model penggalian tanpa perkuatan dan dengan perkuatan. Dalam hal ini, titik tinjau terbesar adalah pada atap terowongan dengan hasil tampilan diperlihatkan pada Gambar D-7. Hasil perbandingan menunjukkan sistem perkuatan yang diterapkan efektif dengan perpindahan total pada atap (0,2 cm), dinding samping (0,05 cm) dan kaki terowongan (0,1 cm) berada dibawah deformasi izin atau lebih kecil dari 10 cm.



Gambar D-7 Perbandingan deformasi pada atap terowongan saat dilakukan penggalian tanpa perkuatan dan dengan perkuatan hingga 10 m.

Bibliografi

- Desyanti, Ariestianty, Susy K., Aldiamar, F. 2012. Naskah Ilmiah: *Kajian Perencanaan dan Pelaksanaan Terowongan Pada Media Campuran Tanah-Batuan*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan, Kementerian Pekerjaan Umum.
- 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.
- Pusat Litbang Prasarana Transportasi. 2002. *Pedoman Teknis Umum Terowongan Jalan (General Guideline on Road Tunnels)* (Draft Akhir).
- Zhao, Jian. 2010. *TBM Tunnelling in Mixed Ground*. (www.etcg.upc.edu/docencia/aula-paymacotas/granit/ponencies/zhao.pdf, diakses 16 Maret 2012).
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 19/PRT/M/2011 mengenai *Persyaratan Teknis Jalan dan Kriteria Perencanaan Teknis Jalan*.

Daftar nama dan lembaga

1. Pemrakarsa

Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan, Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum.

2. Penyusun

Nama	Lembaga
Fahmi Aldiamar, ST., MT	Pusat Litbang Jalan dan Jembatan
Susy Kartikasari, ST., M.Sc	Pusat Litbang Jalan dan Jembatan
Desyanti, ST., MT	Pusat Litbang Jalan dan Jembatan

3. Daftar peserta rapat internal Gugus Kerja Geoteknik Jalan

R0 Perencanaan teknis metode penggalian dan sistem perkuatan terowongan jalan pada media campuran tanah-batuan ini sebelumnya telah dibahas pada Diskusi Teknik Gugus Kerja Geoteknik Jalan yang dilaksanakan pada Senin, 16 Desember 2013, yang dihadiri oleh narasumber:

- 1) Rudy Febrijanto, ST., MT
- 2) Ir. GJW Fernandez
- 3) Rakhman Taufik, ST., M.Sc
- 4) Dr.Ir. M. Eddie Soenaryo,M.Sc
- 5) Dr. Ir. Hindra Mulya, MM.
- 6) Dr. Ir. Imam Aschuri, MT.
- 7) Abinhot Sihotang, ST., MT.
- 8) Ir. Bemby Sunaryo, M.Sc.
- 9) Dra. Lien Sutini (Balai Bahasa).