



KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT
DIREKTORAT JENDERAL BINA MARGA

Jl. Pattimura No.20 Kebayoran Baru Jakarta Selatan 12110, Telp. (021) 7203165, Fax (021) 7393938

Yth.

1. Sekretaris Direktorat Jenderal Bina Marga
2. Para Direktur di Direktorat Jenderal Bina Marga
3. Para Kepala Balai Besar/Balai Pelaksanaan Jalan Nasional
4. Para Kepala Satuan Kerja di Direktorat Jenderal Bina Marga

SURAT EDARAN

NOMOR: 17 /SE/Db/2021

PEDOMAN PENYELIDIKAN GEOLOGI TEKNIK
DALAM PEMBANGUNAN TEROWONGAN JALAN

A. Umum

Penyelidikan geologi teknik perlu dilakukan pada tahap pemilihan *rute*, perancangan dan perencanaan konstruksi, dan pemeliharaan terowongan jalan. Penyelidikan geologi teknik telah menjadi bagian penting dalam pembangunan terowongan jalan di berbagai negara. Sebagai contoh, pedoman teknis yang dipublikasikan oleh *Federal Highway Administration* dan *Japan Society of Civil Engineers* menekankan pentingnya penyelidikan geomorfologi, batuan dan tanah, struktur geologi, air tanah, dan kondisi geologi teknik lainnya dalam pembangunan terowongan jalan di Amerika dan Jepang.

Prosedur dan ketentuan penyelidikan geologi teknik, meliputi penyelidikan aspek geomorfologi, batuan dan tanah, struktur geologi, air tanah, dan keempaan, pada tiap tahap pembangunan terowongan jalan di Indonesia. Pedoman ini juga menetapkan prosedur dan ketentuan penyelidikan dampak terhadap lingkungan geologi akibat pembangunan terowongan jalan. Prosedur dan ketentuan penyelidikan beberapa aspek geologi teknik, terutama aspek batuan dan tanah, dalam Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 30/SE/M/2015 dan SNI 8460:2017 menjadi acuan dalam pedoman ini.

Surat Edaran ini mengatur pedoman penyelidikan geologi teknik dalam pembangunan terowongan jalan. Pedoman penyelidikan geologi teknik ini diharapkan dapat melengkapi pedoman dan standar penyelidikan dalam pembangunan terowongan jalan di Indonesia yang telah ditetapkan sebelumnya.

B. Dasar Pembentukan

1. Undang-Undang Nomor 38 Tahun 2004 tentang Jalan (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2004 Nomor 132, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 4444)
2. Undang-Undang Nomor 22 Tahun 2009 tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2009 Nomor 96, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 5025)
3. Peraturan Pemerintah Nomor 34 Tahun 2006 tentang Jalan (Lembar Negara Republik Indonesia Tahun 2006 Nomor 86, Tambahan Lembar Negara Republik Indonesia Nomor 4655)
4. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum No.19/PRT/M/2011 tentang Persyaratan Teknis Jalan dan Kriteria Perencanaan Teknis Jalan.
5. Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 30/SE/M/2015 tentang Tentang Pedoman Metode Perancangan Penggalian dan Sistem Perkuatan Terowongan Jalan Pada Media Campuran Tanah-Batuan. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
6. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 13/PRT/M/2020 tentang Organisasi dan Tata Kerja Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2020 Nomor 473)
7. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 16/PRT/M/2020 tentang Organisasi dan Tata Kerja Unit Pelaksana Teknis Di Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat sebagaimana telah diubah dengan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 6 Tahun 2020 tentang Perubahan Atas Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Nomor 16 Tahun 2020 tentang Organisasi Dan Tata Kerja Unit Pelaksana Teknis Di Kementerian Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2020 Nomor 1144)

C. Maksud dan Tujuan

Surat Edaran ini dimaksudkan sebagai acuan teknis dalam pelaksanaan penyelidikan geologi teknik, meliputi penyelidikan aspek geomorfologi, batuan dan tanah, struktur geologi, airtanah, dan kegempaan, pada tiap tahap pembangunan terowongan jalan di Indonesia.

Adapun Surat Edaran ini bertujuan untuk membantu pemilik pekerjaan, perencana, dan pelaksana dalam merencanakan penyelidikan geologi teknik untuk pembangunan terowongan.

D. Ruang Lingkup

Lingkup Surat Edaran ini berisi panduan penyelidikan geologi teknik yang diperlukan dalam berbagai tahap pembangunan terowongan jalan di Indonesia meliputi terowongan pegunungan (*mountain tunnel*), terowongan perisai (*shield tunnel*), dan terowongan gali dan tutup (*cut-and-cover tunnel*).

Ketentuan lebih rinci mengenai Pedoman Penyelidikan Geologi Teknik Dalam Pembangunan Terowongan Jalan termuat dalam Lampiran yang merupakan bagian yang tidak terpisah dari Surat Edaran ini.

E. Penutup

Surat Edaran ini mulai berlaku sejak tanggal ditetapkan.

Demikian, atas perhatian Saudara, disampaikan terima kasih.

Ditetapkan di Jakarta

Pada tanggal : 11 Oktober 2021

DIREKTUR JENDERAL BINA MARGA,



HEDY RAHADIAN
NIP. 19640314 199003 1 002



PEDOMAN

No. 10 / P / BM / 2021

Bidang Jembatan dan Terowongan

Penyelidikan Geologi Teknik Dalam Pembangunan Terowongan Jalan



KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT

DIREKTORAT JENDERAL BINA MARGA

Daftar Isi

Daftar Isi.....	i
Prakata.....	vii
Pendahuluan.....	viii
1 Ruang lingkup	1
2 Acuan normatif	6
3 Istilah dan definisi.....	18
4 Ketentuan penyelidikan geologi teknik	25
4.1 Tahap pembangunan terowongan	25
4.1.1 Tahap pra-studi kelayakan.....	25
4.1.2 Tahap studi kelayakan	26
4.1.3 Tahap rencana teknik awal	27
4.1.4 Tahap rencana teknik akhir.....	28
4.1.5 Tahap konstruksi	29
4.1.6 Tahap pemeliharaan	34
4.2 Penyelidikan umum	34
4.2.1 Penyelidikan terowongan pegunungan.....	34
4.2.1 Penyelidikan terowongan perisai	48
4.2.2 Penyelidikan terowongan gali-dan-tutup.....	50
4.2.3 Penyelidikan dampak terhadap lingkungan	52
4.3 Penyelidikan pada kondisi khusus	53
4.3.1 Kondisi geologi teknik khusus.....	53
4.3.2 Kondisi lokasi dan geometri khusus.....	55
5 Metode penyelidikan geologi teknik.....	56
5.1 Penyelidikan geomorfologi	57
5.2 Penyelidikan batuan dan tanah	64
5.2.1 Pemetaan geologi.....	65
5.2.2 Pemetaan karakteristik geologi teknik batuan dan tanah.....	70

5.2.3 Pengujian lapangan batuan dan tanah	76
5.2.3.1 Survei geofisika	76
5.2.3.2 Pengeboran Inti dan Pengambilan Sampel	82
5.2.3.3 Pengujian in-situ batuan dan tanah lainnya	85
5.2.4 Pengujian laboratorium batuan dan tanah	88
5.2.5 Klasifikasi massa batuan	94
5.2.6 Batuan berpotensi <i>squeezing</i> dan <i>rock burst</i>	106
5.3 Penyelidikan struktur geologi	109
5.4 Penyelidikan airtanah	111
5.4.1 Pengukuran muka airtanah	115
5.4.2 Pengukuran permeabilitas lubang bor	116
5.4.3 Uji pemompaan sumur	117
5.4.4 Uji pemompaan akuifer	117
5.4.5 Uji kualitas airtanah	118
5.4.6 Prediksi rembesan airtanah ke dalam terowongan	119
5.4.7 Penyelidikan risiko rembesan airtanah pada area kars	121
5.5 Penyelidikan kegempaan	123
5.5.1 Penyelidikan sesar aktif dan paleoseismik	123
5.5.2 Penyelidikan beban gempa	125
Bibliografi	127

Daftar Gambar

Gambar 1 - Diagram alir penyelidikan geologi teknik dalam pembangunan terowongan dengan metode konstruksi terowongan pegunungan (modifikasi dari JSCE, 2018b).....	36
Gambar 2 - Diagram alir proses pembangunan terowongan perisai (modifikasi dari JSCE, 2018c).....	48
Gambar 3 - Diagram alir proses pembangunan terowongan gali-dan-tutup (modifikasi dari JSCE, 2018a)	51
Gambar 4 - Pola penyaluran sungai dasar (Howard, 1967)	63
Gambar 5 - Tahapan kerja kegiatan pemetaan geologi berdasarkan SNI 13-4691-1998 (BSN, 1998).....	67
Gambar 6 - Klasifikasi batuan beku dalam SNI 2436:2008	69
Gambar 7 - Klasifikasi batuan sedimen dalam SNI 2436:2008	69
Gambar 8 - Klasifikasi batuan metamorf dalam SNI 2436:2008	70
Gambar 9 - Ilustrasi prosedur pengukuran dan perhitungan PMB (SNI 2436:2008)	95
Gambar 10 - Kategori estimasi kekuatan berdasarkan klasifikasi indeks kualitas terowongan Q (Grimstad dan Barton, 1993)	99
Gambar 11 - Hubungan antara stand-up time, bentang, dan RMR (Bieniawski, 1989).....	101
Gambar 12 - Estimasi nilai GSI untuk massa batuan (Hoek and Marinos, 2000).....	104
Gambar 13 - Klasifikasi squeezing berdasarkan regangan massa batuan (strain) dan rasio kekuatan massa batuan dengan tegangan in-situ (Hoek, 2000)	106

Daftar Tabel

Tabel 1	- Metode konstruksi terowongan (modifikasi dari SNI 8460:2017; JICA, 2018; JSCE, 2018b).....	1
Tabel 2	- Tujuan, lingkup, serta area dan skala penyelidikan geologi teknik pada tiap tahap pembangunan terowongan jalan. (modifikasi dari PU, 2005; JSCE, 2018b; BPJT, 2018, 2020a, 2020b).....	31
Tabel 3	- Metode penyelidikan dan aspek geologi teknik yang diinvestigasi dalam pembangunan terowongan dengan metode konstruksi terowongan pegunungan (modifikasi dari JSCE, 2018b)	37
Tabel 4	- Metode, parameter, dan kegunaan penyelidikan kondisi geologi teknik umum dalam tiap tahap pembangunan terowongan dengan metode konstruksi terowongan pegunungan (modifikasi dari JSCE, 2018b).....	39
Tabel 5	- Aspek penyelidikan terkait kondisi geologi teknik dalam pembangunan terowongan dengan metode konstruksi terowongan perisai (modifikasi dari JSCE, 2018c).....	49
Tabel 6	- Penyelidikan dampak pembangunan terowongan terhadap lingkungan geologi (modifikasi dari JSCE, 2018b)	52
Tabel 7	- Aspek penyelidikan pada kondisi geologi teknik khusus (modifikasi dari JSCE, 2018b)	54
Tabel 8	- Fenomena problematik dan informasi penting yang harus diinvestigasi pada lokasi konstruksi dengan kondisi geologi teknik khusus (modifikasi dari JSCE, 2018b; AGS(HK), 2005).....	54
Tabel 9	- Fenomena problematik dan informasi penting yang harus diinvestigasi dalam pembangunan terowongan dengan kondisi lokasi dan geometri khusus (modifikasi dari JSCE, 2018b)	56
Tabel 10	- Sumber data sekunder kondisi geologi teknik di Indonesia (dirangkum dari berbagai sumber)	58
Tabel 11	- Pola penyaluran dasar serta karakteristik dan kondisi geologi yang mempengaruhinya (modifikasi dari Morisawa, 1985)	63
Tabel 12	- Perbandingan antar metode pemetaan geologi (JICA, 2018)	67
Tabel 13	- Klasifikasi tingkat pelapukan batuan (ISRM, 1981).....	74
Tabel 14	- Klasifikasi batuan dan tanah berdasarkan nilai UCS (ISRM, 1981)	75

Tabel 24 - Metode survei geofisika, parameter yang diukur, sifat fisik, model sifat fisik, aplikasi terhadap penyelidikan geologi teknik, dan standar acuan pengujian (modifikasi dari FHWA, 2009 dalam Surat Edaran Menteri PUPR No.30/SE/M/2015, dan Anderson, 2006)	77
Tabel 25 - Metode geofisika yang diaplikasikan pada penyelidikan geologi teknik (modifikasi dari Anderson, 2006 dan ASTM D 6429-99)	80
Tabel 26 - Jarak dan kedalaman pengeboran berdasarkan jenis terowongan dan kondisi lokasi (modifikasi dari SNI 8460:2017; AASHTO, 1988; FHWA, 2009; USACE, 1997)	84
Tabel 27 - Jenis pengujian in-situ batuan dan tanah, tipe material yang sesuai diuji, parameter yang didapatkan, serta referensi pedoman standar SNI, ASTM, dan standar lain. (FHWA, 2002a, 2009; USACE, 1997, 2001; BSN, 2017; dan JICA, 2018)	86
Tabel 28 - Jenis uji laboratorium batuan dan tanah beserta acuan (FHWA, 2009; PUPR, 2015; BSN, 2017).....	89
Tabel 29 - Persyaratan jumlah minimum benda uji yang disarankan dalam SNI 8460:2017 (BSN, 2017)	91
Tabel 30 - Uji klasifikasi tanah berdasarkan jenis tanah dan benda uji (dalam SNI 8460:2017)	92
Tabel 31 - Uji laboratorium untuk penentuan parameter geoteknik berdasarkan SNI 8460:2017 (BSN, 2017)	93
Tabel 32 - Jenis uji mekanika batuan, bentuk benda uji, dimensi, dan jumlah minimum pengujian berdasarkan SNI 2848:2008 (BSN, 2008).....	94
Tabel 15 - Deskripsi dan nilai parameter untuk klasifikasi Q-system (simplifikasi dari Grimstad dan Barton, 1993)	96
Tabel 16 - Nilai rasio perkuatan ekskavasi (ESR) untuk berbagai struktur bawah tanah (Barton et al., 1974)	97
Tabel 17 - Parameter RMR dan bobot (Bieniawski, 1989).....	100
Tabel 18 - Pengaruh orientasi diskontinuitas terhadap arah penggalian terowongan (Bieniawski, 1989).....	100
Tabel 19 - Pengaruh orientasi diskontinuitas pada nilai RMR (Bieniawski, 1989).....	101
Tabel 20 - Panduan metode penggalian dan sistem penyangga terowongan dengan bentang 10 m berdasarkan RMR (Bieniawski, 1989).....	101

Tabel 21 - Klasifikasi massa batuan JSCE dalam Surat Edaran Kementerian PUPR (2015).....	105
Tabel 22 - Kelas squeezing berdasarkan regangan, permasalahan geoteknik yang dialami, serta tipe perkuatan yang direkomendasikan (Hoek dan Marinos, 2000)	107
Tabel 23 - Penilaian risiko rock burst berdasarkan parameter geodinamik (Zhu et al., 2018).....	109
Tabel 33 - Metode penyelidikan airtanah (modifikasi dari JSCE, 2018b)	114
Tabel 34 - Indikasi kondisi kekar massa batuan berdasarkan uji Lugeon (Look, 2014).....	116
Tabel 35 - Persamaan analitik untuk memprediksi rembesan airtanah ke dalam terowongan (Hadi dan Homayoon, 2017).....	120
Tabel 36 - Penilaian risiko rembesan airtanah ke dalam terowongan selama penggalian pada karst (modifikasi dari Wang et al., 2019).....	122
Tabel 37 - Klasifikasi situs (AASHTO, 2012)	126

Prakata

Pedoman Penyelidikan Geologi Teknik dalam Pembangunan Terowongan Jalan disusun melalui studi pustaka beberapa standar dan pedoman penyelidikan tapak bagi pembangunan terowongan jalan yang berlaku di beberapa negara, antara lain di Jepang (JSCE, 2018), Hong Kong (AGS, 2004), Amerika Serikat (FHWA, 2009), serta Norwegia (NPRA, 2005). Penyelidikan batuan dan tanah dalam dokumen ini juga mengacu pada Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat No: 30/SE/M/2015 dan SNI 8460:2017.

Penyusunan pedoman ini telah melalui serangkaian diskusi dalam diskusi kelompok terarah (FGD) pada tanggal 6 Maret dan 22 Desember 2020, Rapat Legalisasi Pedoman Khusus di Lingkungan Direktorat Jendral Bina Marga pada tanggal 5 Maret 2021, Rapat Pembahasan Draf Pedoman dengan Balai Geoteknik, Terowongan, dan Struktur pada tanggal 19 Maret 2021, dan Rapat Finalisasi Pedoman Penyelidikan Geologi Teknik dalam Pembangunan Terowongan Jalan dengan Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan pada tanggal 4 Juni 2021.

Pedoman ini disusun oleh Balai Geoteknik, Terowongan, dan Struktur dengan bekerja sama dengan Masyarakat Geologi Teknik Indonesia (MGTI) dan Ikatan Ahli Geologi Indonesia (IAGI).

Jakarta, Oktober 2021
Direktur Jenderal Bina Marga



Hady Rahadian

Pendahuluan

Sebagian wilayah Indonesia terdiri dari endapan Kwartar dan batuan vulkanik yang belum terkonsolidasi, batuan endapan dan alterasi hidrotermal dengan kandungan lempung aktif, dan batuan karbonat yang mudah mengalami pelarutan. Pergerakan lempeng-lempeng tektonik utama yang mengelilingi Indonesia, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, Lempeng Laut Filipina, dan Lempeng Pasifik, menyebabkan terbentuknya struktur geologi lipatan, kekar, dan sesar pada batuan sehingga kekuatan batuan berkurang. Kondisi batuan diperburuk oleh proses pelapukan intensif yang terjadi karena Indonesia berada di daerah tropis. Gempa bumi yang sering terjadi dapat menambah beban dinamik sehingga dapat mengganggu kestabilan konstruksi. Pembangunan terowongan memiliki risiko yang tinggi mulai dari terjadinya kebocoran airtanah hingga keruntuhan terowongan secara tiba-tiba. Mempertimbangkan kompleksitas kondisi geologi teknik Indonesia, penyelidikan geologi teknik sangat penting dilakukan dalam pembangunan terowongan jalan demi kelancaran pelaksanaan pembangunan dan keberlangsungan konstruksi terowongan.

Penyelidikan geologi teknik perlu dilakukan pada tahap pemilihan rute, perancangan dan perencanaan konstruksi, dan pemeliharaan terowongan jalan (JSCE, 2018). Penyelidikan geologi teknik telah menjadi bagian penting dalam pembangunan terowongan jalan di berbagai negara. Sebagai contoh, pedoman teknis yang dipublikasikan oleh Federal Highway Administration FHWA (Hung et al., 2009) dan Japan Society of Civil Engineers JSCE (JSCE, 2018) menekankan pentingnya penyelidikan geomorfologi, batuan dan tanah, struktur geologi, airtanah, dan kondisi geologi teknik lainnya dalam pembangunan terowongan jalan di Amerika dan Jepang.

Prosedur dan ketentuan dalam perencanaan pembangunan terowongan jalan di Indonesia telah ditetapkan dalam Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat No: 30/SE/M/2015 dan SNI 8460:2017. Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat No: 30/SE/M/2015 menetapkan ketentuan dan prosedur penyelidikan batuan dan tanah di lapangan dan laboratorium dalam menentukan metode penggalian dan sistem perkuatan terowongan pada media campuran tanah dan batuan. SNI 8460:2017 menetapkan persyaratan perancangan geoteknik, termasuk jenis-jenis penyelidikan yang diperlukan, dalam pembangunan terowongan dengan metode konstruksi terowongan pegunungan, perisai, dan gali-dan-tutup. Walaupun bersifat menyeluruh, baik Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat No: 30/SE/M/2015 maupun SNI 8460:2017 belum

menetapkan prosedur dan ketentuan area dan skala, metode, dan aspek penyelidikan geologi teknik secara detil pada tiap tahap pembangunan terowongan jalan, mulai tahap pra-studi kelayakan hingga tahap pemeliharaan. Kedua dokumen juga belum menetapkan prosedur dan ketentuan penyelidikan aspek geologi teknik yang diperlukan pada kondisi khusus.

Pedoman ini berisi prosedur dan ketentuan penyelidikan geologi teknik, meliputi penyelidikan aspek geomorfologi, batuan dan tanah, struktur geologi, airtanah, dan kegempaan, pada tiap tahap pembangunan terowongan jalan di Indonesia. Pedoman ini juga menetapkan prosedur dan ketentuan penyelidikan dampak terhadap lingkungan geologi akibat pembangunan terowongan jalan. Prosedur dan ketentuan penyelidikan beberapa aspek geologi teknik, terutama aspek batuan dan tanah, dalam Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat No: 30/SE/M/2015 dan SNI 8460:2017 menjadi acuan dalam pedoman ini. Dengan demikian, pedoman penyelidikan geologi teknik ini diharapkan dapat melengkapi pedoman dan standar penyelidikan dalam pembangunan terowongan jalan di Indonesia yang telah ditetapkan sebelumnya.

Penyelidikan Geologi Teknik Dalam Pembangunan Terowongan Jalan

1 Ruang lingkup

Pedoman ini berisi panduan penyelidikan geologi teknik yang diperlukan dalam berbagai tahap pembangunan terowongan jalan di Indonesia. Pedoman ini meliputi pedoman penyelidikan geologi teknik dalam pembangunan terowongan jalan dengan metode konstruksi terowongan pegunungan (*mountain tunnel*), terowongan perisai (*shield tunnel*), dan terowongan gali-dan-tutup (*cut-and-cover tunnel*). Penyelidikan geologi teknik meliputi penyelidikan lapangan dan laboratorium.

Pemilihan metode konstruksi terowongan pegunungan, terowongan perisai, dan terowongan gali-dan-tutup didasarkan pada kondisi lokasi dan geologi terowongan (JICA, 2018). Metode konstruksi terowongan batuan (*rock tunnelling method*) cenderung dipilih untuk terowongan di daerah pegunungan atau perbukitan, sehingga sering disebut juga metode konstruksi terowongan pegunungan, sementara metode konstruksi terowongan perisai and terowongan gali-dan-tutup cenderung dipilih untuk terowongan perkotaan pada topografi datar. Namun, batas pemilihan metode konstruksi terowongan tidak tegas, tergantung pada topografi dan kondisi geologi lainnya. Dalam beberapa kasus, metode gali-dan-tutup digunakan pada portal terowongan pegunungan dan metode terowongan batuan dipilih dalam pembangunan terowongan perkotaan. Kondisi geologi yang sesuai untuk masing-masing terowongan diperlihatkan pada Tabel 1. Metode konstruksi terowongan jalan lainnya, seperti terowongan di bawah air (*immersed tunnel*), di luar lingkup pedoman ini.

Tabel 1 - Metode konstruksi terowongan
(modifikasi dari SNI 8460:2017; JICA, 2018; JSCE, 2018 b)

Aspek	Metode Konstruksi		
	Terowongan pegunungan (<i>mountain tunnel</i>)	Terowongan perisai (<i>shield method</i>)	Terowongan gali-dan-tutup (<i>cut-and-cover tunnel</i>)
Gambaran umum	Memanfaatkan secara penuh fungsi perkuatan/dukungan alami dari batuan	Perisai didorong dalam tanah secara bertahap membentuk segmen-segmen terowongan,	Batuan/tanah diekskavasi dari permukaan untuk membangun

Aspek	Metode Konstruksi		
	Terowongan pegunungan (<i>mountain tunnel</i>)	Terowongan perisai (<i>shield method</i>)	Terowongan gali-dan-tutup (<i>cut-and-cover tunnel</i>)
	<p>sekitar. Batuan distabilisasi selama ekskavasi dengan <i>shotcrete</i>, <i>rock bolts</i>, penyangga baja, dll. Syarat kondisinya adalah busur batuan dapat terbentuk dan muka galian tetap berdiri selama ekskavasi. Jika tidak, diperlukan metode perkuatan tambahan (<i>auxiliary method</i>).</p>	<p>kemudian dilapisi <i>lining</i> untuk menstabilkan muka dan dinding galian menggunakan <i>mud</i> atau <i>slurry</i> untuk melawan tegangan batuan/tanah atau hidrolika untuk konstruksi terowongan. Jenis perisai terbuka hanya dapat digunakan jika muka galian tetap berdiri. Jika tidak, diperlukan tindakan pengendalian</p>	<p>terowongan pada kedalaman yang diinginkan. Setelah itu, material yang diekskavasi ditimbun untuk mengembalikan permukaan tanah semula. Metode <i>full face</i> umumnya digunakan.</p>
Lokasi	Digunakan pada pegunungan, tetapi tergantung pada kondisi lokasi konstruksi dapat juga diaplikasikan pada area perkotaan	Digunakan pada area perkotaan yang cenderung datar	Digunakan pada area perkotaan yang cenderung datar. Terkadang dibangun sebagai titik awal/akhir dari terowongan perisai dan pegunungan
Kondisi geologi yang dapat diaplikasikan	Umumnya dapat diaplikasikan untuk batuan keras hingga batuan lunak Tersier. Metode ini juga bisa diaplikasikan pada batuan/tanah tak terkonsolidasi dengan	Umumnya, dapat diaplikasikan pada daerah pegunungan dengan batuan/tanah tak terkonsolidasi atau terkonsolidasi lemah, seperti aluvium sangat lunak, hingga batuan	Pada dasarnya tidak ada kondisi geologi dimana metode ini tidak dapat diaplikasikan. Sistem penahan tanah yang tepat dan/atau metode perkuatan

Aspek	Metode Konstruksi		
	Terowongan pegunungan (<i>mountain tunnel</i>)	Terowongan perisai (<i>shield method</i>)	Terowongan gali-dan-tutup (<i>cut-and-cover tunnel</i>)
	<p>kekuatan terkekang 0,1 MN/m² dan modulus deofrmasi lebih besar dari 10 MN/m².</p> <p>Perkuatan baja, metode ekskavasi, dan metode perkuatan tambahan dapat diubah tergantung variasi geologi yang ditemui.</p>	<p>lunak dan lapisan Neogen. Relatif mudah untuk merespon terhadap variasi geologi. Selain itu, pada beberapa kasus dapat diaplikasikan pada batuan keras.</p>	<p>tambahan dipilih tergantung kondisi tanah.</p>
Struktur Penyangga dan <i>Lining</i>	<p>Menggunakan sistem penyangga baja, <i>rock bolts</i>, dan <i>shotcrete Lining</i> pada dasarnya berupa beton biasa yang disemprot, tapi pada kasus dimana tegangan tanah bekerja <i>lining</i> dapat berupa beton bertulang.</p> <p>Zona portal umumnya diperkuat dengan baja tulangan / rebar untuk mencegah retakan akibat penyusutan</p>	<p>Susunan penyangga beton atau segmen baja di belakang mesin ekskavasi sebagai <i>lining</i> utama</p> <p>Pada beberapa kasus, <i>lining</i> dilakukan dengan beton biasa atau beton bertulang</p>	<p>Struktur kaku dari kerangka baja atau beton bertulang sebagai penyangga dasar</p>
Metode perkuatan tambahan (<i>auxiliary methods</i>)	<p>Ketika ada rembesan air tanah yang mempengaruhi perkuatan dari muka galian itu sendiri atau kestabilan batuan/tanah</p>	<p>Biasanya, perisai jenis tertutup tidak membutuhkan metode perkuatan tambahan, kecuali pada segmen awal dan akhir.</p>	<p>Metode perkuatan tambahan, seperti penetrasi batuan/tanah - dinding penahan tanah, metode reduksi</p>

Aspek	Metode Konstruksi		
	Terowongan pegunungan (<i>mountain tunnel</i>)	Terowongan perisai (<i>shield method</i>)	Terowongan gali-dan-tutup (<i>cut-and-cover tunnel</i>)
untuk air tanah	selama ekskavasi, metode <i>water sealing</i> seperti sumur dalam, titik sumur, atau terowongan drainase dibutuhkan.		air tanah, perbaikan tanah, dll. Biasanya diperlukan untuk mengatasi <i>boiling</i> atau <i>heaving</i>
Kedalaman terowongan dan ketebalan material penutup (<i>overburden</i>)	Ketebal <i>overburden</i> harus lebih dari 2D (D: diameter luar terowongan) Jika ketebalan <i>overburden</i> hanya beberapa meter hingga kurang dari 2D pada batuan/tanah tak terkonsolidasi, metode perkuatan tambahan dibutuhkan untuk membatasi keruntuhan <i>crown</i> atau penurunan tanah	Biasanya, <i>overburden</i> minimal adalah 1,0-1,5 D (D: diameter luar terowongan). Kedalaman maksimal pada massa batuan adalah sekitar 200 m (tegangan air 0,69 MPa). Pada beberapa kasus pada tanah pasiran, tegangan air dapat mencapai hingga 1 MPa.	Cocok untuk tebal <i>overburden</i> yang kecil, sekitar 20 m atau kurang. Akan tetapi tidak ada batas <i>overburden</i> minimal. Berdasarkan pengalaman, kedalaman maksimum terowongan mencapai sekitar 40 m.
Kondisi Air Tanah	Jika jumlah rembesan air besar atau kestabilan muka galian tidak bisa dicapai, metode perkuatan tambahan diperlukan. Perlu mempertimbangkan pengaruhnya terhadap lingkungan sekitar.	Pada tipe terbuka, penanggulangan seperti <i>pressure method</i> dan metode reduksi air bawah tanah dibutuhkan, tetapi pada tipe tertutup (<i>sealed type</i>) metode perkuatan tambahan hampir tidak diperlukan	Perlu melakukan penanggulangan seperti metode reduksi air tanah dan perbaikan tanah

Aspek	Metode Konstruksi		
	Terowongan pegunungan (<i>mountain tunnel</i>)	Terowongan perisai (<i>shield method</i>)	Terowongan gali-dan-tutup (<i>cut-and-cover tunnel</i>)
Bentuk profil melintang	<p>Profil berbentuk tapal kuda (<i>horseshoe</i>).</p> <p>Bentuk profil melintang yang menyesuaikan kondisi (<i>arbitrary</i>) dapat digunakan pada beberapa kasus, tetapi bentuk membusur direkomendasi dari bagian tengah ke atas (<i>crow</i>n).</p> <p>Bentuk profil dapat diganti selama konstruksi.</p>	<p>Ditentukan berdasarkan bentuk mesin ekskavasi terowongan perisai, tetapi pada dasarnya, bentuk profil cenderung sirkular.</p> <p>Bentuk profil semi-lingkar, multi-lingkar, oval, dll. juga dapat diekskavasi menggunakan mesin perisai khusus.</p> <p>Perubahan bentuk profil biasanya sulit dilakukan selama konstruksi.</p>	<p>Pada dasarnya bentuk profil cenderung persegi panjang, tetapi bentuk profil yang menyesuaikan kondisi (<i>arbitrary</i>) memungkinkan.</p> <p>Bentuk profil yang rumit dapat diekskavasi.</p>
Ukuran profil melintang	Umumnya, ukuran profil melintang bisa hingga sebesar 150 m ² . Profil terowongan pegunungan terbesar hingga kini adalah 370 m ² .	Ukuran terbesar profil adalah diameter perisai sekitar 17 m.	Tidak ada batasan terhadap ukuran profil melintang ketika menggunakan metode ini.
Alinyemen	Tidak ada batasan ketika menggunakan metode ini	Rasio minimum dari radius kurva/pembelokan terowongan terhadap diameter perisai adalah 3 hingga 5.	Tidak ada batasan ketika menggunakan metode ini

Aspek	Metode Konstruksi		
	Terowongan pegunungan (<i>mountain tunnel</i>)	Terowongan perisai (<i>shield method</i>)	Terowongan gali-dan-tutup (<i>cut-and-cover tunnel</i>)
Dampak terhadap lingkungan sekitar	<p>Metode perkuatan tambahan diperlukan untuk konstruksi sekitar. Ketika konstruksi dilakukan pada area pegunungan, kekurangan air harus dipertimbangkan, dan pada area urban, penurunan muka tanah yang dipicu oleh ekskavasi atau penurunan MAT. Terdapat batasan derajat dampak terhadap lalu lintas permukaan kecuali pada <i>shaft</i>. Polusi suara dan vibrasi terbatas pada area sekitar portal dan dapat ditanggulangi dengan dinding kedap suara.</p>	<p>Metode perkuatan tambahan atau perkuatan konstruksi eksisting bisa diperlukan untuk konstruksi sekitar tergantung jaraknya. Terdapat batasan derajat dampak terhadap lalu lintas permukaan, kecuali pada <i>shaft</i>. Polusi suara dan vibrasi terbatas pada area sekitar portal dan dapat ditanggulangi dengan dinding kedap suara.</p>	<p>Metode perkuatan tambahan dapat diperlukan untuk konstruksi sekitar. Lalulintas permukaan sebagian besar dapat dihindari karena area konstruksi harus ditutup selama konstruksi. Penanggulangan terhadap polusi suara dan vibrasi diperlukan pada seluruh tahap konstruksi.</p>

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 03-2487-1991	: Metode pengujian lapangan kekuatan geser baling tanah berkohesi.
SNI 03-2814-1992	: Metode pengujian indeks kekuatan batu dengan beban titik.
SNI 03-3637-1994	: Metode pengujian berat isi tanah berbutir halus dengan cetakan benda uji.
SNI 03-6376-2000	: Tata cara pembuatan sumur uji.
SNI 03-6436-2000	: Metode pengujian sumur injeksi dan pemompaan untuk penentuan sifat hidraulik untuk sistem akuifer (prosedur lapangan).
SNI 03-6453-2000	: Metode pengujian kelulusan air untuk lapisan tanah pondasi dengan cara pemompaan di lapangan.
SNI 03-6797-2002	: Tata cara klasifikasi tanah dan campuran tanah agregat untuk konstruksi jalan.
SNI 03-6802-2002	: Tata Cara Penyelidikan dan Pengambilan Contoh Uji Tanah dan Batuan untuk Keperluan Teknik.
SNI 03-6870-2002	: Cara uji kelulusan air di laboratorium untuk tanah berbutir halus dengan tinggi tekan menurun.
SNI 03-6871-2002	: Cara uji kelulusan air di laboratorium untuk tanah berbutir kasar dengan tinggi tekan tetap.
SNI 06-2413-2002	: Metode pengujian kadar padatan dalam air.
SNI 06-4139-1996	: Metode pengujian kadar karbon dioksida agresif dalam air secara titrimetri.
SNI 06-4824-1998	: Metode pengujian kadar klorin bebas dalam air dengan alat spektrofotometer sinar tampak secara dietil fenilindiamin.
SNI 06-6601-2001	: Tata penentuan sulfat dalam air secara gravimetri dengan pengeringan residu.
SNI 06-6989.14-2004	: Air dan air limbah - Bagian 12: Cara uji oksigen terlarut secara yodometri (modifikasi azida).
SNI 06-6989.20-2019	: Air dan air limbah - Bagian 12: Cara uji Sulfat (SO ₄ ²⁻) secara turbidimetri.
SNI 06-6989.23-2005	: Air dan air limbah - Bagian 23: Cara uji suhu dengan termometer.

SNI 06-6989.24-2005	: Air dan air limbah - Bagian 24: Cara uji warna secara perbandingan visual.
SNI 13-4180-1996	: Penentuan tegangan in situ pada batuan dengan metode rekah hidrolik.
SNI 13-4691-1998	: Penyusunan Peta Geologi.
SNI 13-6185-1999	: Penyusunan Peta Geomorfologi.
SNI 13-6581-2001	: Penentuan kekerasan batuan dengan uji palu Schmidt.
SNI 13-6582-2001	: Penentuan ketahanan gali dengan uji keterpotongan.
SNI 13-6584-2001	: Metode identifikasi mineral lempung dengan sinar-X.
SNI 13-6793-2002	: Metode pengujian kadar air, kadar abu dan bahan organik dari tanah gambut dan tanah organik lainnya.
SNI 1726:2019	: Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur gedung dan non-gedung.
SNI 1742:2008	: Cara uji kepadatan ringan untuk tanah.
SNI 1743:2008	: Cara uji kepadatan berat untuk tanah.
SNI 1744:2012	: Metode uji CBR laboratorium.
SNI 1762:2019	: Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur gedung dan non-gedung
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 19-6739-2002	: Metode pengujian untuk penentuan kapasitas jenis dan penaksiran transmisivitas pada sumur uji.
SNI 19-6740-2002	: Metode pengujian untuk penentuan transmisivitas akuifer tertekan dengan cara pemulihan Theis.
SNI 19-6741-2002	: Metode pengujian untuk penentuan transmisivitas akuifer tertekan dengan cara uji kolom air.
SNI 19-6742-2002	: Metode pengujian kolom air di lapangan untuk penentuan sifat-sifat hidrolik akuifer.
SNI 19-6743-2002	: Metode pengujian sifat hidrolik akuifer dengan cara Theis.

- SNI 19-6744-2002 : Tata cara pemilihan metode uji sifat hidraulik akuifer dengan teknik sumur.
- SNI 1976:2008 : Cara koreksi kepadatan tanah yang mengandung butiran kasar.
- 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 2436:2008 : Tata cara pencatatan dan identifikasi hasil pengeboran inti
- SNI 2455:2015 : Cara uji triaksial untuk tanah dalam keadaan terkonsolidasi tidak terdrainase (CU) dan terkonsolidasi terdrainase (CD)
- SNI 2485:2015 : Metode uji cepat rambat gelombang dan konstanta elastis ultrasonik batuan
- SNI 2486:2011 : Cara uji laboratorium kuat tarik benda uji batu dengan cara tidak langsung
- SNI 2527:2012 : Cara uji sifat hidraulik akuifer terkekang dan bebas dengan metode Jacob
- SNI 2528:2012 : Tata cara pengukuran geolistrik Wenner untuk eksplorasi airtanah
- SNI 2812:2011 : Cara uji konsolidasi tanah satu dimensi
- SNI 2813:2008 : Cara uji kuat geser langsung tanah terkonsolidasi dan terdrainase
- SNI 2815:2011 : Cara uji tekan triaksial pada batu di laboratorium
- SNI 2817:2015 : Tata cara analisis dan evaluasi data uji pemompaan dengan metode Papadopulos Cooper
- SNI 2818: 2012 : Metode eksplorasi airtanah dengan geolistrik susunan Schlumberger
- SNI 2824:2011 : Cara Uji Geser Langsung Batu
- SNI 2825:2008 : Cara Uji Kuat Tekan Batuan Uniaxial
- SNI 2826:2008 : Cara uji modulus elastisitas batu dengan tekanan sumbu tunggal

SNI 2827:2008	: Cara uji penetrasi lapangan dengan alat sondir
SNI 2848:2008	: Tata cara pembuatan benda uji di laboratorium mekanika batuan
SNI 3406:2011	: Cara uji sifat tahan legang batu
SNI 3420:2016	: Metode uji kuat geser langsung tanah tidak terkonsolidasi dan tidak terdrainase.
SNI 3422:2008	: Cara uji penentuan batas susut tanah
SNI 3423:2008	: Cara uji analisis ukuran butir tanah
SNI 3638:2012	: Metode Uji Kuat Tekan Bebas Tanah Kohesif
SNI 4148-1:2017	: Standar pengambilan sampel tanah berbutir halus dengan tabung berdinding tipis untuk keperluan geoteknik.
SNI 4153:2008	: Cara uji penetrasi lapangan dengan SPT
SNI 4813:2015	: Cara uji triaksial untuk tanah kohesif dalam keadaan tidak terkonsolidasi dan tidak terdrainase (UU).
SNI 6371:2015	: Tata cara pengklasifikasian tanah untuk keperluan teknik dengan sistem unifikasi tanah
SNI 6424:2008	: Cara uji potensi pengembangan atau penurunan satu dimensi tanah kohesif
SNI 6439:2013	: Metode uji ion klorida dalam air
SNI 6664-2015	: Penentuan modulus deformasi massa batuan dengan uji dilatometer.
SNI 6787:2015	: Metode uji pH tanah
SNI 6874:2012	: Cara uji sifat dispersif tanah lempung dengan hidrometer ganda
SNI 6989.1:2019	: Air dan air limbah – Bagian 1: Cara uji daya hantar listrik (DHL).
SNI 6989.11:2019	: Air dan air limbah – Bagian 11: Cara uji derajat keasaman (pH) dengan menggunakan alat pH meter.
SNI 6989.27:2019	: Air dan air limbah - Bagian 27: Cara uji padatan terlarut total (Total Dissolved Solids, TDS) secara gravimetri.

SNI 6989.57:2008	: Air dan air limbah - Bagian 57: Metode pengambilan contoh air permukaan
SNI 6989.58:2008	: Air dan air limbah - Bagian 58: Metode pengambilan contoh air tanah
SNI 6989.74:2009	: Air dan air limbah - Bagian 74: Cara uji nitrat (NO ₃ ⁻) secara elektroda selektif ion
SNI 7573:2010	: Analisis petrografi dan minegrafi
SNI 7748:2012	: Tata cara penerapan model aliran air tanah
SNI 7749: 2012	: Tata cara penentuan tinggi muka air tanah pada lubang bor atau sumur pantau
SNI 7750:2012	: Tata cara penentuan kadar air batuan dan tanah di tempat dengan metode penduga neutron
SNI 8061:2015	: Tata cara analisis data pengujian surutan bertahap pada sumur uji atau sumur produksi dengan metode Hantush-Bierschenk
SNI 8072:2016	: Cara uji pengukuran potensi keruntuhan tanah di laboratorium
SNI 8134:2015	: Tata cara pengukuran tekanan air pori tanah dengan pisometer pipa terbuka Casagrande.
SNI 8134:2015	: Tata cara pengukuran tekanan air pori tanah dengan pisometer pipa terbuka Casagrande.
SNI 8460:2017	: Persyaratan Perancangan Geoteknik
SNI 8462:2017	: Tata cara pemantauan tekanan air pori pada tanah dengan menggunakan alat piezometer pneumatik
SNI ISO 15839:2003	: Kualitas air - Sensor/peralatan analisis on-line untuk air - Spesifikasi dan uji kinerja
SNI ISO 17381:2003	: Kualitas air - Pemilihan dan penerapan metode test kit siap pakai untuk analisis air
Pd T-19-2005-B	: Studi Kelayakan Proyek Jalan dan Jembatan
Pd T-03.2-2005-A	: Penyelidikan geoteknik untuk fondasi bangunan air, Volume II Pengujian lapangan dan laboratorium

- AASHTOR13-12(2020) : *Standard Practice for Conducting Geotechnical Subsurface Investigations*
- AASHTO T225:2016 : *Standard Method of Test for Diamond Core Drilling for Site Investigation*
- ASTM D1194-94 : *Standard Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings*
- 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 D1586/D1586M-18 : *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*
- ASTM D2113-08 : *Standard Practice for Rock Core Drilling and Sampling of Rock for Site Investigation*
- ASTM D2216-19 : *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*
- ASTM D2487-17e1 : *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*
- ASTM D2488-00 : *Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure).*
- ASTM D2573/D2573M-18 : *Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Saturated Fine-Grained Soils*
- ASTM D2845-08 : *Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock*
- ASTM D2938-95(2002) : *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens*
- ASTM D3967-16 : *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens*
- ASTM D4043-17 : *Standard Guide for Selection of Aquifer Test Method in Determining Hydraulic Properties by Well Techniques*
- ASTM D4044/D4044M-15 : *Standard Test Method for (Field Procedure) for Instantaneous Change in Head (Slug) Tests for Determining Hydraulic Properties of Aquifers*

- ASTM D4044/D4044M-15 : *Standard Test Method for (Field Procedure) for Instantaneous Change in Head (Slug) Tests for Determining Hydraulic Properties of Aquifers*
- ASTM D4050-20 : *Standard Test Method for (Field Procedure) for Withdrawal and Injection Well Testing for Determining Hydraulic Properties of Aquifer Systems*
- ASTM D4105/D4105M-20 : *Standard Practice for (Analytical Procedure) for Determining Transmissivity and Storage Coefficient of Nonleaky Confined Aquifers by the Modified Theis Nonequilibrium Method*
- ASTM D4106-20 : *Standard Practice for (Analytical Procedure) for Determining Transmissivity and Storage Coefficient of Nonleaky Confined Aquifers by the Theis Nonequilibrium Method*
- ASTM D4327-17 : *Standard Test Method for Anions in Water by Suppressed Ion Chromatography*
- ASTM D4373-14 : *Standard Test Method for Rapid Determination of Carbonate Content of Soils*
- 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 D4554-12 : *Standard Test Method for In Situ Determination of Direct Shear Strength of Rock Discontinuities*
- 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 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 D4644-16 : *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 D5092 : *Standard Practice for Design and Installation of Ground Water Monitoring Wells in Aquifers*
- ASTM D512-12 : *Standard Test Methods for Chloride Ion In Water*
- ASTM D512-12 : *Standard Test Methods for Chloride Ion in Water*
- ASTM D5269-15 : *Standard Test Method for Determining Transmissivity of Nonleaky Confined Aquifers by the Theis Recovery Method*
- ASTM D5270/D5270M-20 : *Standard Practice for (Analytical Procedure) Determining Transmissivity and Storage Coefficient of Bounded, Nonleaky, Confined Aquifers*
- ASTM D5447-17 : *Standard Guide for Application of a Numerical Groundwater Flow Model to a Site-Specific Problem*
- ASTM D5472/D5472M-20 : *Standard Practice for Determining Specific Capacity and Estimating Transmissivity at the Control Well*
- ASTM D5473/D5473M-20 : *Standard Practice for (Analytical Procedure) Analyzing the Effects of Partial Penetration of Control Well and Determining the Horizontal and Vertical Hydraulic Conductivity in a Nonleaky Confined Aquifer*

- ASTM D5490-93(2014)e1 : *Standard Guide for Comparing Groundwater Flow Model Simulations to Site-Specific Information*
- ASTM D5607-16 : *Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force*
- ASTM D5609-16 : *Standard Guide for Defining Boundary Conditions in Groundwater Flow Modeling*
- ASTM D5610-94(2014) : *Standard Guide for Defining Initial Conditions in Groundwater Flow Modeling*
- ASTM D5611-94(2016) : *Standard Guide for Conducting a Sensitivity Analysis for a Groundwater Flow Model Application*
- ASTM D5718-13 : *Standard Guide for Documenting a Groundwater Flow Application*
- 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) : *Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation*
- ASTM D5778-20 : *Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils*
- ASTM D5786-17 : *Standard Practice for (Field Procedure) for Constant Drawdown Tests in Flowing Wells for Determining Hydraulic Properties of Aquifer Systems*
- ASTM D5850-20 : *Standard Practice for (Analytical Procedure) Determining Transmissivity, Storage Coefficient, and Anisotropy Ratio from a Network of Partially Penetrating Wells*
- ASTM D5873-14 : *Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method*
- ASTM D5979-96(2014) : *Standard Guide for Conceptualization and Characterization of Groundwater Systems*

- ASTM D5981/D5981M-18 : *Standard Guide for Calibrating a Groundwater Flow Model Application*
- ASTM D6028/D6028M-20 : *Standard Practice for (Analytical Procedure) Determining Hydraulic Properties of a Confined Aquifer Taking into Consideration Storage of Water in Leaky Confining Beds by Modified Hantush Method*
- ASTM D6029/D6029M-20 : *Standard Practice for (Analytical Procedures) Determining Hydraulic Properties of a Confined Aquifer and a Leaky Confining Bed with Negligible Storage by the Hantush-Jacob Method*
- ASTM D6032/D6032M-17 : *Standard Test Method for Determining Rock Quality Designation (RQD) of Rock Core*
- ASTM D6034-20 : *Standard Practice for (Analytical Procedure) Determining the Efficiency of a Production Well in a Confined Aquifer from a Constant Rate Pumping Test*
- ASTM D6034-20 : *Standard Practice for (Analytical Procedure) 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 D6420-18 : *Standard Guide for Site Characterization for Engineering Design and Construction Purposes*
- ASTM D6429-20 : *Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods*
- ASTM D6430-18 : *Standard Guide for Using the Gravity Method for Subsurface Site Characterization*
- ASTM D6431-99(2010): : *Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation*
- ASTM D6432-19 : *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 D6639-18 : *Standard Guide for Using the Frequency Domain Electromagnetic Method for Subsurface Site Characterizations*
- ASTM D6820-20 : *Standard Guide for Use of the Time Domain Electromagnetic Method for Geophysical Subsurface Site Investigation*
- ASTM D6919-17 : *Standard Test Method for Determination of Dissolved Alkali and Alkaline Earth Cations and Ammonium in Water and Wastewater by Ion Chromatography*
- ASTM D7012-14e1 : *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(2018)e2 : *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens*
- ASTM D7400 / D7400M-19 : *Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing Change in Head (Slug) Tests for Determining Hydraulic Properties of Aquifers*
- ASTM D7400/D7400M-19 : *Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing Change in Head (Slug) Tests for Determining Hydraulic Properties of Aquifers*
- 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 G187-12a : *Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Two-Electrode Soil Box Method*
- ASTM G57-06(2012) : *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method*
- ASTM STP402 : *Testing Techniques for Rock Mechanics*
- ASTM WK64382 : *New Test Method for Determining Transmissivity of High-Permeability Fractured Rock Masses by Performance of In Situ Water Pressure Testing*

EM-1110-1-1005 (2007)	: <i>Control and Topographic Surveying</i>
ISO 14689:2017	: <i>Geotechnical investigation and testing-Identification, description and classification of rock</i>
ISO 22476-2:2005	: <i>Geotechnical investigation and testing- Field testing – Part 2: Dynamic probing</i>
ISO 22476-3:2005	: <i>Geotechnical investigation and testing- Field testing – Part 3: Standard penetration test</i>
ISO 22476-5:2012	: <i>Geotechnical investigation and testing- Field testing – Part 5: Flexible dilatometer test</i>
ISO 22476-9:2020	: <i>Geotechnical investigation and testing- Field testing – Part 9: Field vane test (FVT and FVT-F)</i>
ISRM1	: <i>SM for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake-Durability Index Properties - 1977 [EUR 4] Part 2, International Society for Rock Mechanics, SM for Determining Swelling and Slake-Durability Index Properties.</i>
ISRM2	: <i>SM for Determining Tensile Strength of Rock Materials - 1978 [EUR 4] Part 2 – SM for Determining Indirect Tensile Strength by the Brazil Test, International Society for Rock Mechanics.</i>
ISRM3	: <i>SM for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials - 1979 [EUR 4], Part 1 - SM for Determination of the Uniaxial Compressive Strength of Rock Materials.</i>
NUREG/CR-5503 (1999)	: <i>Techniques for Identifying Faults and Determining Their Origins</i>

3 Istilah dan definisi

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

3.1

alinyemen

proyeksi garis sumbu terowongan jalan pada bidang horizontal dan vertikal

3.2

batuan dasar

lapisan batuan di bawah permukaan tanah yang memiliki kecepatan rambat gelombang geser (V_s) ≥ 750 m/detik dan tidak ada lapisan batuan lain di bawahnya yang memiliki nilai kecepatan rambat gelombang geser < 750 m/detik

3.3

beton semprot (*shotcrete*)

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

3.4

deformabilitas

nilai perbandingan (rasio) deformasi ultimit terhadap deformasi batas

3.5

episentrum

titik pada permukaan bumi tepat di atas titik fokus (hiposentrum) suatu gempa bumi

3.6

evaluasi spesifik-situs

penentuan spektrum respons desain di permukaan tanah untuk kondisi lokasi di dekat sesar aktif (kurang dari 10 km) dan kategori kelas situs tanah khusus (SF) dengan menggunakan analisis bahaya seismik probabilistik dan deterministik

3.7

gerakan tanah

suatu proses perpindahan massa tanah/batuan dengan arah tegak, mendatar atau miring dari kedudukan semula, karena pengaruh gravitasi, arus air dan beban luar. Dalam pengertian ini tidak termasuk erosi, aliran lahar, amblasan, penurunan tanah karena konsolidasi dan pengembangan

3.8

grout

material yang dapat dipompa (suspensi, larutan, emulsi atau mortar), disuntikkan ke dalam tanah atau batuan, yang dapat mengeras dan kaku bersama berlalunya waktu

3.9

hydraulic fracturing

penyuntikan bahan *grout* dengan tekanan tinggi melebihi kuat geser tanah hingga menimbulkan rekahan/retakan dalam tanah dan bahan *grout* mengisi rekahan tersebut; Kadang disebut juga sebagai *hydrofracturing*, *hydrosplitting*, *hydrojacking* atau *claquage*

3.10

kelas situs

klasifikasi situs yang dilakukan berdasarkan kondisi tanah di lapangan

3.11

keruntuhan lereng (*slope failure*)

suatu proses pergerakan dan perpindahan massa tanah atau batuan yang dapat terjadi dengan variasi kecepatan dari sangat lambat sampai sangat cepat dan tidak terkait banyak dengan kondisi geologi lokal. Keruntuhan bersifat lokal atau skala kecil dan umumnya terjadi pada lereng galian atau timbunan yang dibuat manusia

3.12

kondisi khusus

kondisi khusus mencakup kondisi geologi teknik khusus, dan kondisi konstruksi dan desain terowongan khusus. Kondisi-kondisi ini memerlukan perhatian khusus karena seringkali menimbulkan fenomena problematik dalam perencanaan dan pembangunan terowongan jalan. Identifikasi dan penyelidikan aspek-aspek kondisi khusus perlu dilakukan sebagai penyelidikan penting untuk meminimalisir masalah yang ditemui pada perencanaan dan pembangunan terowongan jalan

3.13

likuifaksi

kondisi tanah yang kehilangan kuat geser akibat gempa sehingga daya dukung tanah turun secara mendadak

3.14

magnitudo

besaran gempa yang tidak bergantung pada posisi pengamatan. Besaran ini dihitung berdasarkan hasil pengukuran pada seismograf dan dinyatakan dalam bentuk bilangan ordinat dan desimal yang didasarkan pada suatu skala logaritma

3.15

media

material yang dilalui sepanjang rute terowongan dalam proyek pembangunan terowongan

3.16

metode penerowongan (*tunneling/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

3.17

metode penggalian / ekskavasi

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

3.18

metode tambahan / metode perkuatan tambahan (*auxiliary method*)

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

3.19

muka bidang galian / muka galian

bagian permukaan media yang akan digali dalam penggalian terowongan

3.20

peta geomorfologi

peta yang menggambarkan aspek-aspek utama lahan (*terrain*) yang dihasilkan dari sistem survei analitik (di antaranya, morfologi dan morfogenesis) dan sintetik (di antaranya proses geomorfologi, tanah/soil, tutupan lahan)

3.21

peta geologi

peta yang menggambarkan informasi sebaran dan jenis serta sifat batuan, umur, stratigrafi, struktur, tektonika, fisiografi, dan sumberdaya mineral serta energi

3.22

peta geologi teknik

peta yang memberikan suatu gambaran umum semua komponen dari suatu lingkungan geologi yang dianggap penting untuk kepentingan teknik sipil

3.23

perisai (*shield*)

peralatan untuk menggali sebuah terowongan dengan metode konstruksi terowongan perisai, terutama pada tanah, yang terdiri atas tudung (*hood*), gelagar cincin (*ring girder*), dan ekor perisai (*shield tail*). Disebut juga mesin gali perisai (*shield machine*)

3.24

perkuatan/penyangga

perkuatan atau penyangga adalah 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 atau keruntuhan galian terowongan

3.25

pilot tunnel

pilot tunnel / terowongan eksplorasi adalah terowongan berukuran kecil (umumnya berukuran sekitar 2 m x 2 m) yang seringkali digunakan untuk terowongan batuan berukuran besar pada kondisi geologi yang kompleks. *Pilot tunnel* dibangun untuk memberikan gambaran mengenai kondisi geologi teknik in-situ pada lokasi rencana terowongan

3.26

potensi longsor

suatu kondisi lereng yang mengindikasikan kemungkinan terjadinya longsor pada bidang gelincirnya, yang dipresentasikan dengan suatu angka keamanan minimal

3.27

rembesan diijinkan

laju rembesan atau aliran airtanah maksimum yang diperbolehkan dalam memastikan keamanan operasional suatu terowongan

3.28

rock burst

letupan atau hamburan secara tiba-tiba dari massa batuan dari dinding dan muka galian terowongan yang umumnya terjadi pada lokasi dengan kedalaman besar dan tegangan in-situ yang besar. Berdasarkan mekanisme pemicunya *rock burst* dapat dibagi 2, yaitu

strainburst dan *fault-slip burst* (Ghorbani et al., 2020). *Strainburst* adalah keruntuhan batuan secara tiba-tiba yang berhubungan dengan konsentrasi tegangan di dekat batas penggalian. *Fault-slip burst* terjadi jika gelombang seismik dalam bentuk gelombang regangan/tegangan mengalami propagasi dari sumbernya dan mencapai batas penggalian. *Fault-slip burst* umumnya menyebabkan *rock burst* yang lebih kuat dan menghasilkan kerusakan penggalian yang lebih parah dibanding *strainburst*.

3.29

Rock Quality Designation (RQD)

penilaian kualitas batuan berdasarkan kondisi keutuhan inti yaitu persentase total panjang potongan inti lebih panjang dari 10 cm pada setiap *core run*

3.30

segmen

material dinding untuk terowongan perisai. Segmen umumnya dibuat dari beton bertulang atau dari baja. Beberapa potong semen dipasang untuk membuat lingkaran, banyak lingkaran, atau bentuk-bentuk lainnya

3.31

sesar aktif

suatu sesar/patahan, yang telah teridentifikasi dengan jelas, diketahui mempunyai sejarah gempa atau menunjukkan bukti pergerakan yang terjadi pada jaman Holosen (yakni 11.000 tahun yang lampau), sesar-sesar besar yang bergerak pada jaman Pleistosen Akhir (antara 11.000 hingga 35.000 tahun yang lampau) dan sesar utama yang sudah berulang kali bergerak bergerak pada jaman Kuartar (1,8 juta tahun yang lampau)

3.32

squeezing

suatu jenis deformasi batuan/tanah dalam terowongan yang terjadi secara lambat dan gradual yang menghasilkan menutupnya ruang bukaan ekskavasi (*closure*) dan profil melintang galian terowongan mengecil dari kondisi awal. Batuan *squeezing* dibagi menjadi dua kategori, yaitu *squeezing ground* dan *swelling ground*. *Squeezing ground* disebabkan oleh deformasi plastis akibat tegangan yang besar, sementara *swelling ground* disebabkan oleh perubahan volume tanah akibat interaksi antara kandungan mineral lempung aktif dan airtanah.

3.33

stand-up time

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

3.34

survei konstruksi penghalang (*obstacles*)

survei yang bertujuan untuk mengidentifikasi potensi dampak penggalian terowongan pada bangunan-bangunan dan utilitas di dekat terowongan

3.35

terowongan gali-dan-tutup (*cut-and-cover tunnel*)

suatu jenis terowongan yang umumnya dibangun pada area perkotaan dengan topografi cenderung datar dan *overburden* yang relatif kecil, dapat juga dibangun sebagai titik awal/akhir dari terowongan perisai dan terowongan pegunungan

3.36

terowongan jalan

terowongan yang dibuat untuk kepentingan lalu lintas

3.37

terowongan pegunungan (*mountain tunnel*)

dapat disebut juga terowongan batuan, merupakan jenis terowongan yang dibangun pada topografi pegunungan pada media utamanya berupa batuan, tetapi tergantung pada kondisi lokasi konstruksi dapat juga diaplikasikan pada area perkotaan

3.38

terowongan perisai (*shield tunnel*)

suatu terowongan yang dibangun dengan menggunakan metode terowongan perisai

3.39

terowongan vertikal (*vertical shaft*)

suatu lubang kerja yang vertikal sebagai bagian dari pelaksanaan terowongan perisai. Terowongan vertikal ini adalah suatu fasilitas untuk membawa ke dalam dan keluar, berbalik/berputar, pemasangan dan pembongkaran/pencabutan suatu mesin perisai. Juga digunakan untuk membawa keluar tanah galian, membawa keluar masuk material, pintu keluar-masuk pekerja, sarana tenaga listrik dan penyedia air, ventilasi dan lain-lain.

Terowongan-terowongan vertikal dibagi atas terowongan vertikal keberangkatan, antara, putar dan kedatangan

3.40

wilayah/rezim tektonik

suatu wilayah geologis yang dicirikan oleh kesamaan struktur geologis dan karakteristik gempa

4 Ketentuan penyelidikan geologi teknik

Penyelidikan geologi teknik secara garis besar harus dilakukan dengan ketentuan sebagai berikut.

- a. Penyelidikan geologi teknik meliputi penyelidikan kondisi umum aspek-aspek geologi teknik dan penyelidikan kondisi khusus.
- b. Penyelidikan geologi teknik dilakukan pada enam tahap pembangunan terowongan, yaitu tahap Pra-Studi Kelayakan (*Pre-Feasibility Study*, Pre-FS), Studi Kelayakan (*Feasibility Study*, FS), Rencana Teknik Awal (*Basic Engineering Design*), Rencana Teknik Akhir (*Detailed Engineering Design*), tahap konstruksi, dan tahap pemeliharaan.
- c. Jenis, area, dan skala penyelidikan geologi teknik semakin detil seiring kemajuan tahap pembangunan terowongan jalan.

4.1 Tahap pembangunan terowongan

Tujuan, area dan skala investigasi, serta data yang diperlukan pada tiap tahap pembangunan terowongan jalan ditunjukkan pada Tabel 2.

4.1.1 Tahap pra-studi kelayakan

- a. Penyelidikan geologi teknik pada tahap ini dilakukan dengan tujuan utama untuk menyediakan data dan informasi bagi penentuan kelayakan awal rute terowongan terpilih tentatif berdasarkan analisis data sekunder (Tabel 2).
- b. Data sekunder geologi teknik yang dikumpulkan dan dikaji antara lain:
 - 1) Data geomorfologi bersumber dari peta topografi, penginderaan jauh (citra satelit atau foto udara), dan peta Rupabumi Indonesia (RBI).
 - 2) Data geomorfologi dan proses-proses geologi bersumber dari peta geomorfologi regional
 - 3) Data geologi bersumber dari peta geologi regional.

- 4) Data air tanah dan hidrologi bersumber dari peta hidrogeologi regional, data curah hujan, peta daerah aliran sungai, peta kawasan penting hidrologi, dll.
- 5) Data sumber daya dan bahaya geologi bersumber dari peta zonasi gempa, kerentanan gerakan tanah, bahaya letusan gunung berapi, rawan banjir, dan rawan tsunami, peta lokasi mata air panas, peta rawan gas beracun, peta sebaran logam berat, dll.
- 6) Data lingkungan bersumber dari Status Lingkungan Hidup (SLH) terkini, buku Provinsi/Kabupaten/Kota dalam Angka, data dan informasi infrastruktur eksisting di sekitar area rencana terowongan (fondasi, terowongan dan penggalian, utilitas, tambang bawah tanah, dll.).

Sumber data sekunder di atas dijelaskan lebih rinci pada Tabel 10.

- c. Penyelidikan pada tahap ini mencakup area yang luas, termasuk bagian terbuka, tapak koridor alternatif rute, dan sekitar rencana portal. Peta dasar yang digunakan dalam menganalisis data sekunder berskala 1:50.000-1:10.000.
- d. Data sekunder dianalisis dan disusun menjadi peta geologi teknik tentatif berskala 1:50.000-1:10.000. Peta geologi teknik tentatif berisi data dan informasi umum seluruh aspek geologi teknik, meliputi fitur-fitur geomorfologi, jenis dan karakteristik geologi teknik batuan dan tanah, struktur geologi, airtanah, dan aktivitas kegempaan (Bagian 4.2). Selain itu, peta geologi teknik tentatif juga berisi data dan informasi lokasi atau zona dengan potensi kondisi khusus terutama terkait dengan bahaya geologi, antara lain zona gerakan tanah, zona sesar, zona material lepas, zona kars, dan zona dengan aktivitas vulkanik (geotermal, gas beracun) (Bagian 4.3). Metode penyelidikan kondisi umum tiap aspek geologi teknik dijelaskan dalam Bagian 5.
- e. Hasil analisis kondisi geologi teknik pada peta geologi teknik tentatif dan identifikasi dan analisis awal potensi dampak pembangunan terowongan terhadap lingkungan digunakan sebagai salah satu bahan pertimbangan dalam penentuan alternatif rute terowongan hingga kelayakan awal rute terowongan terpilih tentatif (Tabel 2).

4.1.2 Tahap studi kelayakan

- a. Penyelidikan geologi teknik pada tahap ini dilakukan dengan tujuan utama untuk menyediakan data dan informasi bagi penentuan kelayakan rute terowongan terpilih (Tabel 2) melalui pengumpulan data sekunder dan data primer. Lingkup penyelidikan dan aspek-aspek geologi teknik yang diperlukan pada tahap ini diperlihatkan pada Tabel 2 dan Tabel 3.
- b. Penyelidikan mencakup area sekitar rute terowongan dan kemungkinan lokasi alternatif. Peta dasar yang digunakan dalam penyelidikan, baik dalam analisis data sekunder maupun pemetaan aspek-aspek geologi teknik permukaan, berskala 1:10.000-1:1.000.

- c. Survei geofisika dilakukan di sepanjang rute terowongan. Aspek dan metode penyelidikan geofisika yang diperlukan dirangkum dalam Tabel 3 dan dijelaskan lebih lanjut dalam Bagian 5.2.3. Selain aspek batuan dan tanah, struktur geologi, dan airtanah, survei geofisika seismik permukaan dilakukan untuk memperkirakan kecepatan rambat gelombang geser bagi perhitungan beban gempa (Bagian 5.5.2). Pengeboran inti, logging, dan uji lubang bor dilakukan minimal pada 3 lokasi, yaitu pada trase dan kedua portal terowongan. Kedalaman pengeboran inti dijelaskan dalam Bagian 5.2.3.2.
- d. Data hasil penyelidikan disusun menjadi peta geologi teknik berskala 1:10.000-1:1.000. Pada zona dengan kondisi khusus, pemetaan geologi teknik harus dilakukan dengan skala lebih rinci, misalnya skala 1:5.000-1:1.000. Secara umum, jenis peta geologi teknik yang disusun pada tahap Studi Kelayakan sama dengan jenis peta geologi teknik yang disusun pada tahap Pra-Studi Kelayakan. Namun, data dan informasi yang digunakan menyusun peta geologi teknik pada tahap Studi Kelayakan sebagian diperoleh melalui penyelidikan lapangan dan laboratorium. Peta geologi teknik yang menggambarkan zona dengan potensi kondisi khusus perlu disusun berdasarkan data beberapa aspek geologi teknik.
- e. Hasil analisis kondisi geologi teknik pada peta geologi teknik dan identifikasi dan analisis rinci potensi dampak pembangunan terowongan terhadap lingkungan digunakan sebagai salah satu bahan pertimbangan dalam menentukan alinyemen (horizontal dan vertikal), menentukan lokasi portal, dan mengevaluasi kelayakan rencana pembangunan pada rute terowongan terpilih tentatif (Tabel 2). Perubahan atau pergeseran rute terowongan terpilih tentatif masih dapat dilakukan hingga diperoleh rute terowongan terpilih (Gambar 1).

4.1.3 Tahap rencana teknik awal

- a. Penyelidikan geologi teknik pada tahap ini dilakukan dengan tujuan untuk menyediakan data dan informasi bagi perancangan awal atau *basic design* metode konstruksi dan penggalian terowongan, profil melintang terowongan, sistem penyangga dan lining terowongan dan untuk perencanaan awal penanggulangan kondisi khusus melalui pengumpulan data primer lebih rinci dari penyelidikan pada tahap pembangunan sebelumnya (Tabel 2). Lingkup penyelidikan dan aspek-aspek geologi teknik yang diperlukan pada tahap ini disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3.
- b. Penyelidikan dilakukan pada area rute terowongan terpilih dan sekitarnya. Peta dasar yang digunakan dalam penyelidikan berskala 1: 5.000-1:500.
- c. Pengeboran inti, logging, uji lubang bor, penyelidikan sesar aktif dan paleoseismik (Bagian 5.5.1), dan penyelidikan geofisika detil bagi perhitungan beban gempa (antara lain menggunakan metode *seismic-cone penetration test* SCPT dan *vertical seismic*

profiling VSP pada lubang bor), perlu dilakukan jika hasil penyelidikan pada tahap sebelumnya menunjukkan area rute terowongan terpilih berada pada zona geologi kompleks atau berada pada kondisi khusus (Bagian 4.3). Panduan jarak dan kedalaman lubang pengeboran inti dijelaskan dalam Bagian 5.2.3.2.

- d. Data hasil penyelidikan disusun menjadi peta geologi teknik berskala 1:5.000-1:500. Peta geologi teknik berisi informasi kondisi umum seluruh aspek geologi teknik (Bagian 4.2) dan potensi kondisi khusus (Bagian 4.3). Peta geologi teknik analitis atau tematik, diantaranya peta karakteristik geologi teknik tanah dan peta kualitas massa batuan yang dianalisis berdasarkan informasi hasil penyelidikan karakteristik geologi dan geologi teknik batuan dan tanah (Bagian 5.2), karakteristik airtanah (Bagian 5.4), dan karakteristik tegangan batuan dan tanah *in situ* (Bagian 5.2.3.3) digunakan sebagai salah satu acuan dalam dalam perancangan awal metode konstruksi dan penggalian terowongan, profil melintang terowongan, sistem penyangga dan lining terowongan, dan portal terowongan. Beberapa peta geologi teknik analitis atau tematik seperti dalam tahap penyelidikan sebelumnya juga perlu disusun untuk perencanaan awal penanggulangan kondisi khusus, terutama pada portal terowongan.
- e. Sayatan geologi teknik berisi data dan informasi geologi, karakteristik geologi teknik batuan dan tanah termasuk kualitas massa batuan, dan kontur muka airtanah pada rute terowongan dapat disusun menggunakan data dan informasi hasil pemetaan geologi dan karakteristik geologi teknik batuan dan tanah permukaan, survei geofisika, pengeboran inti, uji lapangan, dan uji laboratorium dengan jumlah sampel pengujian terbatas. Sayatan geologi teknik kualitas massa batuan digunakan dalam perancangan awal metode konstruksi dan penggalian terowongan, profil melintang terowongan, sistem penyangga dan lining terowongan, dan portal terowongan.

4.1.4 Tahap rencana teknik akhir

- a. Penyelidikan geologi teknik pada tahap ini dilakukan dengan tujuan untuk menyediakan data dan informasi bagi perancangan akhir atau *detailed engineering design* (DED) metode konstruksi dan penggalian terowongan, profil melintang terowongan, sistem penyangga dan lining terowongan dan untuk perencanaan akhir penanggulangan kondisi khusus melalui pengumpulan data primer lanjutan, lebih rinci dari penyelidikan pada tahap pembangunan sebelumnya (Tabel 2). Lingkup penyelidikan dan aspek-aspek geologi teknik yang diperlukan pada tahap ini diperlihatkan pada Tabel 2 dan Tabel 3.
- b. Penyelidikan dilakukan pada rute terowongan terpilih dan area sekitarnya. Peta dasar yang digunakan dalam penyelidikan berskala 1:500-1:100.

- c. Pengeboran inti, perekaman lubang bor, dan uji lubang bor perlu dilakukan jika hasil penyelidikan pada tahap sebelumnya menunjukkan area rute terowongan terpilih berada pada zona geologi kompleks atau berada pada kondisi khusus (Bagian 4.3). Panduan jarak dan kedalaman lubang pengeboran inti dijelaskan dalam Bagian 5.2.3.2.
- d. Data hasil penyelidikan disusun menjadi peta geologi teknik berskala 1:500-1:100. Peta dan sayatan geologi teknik berisi informasi kondisi umum seluruh aspek geologi teknik (Bagian 4.2) dan potensi kondisi khusus (Bagian 4.3). Peta geologi teknik analitis atau tematik, diantaranya peta geologi teknik kualitas massa batuan yang dianalisis berdasarkan informasi hasil penyelidikan karakteristik geologi dan geologi teknik batuan dan tanah (Bagian 5.2), karakteristik airtanah (Bagian 5.4), dan karakteristik tegangan batuan dan tanah in situ (Bagian 5.2.3.3) digunakan sebagai salah satu acuan dalam dalam perancangan detail metode konstruksi dan penggalian terowongan, profil melintang terowongan, sistem penyangga dan *lining* terowongan, serta lereng portal terowongan, dan perencanaan awal penanggulangan kondisi khusus, terutama pada portal terowongan.

4.1.5 Tahap konstruksi

- a. Penyelidikan geologi teknik pada tahap ini dilakukan untuk menyediakan data dan informasi guna memverifikasi kesesuaian metode konstruksi dan penggalian, sistem penyangga, dan *lining* terowongan terhadap perencanaan, melalui pengumpulan data primer lanjutan terutama pada aspek batuan-tanah, struktur geologi, dan airtanah melalui penyelidikan di luar dan di dalam terowongan (Tabel 2).
- b. Evaluasi kondisi kondisi batuan-tanah, struktur geologi, dan airtanah berdasarkan kondisi aktual dan prediksi yang dibuat dalam tahap pembangunan sebelumnya digunakan sebagai bahan pertimbangan perubahan desain (termasuk desain *lining*, *invert*, metode konstruksi, sistem penyangga, dan metode perkuatan tambahan/*auxiliary*) jika ditemukan kondisi aktual yang membutuhkan penyesuaian. Lingkup penyelidikan dan aspek-aspek geologi teknik yang diperlukan pada tahap ini diperlihatkan pada Tabel 2 dan Tabel 3.
- c. Peta dasar yang digunakan dalam penyelidikan berskala 1:500-1:100. Hasil pemetaan muka galian juga dapat ditampilkan dalam foto atau sketsa. Penyelidikan dilakukan di dalam area terowongan terpilih dan area sekitar yang terdampak konstruksi sebagai berikut:
 - 1) Investigasi dari luar terowongan
 - Pemetaan geologi teknik permukaan dilakukan untuk memperkirakan kondisi geologi teknik di depan muka galian dan portal terowongan. Peta geologi teknik yang disusun diantaranya peta jenis dan karakteristik keteknikan tanah, peta

tingkat pelapukan batuan, peta kondisi dan frekuensi diskontinuitas batuan, dan peta klasifikasi atau kualitas massa batuan penyusun lereng portal yang diekskavasi.

- Investigasi lubang bor tambahan diperlukan untuk mengetahui kondisi geologi atau distribusi akuifer dan tegangan air secara lebih detail.

2) Investigasi dari dalam terowongan

- Pemetaan muka galian terowongan (*tunnel face mapping*) dilakukan untuk mengidentifikasi perubahan atau variasi kondisi geologi teknik di depan penggalian. Peta geologi teknik yang disusun diantaranya peta tingkat pelapukan batuan, peta kondisi dan frekuensi diskontinuitas batuan, dan peta klasifikasi atau kualitas massa batuan muka galian terowongan.
- Analisis kinematika dilakukan untuk mengkaji secara kinematika apakah ada blok batuan yang berpotensi mengalami keruntuhan ke dalam terowongan dan upaya penanggulangan dengan sistem perkuatan yang sesuai melalui pengukuran orientasi (*dip* dan *dip direction*) dari semua bidang diskontinuitas batuan (perlapisan, kekar, retakan, sesar, *shear zone*, foliasi, dll.) di muka, dinding, dan atap galian terowongan yang terekspos.
- Pengeboran horizontal (*probing*) dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi geologi atau rembesan airtanah di depan permukaan, dan dapat digunakan sebagai lubang bor drainase.
- Terowongan eksplorasi tegak lurus atau menyimpang dari arah ekskavasi terowongan utama diperlukan dalam penyelidikan kondisi geologi, drainase airtanah, dan evaluasi sistem perkuatan terowongan dalam pembangunan terowongan pada kondisi geologi yang sangat kompleks.

Tabel 2 – Tujuan, lingkup, serta area dan skala penyelidikan geologi teknik pada tiap tahap pembangunan terowongan jalan. (modifikasi dari PU, 2005; JSCE, 2018b; BPJT, 2018, 2020a, 2020b)

No	Tahapan Pembangunan	Tujuan penyelidikan	Lingkup penyelidikan	Area dan skala penyelidikan
1	Pra-Studi Kelayakan	<ol style="list-style-type: none"> 1. Penetapan alternatif rute terowongan 2. Evaluasi kelayakan setiap alternatif rute terowongan 3. Penentuan rute terowongan terpilih tentatif 4. Penentuan kelayakan awal rute terowongan terpilih tentatif 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pengumpulan data sekunder 2. Analisis kondisi geomorfologi, batuan-tanah, struktur geologi, airtanah, dan kegempaan 3. Identifikasi potensi kondisi khusus 4. Identifikasi dan analisis awal potensi dampak pembangunan terhadap lingkungan geologi 	<ul style="list-style-type: none"> • Skala 1:25000 - 1:5000 • Area yang luas, termasuk alternatif rute terowongan
2	Studi Kelayakan	<ol style="list-style-type: none"> 1. Penentuan alinyemen (horizontal dan vertikal) 2. Penentuan lokasi portal 3. Evaluasi kelayakan rencana pembangunan pada rute terowongan terpilih tentatif 4. Menentukan kelayakan rute terowongan terpilih 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pengumpulan data sekunder dan data primer pada rute terowongan terpilih tentatif 2. Evaluasi kondisi geomorfologi, batuan-tanah, struktur geologi, airtanah, dan kegempaan dan kondisi khusus 3. Identifikasi dan analisis rinci potensi dampak pembangunan terhadap lingkungan geologi 	<ul style="list-style-type: none"> • Skala 1:10000 -1:1000 • Area sekitar rute terowongan terpilih tentatif dan kemungkinan rute alternatif

No	Tahapan Pembangunan	Tujuan penyelidikan	Lingkup penyelidikan	Area dan skala penyelidikan
3	Rencana Teknik Awal (<i>Basic Design</i>)	<ol style="list-style-type: none"> Perancangan awal metode konstruksi dan penggalian terowongan, profil melintang terowongan, sistem penyangga dan <i>lining</i> terowongan, lereng portal terowongan Perencanaan awal penanggulangan kondisi khusus 	<ol style="list-style-type: none"> Pengumpulan data primer lanjutan pada rute terowongan terpilih Evaluasi kondisi geomorfologi, batuan-tanah, struktur geologi, airtanah, dan kegempaan dan kondisi khusus Prediksi dampak pembangunan terhadap lingkungan geologi 	<ul style="list-style-type: none"> Skala 1:5000 -1:500 Area rute terowongan terpilih dan sekitarnya
4	Rencana Teknik Akhir, RTA (DED)	<ol style="list-style-type: none"> Perancangan detil metode konstruksi dan penggalian terowongan, profil melintang terowongan, sistem penyangga dan <i>lining</i> terowongan, dan lereng portal terowongan Perencanaan detil penanggulangan kondisi khusus 	<ol style="list-style-type: none"> Pengumpulan data primer lanjutan pada rute terowongan terpilih Evaluasi kondisi geomorfologi, batuan-tanah, struktur geologi, airtanah, dan kegempaan dan kondisi khusus Prediksi dampak pembangunan terhadap lingkungan geologi 	<ul style="list-style-type: none"> Skala 1:500 -1:100 Pada rute terowongan terpilih dan area sekitar yang terdampak konstruksi
5	Konstruksi	<ol style="list-style-type: none"> Verifikasi metode konstruksi dan penggalian, sistem penyangga, dan <i>lining</i> terowongan 	<ol style="list-style-type: none"> Pengumpulan data primer lanjutan aspek batuan-tanah, struktur geologi, 	Di dalam area terowongan terpilih dan area sekitar yang terdampak konstruksi

No	Tahapan Pembangunan	Tujuan penyelidikan	Lingkup penyelidikan	Area dan skala penyelidikan
		2. Perubahan desain (termasuk desain <i>lining</i> , <i>invert</i> , metode konstruksi, sistem penyangga, dan metode perkuatan tambahan/ <i>auxiliary</i>) jika ditemukan kondisi aktual yang membutuhkan penyesuaian	dan airtanah melalui penyelidikan di luar dan di dalam terowongan 2. Evaluasi kondisi batuan-tanah, struktur geologi, dan airtanah aktual dan prediksi 3. Monitoring deformasi muka galian, dinding, dan lantai galian dan permukaan tanah, monitoring rembesan airtanah ke dalam terowongan 4. Evaluasi prediksi dan kondisi aktual dampak pembangunan terhadap lingkungan geologi sekitar	
6	Pemeliharaan	1. Memastikan performa terowongan setelah dibangun sesuai dengan performa terowongan saat perancangan. 2. Memastikan dampak pembangunan terowongan terhadap lingkungan sekitar	1. Monitoring performa terowongan dan fasilitas yang berhubungan 2. Monitoring dampak pembangunan terhadap lingkungan geologi sekitar	Di dalam area terowongan terpilih dan area sekitar yang terdampak konstruksi

4.1.6 Tahap pemeliharaan

Pada tahap Pemeliharaan dilakukan pemantauan di dalam area terowongan dan area sekitar yang terdampak konstruksi untuk memastikan performa terowongan setelah dibangun sesuai dengan performa terowongan saat perancangan dan memastikan dampak pembangunan terowongan terhadap lingkungan sekitar.

4.2 Penyelidikan umum

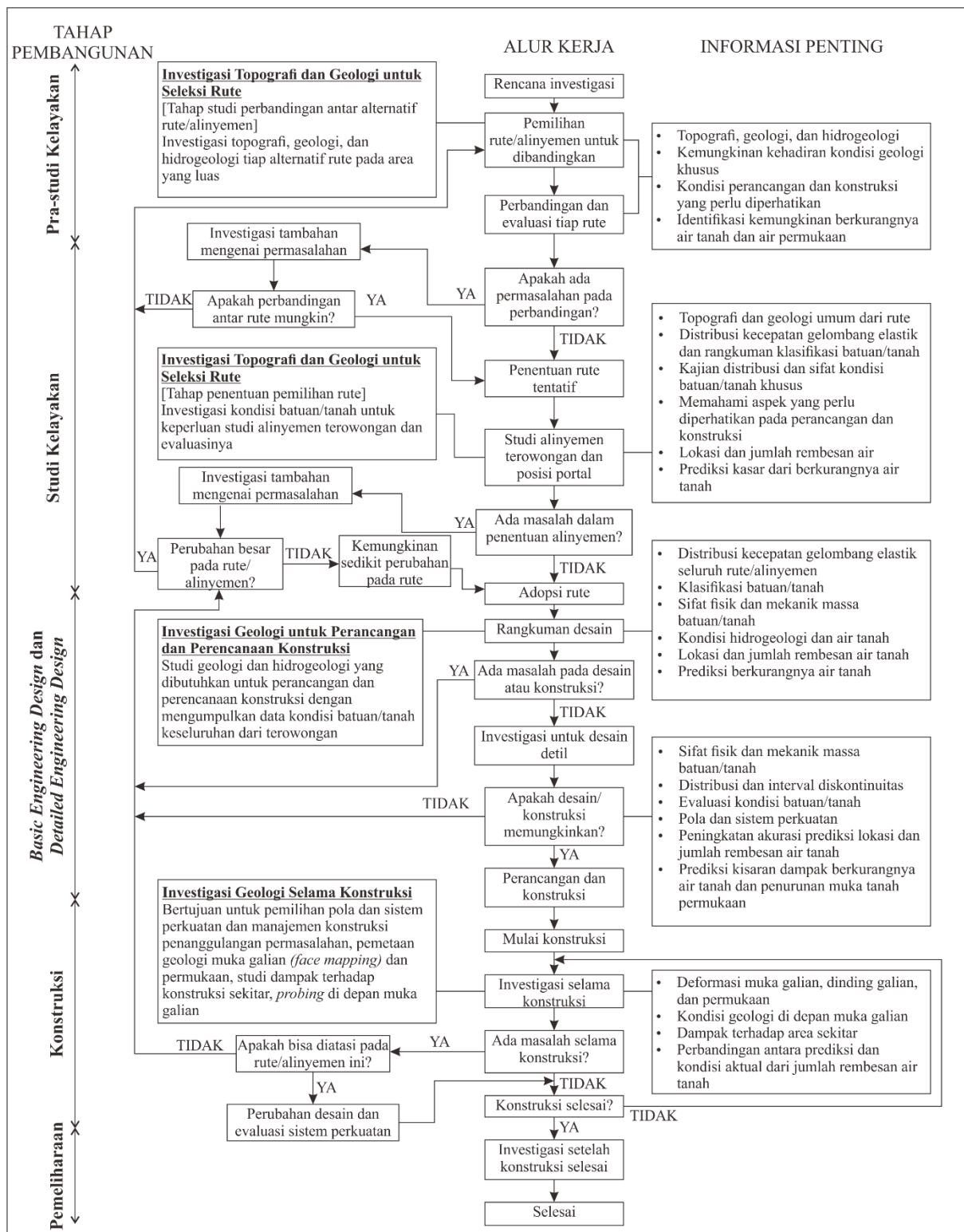
Beberapa hal yang harus dipertimbangkan dalam penyelidikan umum, di antaranya adalah sebagai berikut.

- a. Metode dan aspek penyelidikan kondisi umum aspek geomorfologi, batuan dan tanah, struktur geologi, airtanah, dan kegempaan diperlihatkan dalam Tabel 3. Tabel ini dapat digunakan sebagai panduan dalam menentukan penyelidikan geologi teknik yang diperlukan dalam pembangunan terowongan jalan dengan berbagai metode konstruksi (berdasarkan Tabel 1), dengan beberapa penyesuaian terhadap terowongan yang umumnya pada media tanah (terowongan perisai dan terowongan gali-dan-tutup).
- b. Terowongan pegunungan terutama dibangun pada kondisi geologi teknik yang lebih kompleks dan dapat berubah seiring kemajuan penggalian. Pemetaan muka galian (*face mapping*) dan *probing* perlu dilakukan pada metode konstruksi terowongan pegunungan untuk memprediksi dan menginterpretasi karakteristik dan kestabilan kondisi galian, serta membantu pemilihan sistem penyangga terowongan. Penyelidikan batuan mungkin tidak perlu dilakukan pada terowongan perisai dan terowongan gali-dan-tutup jika terowongan berada pada media tanah.

1.1.1 Penyelidikan terowongan pegunungan

- a. Proses penyelidikan geologi teknik dalam pembangunan terowongan dengan metode konstruksi terowongan pegunungan mengikuti diagram alir dalam Gambar 1. Metode dan aspek penyelidikan geologi teknik dalam pembangunan terowongan dengan metode konstruksi terowongan pegunungan mengacu pada pada Tabel 3.
- b. Dalam pembangunan terowongan pegunungan, penyelidikan perlu dilakukan untuk mengetahui kondisi geomorfologi, batuan dan tanah, struktur geologi, airtanah, kegempaan, dan kondisi lainnya terkait sumberdaya geologi (energi geotermal, mata air panas, gas, dan logam berat). Kegunaan masing-masing metode penyelidikan dan parameter yang diinvestigasi dalam penyelidikan umum kondisi geologi teknik pada tiap tahap pembangunan terowongan dengan metode konstruksi terowongan pegunungan dideskripsikan dalam Tabel 4.

- c. Aspek penyelidikan terkait dengan kondisi geomorfologi meliputi relief (topografi, morfologi, pola penyaluran), proses geomorfologi, deviasi tegangan in situ, dan *overburden*. Metode penyelidikan topografi dan pemetaan geomorfologi dijelaskan pada Bagian 5.1.
- d. Kondisi batuan atau tanah yang diinvestigasi meliputi jenis, distribusi, sifat fisik (kecepatan rambat gelombang seismik, sifat fisik batuan atau tanah), sifat mineralogi dan kimia (jenis mineral lempung, sifat *slaking* batuan, absorpsi air dan laju *swelling* tanah), sifat mekanika (kuat tekan, koefisien deformasi), dan kualitas massa batuan (klasifikasi massa batuan, diskontinuitas, pelapukan, dan tingkat konsolidasi). Metode penyelidikan kondisi batuan dan tanah dijelaskan pada Bagian 5.2. Pemetaan dan observasi muka galian (*face mapping*) perlu dilakukan pada tahap Konstruksi (Tabel 2). Penyelidikan kondisi batuan atau tanah juga digunakan dalam perhitungan beban gempa (Bagian 5.5.2).
- e. Kondisi struktur geologi meliputi distribusi dan jenis struktur geologi. Distribusi dan jenis struktur geologi secara umum diselidiki dengan survei geofisika dan pemetaan geologi permukaan. Metode penyelidikan struktur geologi dijelaskan pada Bagian 5.3.
- f. Kondisi airtanah yang diinvestigasi antara lain keberadaan akuifer airtanah, kedalaman muka airtanah, konduktivitas hidraulika batuan atau tanah, serta pola dan arah aliran airtanah. Metode penyelidikan airtanah dijelaskan pada Bagian 5.4.
- g. Aspek-aspek lain yang perlu diinvestigasi terkait dengan keberadaan sumber daya geologi yang dapat menjadi penghambat atau menimbulkan bahaya dalam proses pembangunan terowongan di lokasi konstruksi, antara lain energi geotermal, kehadiran mata air panas, gas beracun, dan logam berat. Aspek ini perlu diketahui untuk mengetahui apakah ada potensi bahaya yang ditemui dalam proses pembangunan terowongan. Kandungan logam berat dalam media yang dilewati terowongan dapat merusak material konstruksi terowongan. Metode penyelidikan dampak pembangunan terowongan terhadap lingkungan dijelaskan pada Bagian 4.2.3.



Gambar 1 - Diagram alir penyelidikan geologi teknik dalam pembangunan terowongan dengan metode konstruksi terowongan pegunungan (modifikasi dari JSCE, 2018b)

Tabel 3 - Metode penyelidikan dan aspek geologi teknik yang diinvestigasi dalam pembangunan terowongan dengan metode konstruksi terowongan pegunungan (modifikasi dari JSCE, 2018b)

Aspek penyelidikan		Geomorfologi		Batuan atau Tanah										Struktur Geologi		Airtanah		Aktifitas Vulkanik dan Seismik										
		Relief (topografi, morfologi)	Proses geomorfologi	Penggunaan lahan	Deviasi tegangan in situ	Jenis dan sebaran	Kecepatan seismik	Sifat fisik	Mineral lempung	Sifat slaking	Absorpsi air dan laju swelling	Kuat tekan	Koefisien deformasi	Klasifikasi massa batuan	Perlepasan, foliasi	Pelapukan atau alterasi	Tingkat konsolidasi	Sesar atau lipatan	Kekar	Akuifer	Muka air tanah	Konduktivitas hidrolik	Aliran air tanah	Geothermal	Gas beracun	Sesar aktif		
Tahap Rencana Teknik Awal, Rencana Teknik Akhir, dan Konstruksi	Tahap Pra-Studi Kelayakan dan Studi Kelayakan	Pengumpulan data sekunder	•	•	•	○	•	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		Analisis geomorfologi, batuan dan tanah, struktur geologi, dan airtanah	•	•	•	○	○												•								•	
		Survei permukaan (geomorfologi, geologi, geologi teknik batuan dan tanah, hidrogeologi, dll)	•	•	•	•	•							•	•	•	•	•	•	•	•			○	○	○	○	•
		Survei geofisika seismik						•						•	•	•	○	•								○		•
		Survei geofisika resistivitas				○			○								•	○				•	•			○		•
		Parit uji, pengeboran					•						○	○	•	•	•	•	•	•	•	•			○	○		•
													○	○				•										
		Logging dan uji lubang bor	SPT										○	○														
			Sondir (CPT/CPTu/SCPT)					•		•												•						
			Horizontal borehole load test												•													
			Uji permeabilitas																			•		•				
			Logging seismik						○	○						○	○	○	○	○	○							
			Logging elektrik							○					○	○	○	○				○	○	○				
			Logging airtanah																			○	•		○			
			Borehole scanner																○	○								
			Pengukuran tegangan in situ				○																					
		Uji laboratorium	Uji densitas							•																		
			Uji kadar air							•		○	○															
			Uji distribusi ukuran butir							•					•													
			Specific gravity							•					○													
			Uji konsistensi (hardness)							•			○		○													
			Uji kuat tekan bebas									○	•	○		○	○											
			Uji kuat tekan triaksial									○	•	•														
			Uji kuat tarik (Brazilian test)										○															
			Uji point load											•														
			Needle penetration test											•														
			Uji permeabilitas																					•				
			Uji gelombang ultrasonik					•	•				○															
	Uji slaking										○	•	○															
	Uji CEC								•	○	○																	

Aspek penyelidikan		Geomorfologi		Batuan atau Tanah										Struktur Geologi		Airtanah		Aktifitas Vulkanik dan Seismik								
		Relief (topografi, morfologi)	Proses geomorfologi	Penggunaan lahan	Deviasi tegangan in situ	Jenis dan sebaran	Kecepatan seismik	Sifat fisik	Mineral lempung	Sifat <i>slaking</i>	Absorpsi air dan laju <i>swelling</i>	Kuat tekan	Koefisien deformasi	Klasifikasi massa batuan	Perlapisan, foliasi	Pelapukan atau alterasi	Tingkat konsolidasi	Sesar atau lipatan	Kekar	Akuifer	Muka air tanah	Konduktivitas hidrolik	Aliran air tanah	Geothermal	Gas beracun	Sesar aktif
Metode penyelidikan	Uji <i>swelling</i>							○	○	●																
	Petrografi sayatan tipis							●				●		●												
	Analisis XRD							●						●												
	SEM							○						○												
	Terowongan eksplorasi					●	○	○			○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●			●	●	

Keterangan: ○ Penelitian dilakukan jika diperlukan ● Penelitian direkomendasikan

Tabel 4 - Metode, parameter, dan kegunaan penyelidikan kondisi geologi teknik umum dalam tiap tahap pembangunan terowongan dengan metode konstruksi terowongan pegunungan (modifikasi dari JSCE, 2018b)

Metode penyelidikan	Parameter penyelidikan	Kegunaan	Catatan untuk inspeksi	Tahap Pembangunan					
				Pra-studi kelayakan	Studi kelayakan	Rencana Teknik Awal	Rencana Teknik Akhir	Konstruksi	Pemeliharaan
Pengumpulan data sekunder	Geomorfologi, geologi, airtanah, sejarah bencana, sumberdaya bawah permukaan, kemudahan konstruksi, kerentanan bencana, dan aspek-aspek lain mengenai area rencana terowongan	1. Memperkirakan kondisi geomorfologi, batuan dan tanah, struktur geologi, airtanah, dan geodinamika (aktivitas vulkanik dan kegempaan) secara umum berdasarkan analisis data sekunder	1. Ketersediaan data tergantung lokasi terowongan 2. Umumnya peta-peta tidak terlalu presisi 3. Informasi pada peta tidak selalu berhubungan langsung dengan investigasi	⊙	⊙	•	•	•	
Studi kondisi geomorfologi dan proses-proses geomorfologi (peta topografi dan citra penginderaan jauh)	1. Relief (kondisi topografi, morfologi, pola kelurusan & penyaluran) 2. Proses geomorfologi (erosi, pelarutan batuan, gerakan tanah) 3. Orientasi dan geometri lereng 4. Ketebalan overburden 5. Deviasi tegangan in situ	2. Memahami area problematik dan harus dihindari 3. Mengetahui aspek yang harus diperjelas pada survei permukaan atau mengikuti metode investigasi yang tepat	- Presisi dan kesulitan pengkajian tergantung skala foto udara dan peta topografi. Analisis foto udara dan peta geologi yang dilakukan dengan survei laser berguna untuk pembacaan topografi dan digunakan sebagai data dasar selama survei geologi permukaan.	⊙	⊙	⊙	⊙	○	
Pemetaan geomorfologi lapangan	1. Fitur geologi permukaan (gawir, kars) 2. Proses geologi permukaan (pelapukan, pelarutan, erosi)	Memprediksi kondisi geologi bawah permukaan berdasarkan fitur dan proses geologi permukaan	Hasil penyelidikan topografi disajikan dalam bentuk peta dan sayatan geomorfologi, dan kebenarannya harus dicek di lapangan		⊙	⊙	⊙	○	

Metode penyelidikan	Parameter penyelidikan	Kegunaan	Catatan untuk inspeksi	Tahap Pembangunan					
				Pra-studi kelayakan	Studi kelayakan	Rencana Teknik Awal	Rencana Teknik Akhir	Konstruksi	Pemeliharaan
Pemetaan geologi dan geologi teknik batuan dan tanah permukaan	1. Persebaran, karakteristik, dan kestabilan geologi permukaan 2. Distribusi dan karakteristik batuan/tanah 3. Distribusi, orientasi, dan geometri struktur geologi	1. Membuat peta dan sayatan geologi dan geologi teknik, dan menjelaskan distribusi dan karakteristik batuan/tanah di sekitar rute/alinemen 2. Evaluasi kualitatif mengenai keamanan dan kemungkinan konstruksi berdasarkan kondisi geologi teknik sekitar rute	1. Peta geologi hanya salah satu interpretasi dari hasil penyelidikan, perlu diverifikasi pada tahap berikutnya 2. Interpretasi sangat bergantung pada ketelitian dan skala peta geologi yang digunakan		⊙	⊙	⊙	○	○
Penyelidikan struktur geologi	1. Distribusi, orientasi, dan geometri struktur geologi bawah permukaan 2. Sesar aktif	Membantu penentuan rute dan alinyemen terowongan dengan risiko terkecil	1. Tingkat ketelitian penyelidikan struktur geologi bertambah seiring kemajuan tahap pembangunan, untuk meningkatkan tingkat kepercayaan dari hasil penyelidikan struktur geologi. 2. Salah satu penyelidikan paling penting dalam pembangunan terowongan dan perlu dilakukan secara komprehensif	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	○
Survei geofisika	Survei seismik refraksi	1. Memahami ketebalan dan karakteristik tanah, sedimen tak terkonsolidasi, dan lapisan lapuk 2. Memahami kondisi massa batuan pada level ekskavasi 3. Memahami posisi, skala, kondisi,	1. Ketika area berkecepatan rendah dipersempit akan mengurangi presisi dari analisis 2. Evaluasi distribusi geologi, tingkat pelapukan, tingkat retakan 3. Evaluasi dikembangkan berdasarkan		⊙	⊙	⊙	○	

Metode penyelidikan	Parameter penyelidikan	Kegunaan	Catatan untuk inspeksi	Tahap Pembangunan					
				Pra-studi kelayakan	Studi kelayakan	Rencana Teknik Awal	Rencana Teknik Akhir	Konstruksi	Pemeliharaan
		dan kontinuitas sesar, zona fraktur, dan lapisan lunak 4. Pemeriksaan klasifikasi batuan/tanah	kombinasi dengan investigasi lain secara sintetik						
	Survei geolistrik resistivitas	Resistensi spesifik dari batuan/tanah bawah permukaan serta distribusinya pada profil melintang	1. Memahami kedalaman talus dan lapisan lapuk 2. Memahami struktur geologi dan karakteristik berdasarkan resistensi spesifik 3. Deteksi lapisan lunak 4. Memahami sifat dan skala sesar 5. Pengkajian distribusi dan sifat airtanah dan akuifer	1. Sifat geografis dan geologi dari lokasi konstruksi mempengaruhi ketelitian investigasi secara signifikan 2. Tidak berhubungan langsung terhadap kekuatan mekanik batuan/tanah		•	•	•	○
Pengeboran	1. Stratifikasi dan distribusi tanah dan batuan 2. Posisi, skala, sifat, dan kontinuitas bidang sesar, zona fraktur, dan lapisan lunak 3. Tipe batuan, pelapukan dan alterasi, dan sifat diskontinuitas 4. Kemungkinan kehadiran air tanah, tekanan dan jumlah <i>inflow</i> air tanah	1. Geologi diinvestigasi secara langsung untuk memperjelas rincian distribusi dan sifat batuan/tanah 2. Pemeriksaan klasifikasi batuan/tanah, metode ekskavasi, sistem penyangga dan <i>lining</i> , jumlah bahan peledak.	Merupakan investigasi rinci dan perlu dikombinasikan dengan survei permukaan, geofisika, dan investigasi lain.		⊙	⊙	⊙	⊙	

Metode penyelidikan	Parameter penyelidikan	Kegunaan	Catatan untuk inspeksi	Tahap Pembangunan						
				Pra-studi kelayakan	Studi kelayakan	Rencana Teknik Awal	Rencana Teknik Akhir	Konstruksi	Pemeliharaan	
Sondir (<i>Cone Penetration Test, CPT, CPTu</i>)	1. Tahanan ujung (<i>cone tip resistance</i>) dan gesekan selimut (<i>sleeve friction</i>) untuk perhitungan rasio friksi 2. Tekanan air pori dengan CPTu	1.. Interpretasi stratigrafi tanah dan sifat keteknikannya 2. Identifikasi kedalaman tanah keras 3. Pengukuran tekanan air pori tanah	1. Ideal pada tanah berbutir halus 2. Tidak bisa dilakukan pengambilan sampel 3. Interpretasinya perlu dibuktikan dengan pengeboran inti 4. Kapasitas mesin sondir yang kecil tidak bisa menembus kedalaman yang besar		•	•	•	○		
Logging dan uji lubang bor	SPT	Kestabilan sekitar portal dan lokasi lain dengan <i>overburden</i> kecil	1. Nilai N-SPT, konsistensi tanah 2. Pengambilan sampel dan penentuan kategori tanah	1. Tidak bisa dilakukan untuk batuan keras 2. Ketika N-SPT lebih dari 50, penentuan jenis batuan/tanah dengan baik tidak dapat dilakukan		•	•	•	○	
	<i>Borehole load test</i>	Koefisien deformasi, koefisien elastik, dll.	Analisis deformasi batuan/tanah	1. Pemilihan alat pengujian yang cocok untuk kondisi geologi dan diameter lubang bor dibutuhkan 2. Pemilihan segmen yang membutuhkan observasi inti batuan dibutuhkan, termasuk pada kondisi geologi umum		•	•	•	○	
	Uji permeabilitas	Sifat hidrolika batuan/tanah	1. Evaluasi dan pendugaan <i>inflow</i> airtanah yang tiba-tiba atau stabil pada akuifer	1. Nilai yang terukur adalah estimasi kasar yang perlu diinterpretasi dalam nilai eksponen		•	⊙	⊙	○	

Metode penyelidikan	Parameter penyelidikan	Kegunaan	Catatan untuk inspeksi	Tahap Pembangunan					
				Pra-studi kelayakan	Studi kelayakan	Rencana Teknik Awal	Rencana Teknik Akhir	Konstruksi	Pemeliharaan
		2. Evaluasi kestabilan muka galian pada batuan/tanah tak terkonsolidasi	2. Pemilihan pengujian yang cocok untuk kondisi batuan/tanah diperlukan						
Logging seismik refraksi <i>downhole/crosshole</i>	Distribusi vertikal kecepatan elastik batuan/tanah	1. Estimasi tidak langsung dari klasifikasi batuan/tanah, tingkat pelapukan, alterasi, dan retakan 2. Mengetahui kehadiran lapisan kecepatan rendah	1. Terkadang tidak dapat diukur jika tidak ada airtanah 2. Terkadang lapisan kecepatan rendah tidak dapat diukur jika berada di bawah muka air tanah		○	○	○	○	
Logging geolistrik	Resistensi spesifik semu dinding lubang bor	1. Memahami distribusi geologi berdasarkan resistensi spesifik 2. Evaluasi kondisi airtanah pada akuifer	Terdapat 2 pengukuran, <i>downhole</i> dan <i>suspension logging</i> ; keduanya digunakan untuk mengetahui kehadiran air dalam lubang bor dan keperluan untuk pemasangan <i>casing</i>		○	○	○	○	
Logging densitas	Densitas batuan/tanah	Nilai dan distribusi densitas jenuh dan kering, serta rasio pori tanah	1. Sinar gamma yang relatif kuat diperlukan 2. Pemeriksaan pengujian diperlukan untuk pembuatan kurva kalibrasi		○	○	○	○	
Logging kaliper	Perubahan diameter lubang bor	1. Estimasi kualitatif kestabilan batuan/tanah 2. Distribusi vertikal dari lapisan tidak stabil	Pengukuran tidak bisa dilakukan dalam lubang bor dengan <i>casing</i>		○	○	○	○	
Logging air tanah	Muka air tanah	Distribusi muka air tanah	1. Metode elektroda tunggal butuh waktu lama untuk pengukuran		○	○	○	○	

Metode penyelidikan	Parameter penyelidikan	Kegunaan	Catatan untuk inspeksi	Tahap Pembangunan						
				Pra-studi kelayakan	Studi kelayakan	Rencana Teknik Awal	Rencana Teknik Akhir	Konstruksi	Pemeliharaan	
			2. Pengukuran tidak bisa dilakukan dalam lubang bor yang dipasang casing							
	<i>Borehole scanner</i>	1. Kondisi stratifikasi 2. Skala, sifat, dan <i>strike/dip</i> sesar dan diskontinuitas 3. Kondisi <i>inflow</i> airtanah	1. Pemeriksaan kestabilan muka galian berdasarkan kondisi dan orientasi diskontinuitas 2. Pemeriksaan kondisi <i>inflow</i> airtanah	Diperlukan lubang bor yang dibersihkan secara keseluruhan		○	○	○	○	
Pengukuran tegangan in-situ	Tegangan in situ	Kondisi tegangan batuan/tanah	Hanya dapat mengukur kondisi tegangan secara parsial, bukan tegangan global		○	●	●	●		
Uji laboratorium	1. Karakteristik fisik dan mekanik batuan: kecepatan gelombang elastik, kuat tekan, dll. 2. Karakteristik mineral penyusun batuan: kandungan mineral lempung, karakteristik <i>slaking</i> , dll. 3. Karakteristik fisik dan mekanik tanah: distribusi ukuran butir, kandungan air, kuat tekan, konsistensi, dll.	1. Memahami tingkat kerusakan batuan berdasarkan diskontinuitas dll. 2. Memahami sifat fisik dan mekanik batuan/tanah 3. Evaluasi dan pendugaan kondisi <i>squeezing</i> 4. Estimasi kestabilan sedimen tak terkonsolidasi 5. Pemeriksaan kestabilan <i>stand-up</i> muka galian pada batuan/tanah tak terkonsolidasi	1. Karena sampel merupakan batuan utuh tanpa diskontinuitas, nilai hasil uji bukan representasi yang baik terhadap kondisi bawah permukaan 2. Hasil pengujian sangat bervariasi karena perbedaan kandungan air pada sampel batuan lunak 3. Pengujian sifat mekanik cenderung dipengaruhi oleh gangguan pada sampel saat pengambilan dan pengiriman sampel		●	◎	◎	●		

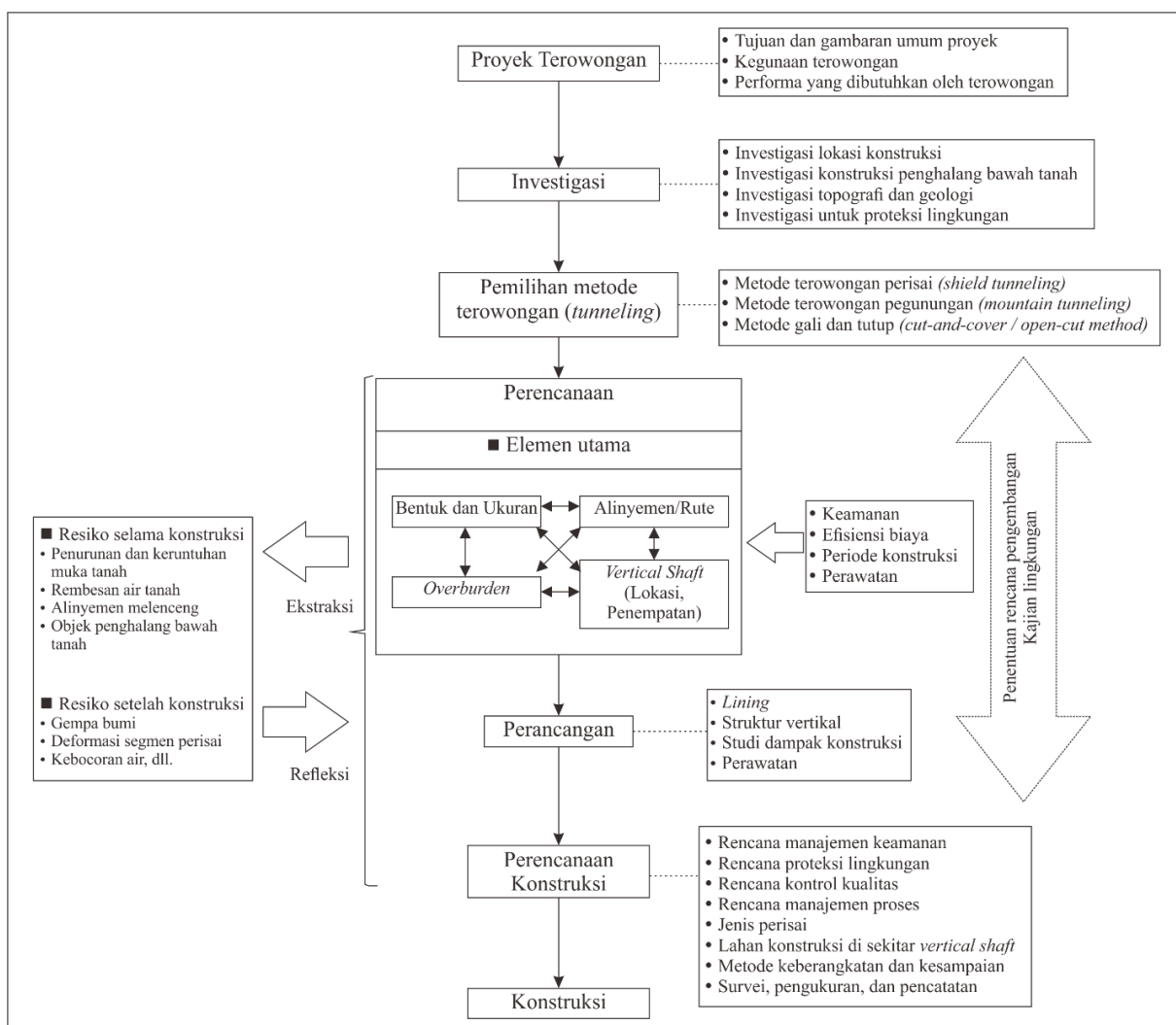
Metode penyelidikan	Parameter penyelidikan	Kegunaan	Catatan untuk inspeksi	Tahap Pembangunan					
				Pra-studi kelayakan	Studi kelayakan	Rencana Teknik Awal	Rencana Teknik Akhir	Konstruksi	Pemeliharaan
Penyelidikan airtanah	1. Kondisi muka airtanah 2. Permeabilitas batuan/tanah 3. Prediksi rembesan airtanah ke dalam terowongan 4. Uji kualitas airtanah 5. Karakteristik akuifer (permeabilitas, transmisivitas, storativitas)	1. Mengetahui kondisi airtanah dan kemungkinan rembesan airtanah ke dalam terowongan 2. Input bagi perancangan sistem drainase terowongan, <i>waterproofing</i> , dan <i>lining</i> 3. Mengetahui kondisi hidrogeologi pra-konstruksi dan membantu evaluasi dampak konstruksi terowongan terhadap airtanah	1. Penting dilakukan pada lokasi dengan kondisi airtanah yang rentan, misalnya pada lokasi perkotaan, kawasan penting hidrologi, dll. 2. Sebagai input dalam evaluasi dampak pembangunan terowongan terhadap kondisi hidrogeologi	•	⊙	⊙	⊙	⊙	•
Penyelidikan kegempaan	1. Zona bahaya gempa bumi (keruntuhan sesar dan likuifaksi) 2. Percepatan gempa bagi perancangan beban gempa	1. Input dalam menentukan rute dan alinyemen terowongan 2. Desain beban gempa bagi perancangan sistem penyangga dan lining terowongan 3. Mengkaji risiko bahaya gempa bumi bagi pembangunan terowongan	1. Penting dilakukan pada lokasi yang berada dekat dengan sesar aktif 2. Penyelidikan didukung dengan penyelidikan sesar aktif	⊙	⊙	⊙	⊙	•	

Metode penyelidikan	Parameter penyelidikan	Kegunaan	Catatan untuk inspeksi	Tahap Pembangunan					
				Pra-studi kelayakan	Studi kelayakan	Rencana Teknik Awal	Rencana Teknik Akhir	Konstruksi	Pemeliharaan
Analisis kinematika	1. Orientasi bidang diskontinuitas 2. Orientasi lereng pada lokasi rencana portal 3. Orientasi dinding dan muka galian 4. Sudut gesek dalam massa batuan	1. Memprediksi mode keruntuhan massa batuan, volume dan bentuk blok batuan yang berpotensi mengalami keruntuhan 2. Mengevaluasi desain dan geometri lereng portal 3. Mengevaluasi sistem perkuatan dan rekayasa geoteknik yang perlu diaplikasikan	1. Perlu dilakukan pada lokasi yang tersusun dari massa batuan yang keruntuhannya dikontrol utamanya oleh diskontinuitas. 2. Dilakukan pada lereng rencana portal dan pada dinding dan muka galian		•	•	•	⊙	
Pemetaan muka galian dan <i>probing</i>	1. Kondisi geologi 2. Kualitas massa batuan 3. Rembesan airtanah	1. Memprediksi kondisi geologi teknik di depan galian 2. Mengevaluasi kondisi geologi teknik aktual yang ditemui selama penggalian sesuai dengan perancangan 3. Membantu evaluasi perubahan desain dan metode penggalian terowongan jika ditemukan kondisi geologi teknik yang membutuhkan penyesuaian	1. Perlu dilakukan utamanya pada metode terowongan pegunungan karena kondisi geologi teknik yang lebih kompleks dan bervariasi selama penggalian 2. Dilakukan secara kontinyu dengan interval tertentu selama penggalian, misal dilakukan setelah setiap siklus penggalian terowongan					⊙	
Monitoring kondisi geologi teknik	1. Deformasi terowongan 2. Deformasi permukaan tanah dan konstruksi sekitar	1. Memastikan keamanan penggalian terowongan 2. Mengetahui dampak pembangunan	1. Program dan spesifikasi monitoring kondisi geologi teknik perlu ditentukan pada tahap perancangan detail					⊙	⊙

Metode penyelidikan	Parameter penyelidikan	Kegunaan	Catatan untuk inspeksi	Tahap Pembangunan					
				Pra-studi kelayakan	Studi kelayakan	Rencana Teknik Awal	Rencana Teknik Akhir	Konstruksi	Pemeliharaan
	3. Rembesan airtanah 4. Kondisi muka airtanah di area sekitar terowongan	terowongan terhadap lingkungan 3. Mengevaluasi rekayasa geoteknik yang diperlukan untuk menanggulangi kondisi geologi teknik yang tidak menguntungkan (<i>unfavourable</i>)	2. Monitoring kondisi geologi teknik dilakukan secara kontinyu dengan interval waktu dan jarak pengukuran tertentu						
Penyelidikan dampak terhadap lingkungan	1. Fitur topografi, geologi, kondisi batuan/tanah 2. Kondisi airtanah dan air permukaan 3. Tata guna lahan, konstruksi eksisting, peninggalan sejarah 4. Penurunan muka tanah 5. Kemunculan gas beracun	Mengetahui kondisi lingkungan sekitar sebelum, selama, dan setelah konstruksi terowongan	Penanggulangan dampak konstruksi terowongan terhadap lingkungan perlu dilakukan sesuai dengan kebijakan dan peraturan yang berlaku	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
○: Investigasi dilakukan jika diperlukan ●: Investigasi direkomendasikan ⊙: Investigasi khusus yang penting dilakukan									

4.2.1 Penyelidikan terowongan perisai

- Proses pembangunan terowongan dengan metode konstruksi terowongan perisai (*shield tunnel*) mengacu pada diagram alir dalam Gambar 2.
- Metode dan aspek penyelidikan geologi teknik dalam pembangunan terowongan dengan metode konstruksi terowongan perisai secara umum dapat mengacu pada pada Tabel 3.
- Hal yang perlu diperhatikan adalah, terowongan perisai umumnya dibangun pada media tanah atau campuran batuan-tanah dengan kondisi geologi yang tidak terlalu kompleks, sehingga pemetaan muka galian (*face mapping*) tidak diperlukan.
- Terowongan perisai umumnya berada di lokasi perkotaan, sehingga pengaruh pembangunan terowongan terhadap lingkungan sekitar perlu mendapat perhatian. Proteksi kondisi lingkungan geologi dapat dilihat pada Tabel 5.



Gambar 2 - Diagram alir proses pembangunan terowongan perisai (modifikasi dari JSCE, 2018c)

Tabel 5 - Aspek penyelidikan terkait kondisi geologi teknik dalam pembangunan terowongan dengan metode konstruksi terowongan perisai (modifikasi dari JSCE, 2018c)

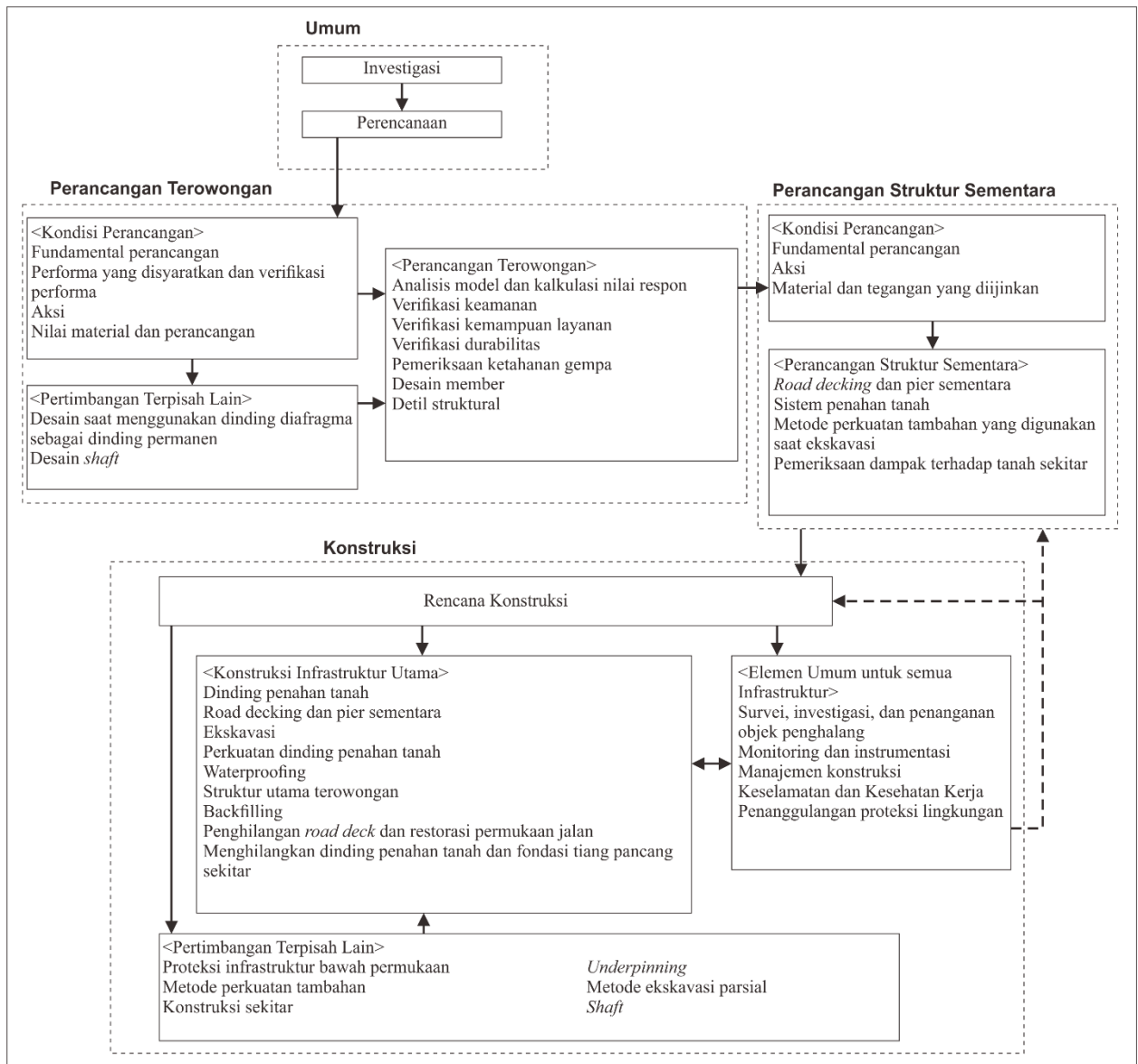
Penyelidikan		Keterangan
Aspek geomorfologi, batuan dan tanah, struktur geologi, airtanah, dll.	Geomorfologi	Investigasi diawali dengan observasi fitur-fitur geomorfologi karena umumnya kondisi geomorfologi mencerminkan kondisi bawah permukaan. Pada beberapa lokasi yang menunjukkan potensi kehadiran struktur geologi (sesar, lipatan), investigasi rinci dengan jarak antar titik pengeboran yang lebih rapat perlu dilakukan, karena kondisi geologi teknik dapat berubah pada jarak yang kecil untuk lokasi-lokasi ini.
	Komposisi lapisan batuan dan tanah	Pada tahap awal, perlu untuk memahami kondisi batuan dan tanah secara umum pada lokasi yang luas untuk mempertimbangkan alternatif rute terowongan. Kajian awal ini mengandalkan data sekunder, reconnaissance lapangan, dan survei geomorfologi. Pada tahap kedua, investigasi dasar yang utamanya terdiri dari pengeboran dengan SPT dilakukan untuk menggambarkan profil vertikal yang menunjukkan komposisi peralihan lapisan batuan dan tanah. Dengan demikian, masalah yang dapat ditemui dalam shield tunneling dapat terlihat, serta mengetahui investigasi tambahan yang perlu dilakukan.
	Kondisi batuan dan tanah	Sifat keteknikan dari batuan dan tanah perlu dipahami untuk memungkinkan pembuatan desain <i>lining</i> dan mesin ekskavasi <i>shield tunnels</i> , serta untuk merencanakan konstruksi yang aman dan efisien. Perlu untuk menginvestigasi kemungkinan likuifaksi akibat gempa bumi, konsolidasi akibat penurunan muka tanah akibat perubahan beban tanah penutup, dan penurunan muka tanah akibat perubahan muka airtanah
	Airtanah	Sangat penting untuk mengukur kualitas airtanah (konsentrasi garam, besi dan zat berbahaya), muka airtanah dan tekanan airtanah. Kualitas airtanah, contohnya airtanah yang mengandung garam dapat merusak terowongan shield. Selain itu, usaha pencegahan kerusakan akibat kandungan klorida penting dilakukan. Tekanan air pori perlu diukur pada setiap lapisan permeabel. Muka airtanah dan <i>piezometric head</i> mengalami fluktuasi akibat pengaruh musim atau aktivitas manusia.
	Kehadiran udara rendah oksigen, gas berbahaya, dll.	Kemungkinan kebocoran gas beracun harus diinvestigasi di bawah lapisan impermeabel atau lapisan pasir-kerikil yang sebelumnya telah dipengaruhi oleh perubahan muka airtanah akibat sumur dalam atau pemompaan air berlebih. Seringkali, rongga kosong yang dihasilkan akibat kondisi ini mengandung udara rendah oksigen atau gas berbahaya. Gas metana yang merupakan gas mudah terbakar dapat masuk ke dalam terowongan dan menyebabkan ledakan. Investigasi mengenai gas berbahaya meliputi penyelidikan geologi serta studi data sekunder dari proyek konstruksi sekitar. Gas berbahaya lain termasuk hidrogen sulfida, nitrogen oksida, dan lain-lain.
Proteksi kondisi lingkungan geologi	Pergerakan tanah, pengaruh terhadap konstruksi sekitar	Kondisi permukaan tanah dan konstruksi lain sepanjang alinyemen terowongan harus diinvestigasi dan dimonitor sebelum, selama, dan setelah konstruksi untuk mengukur kenaikan atau penurunan muka tanah,

Penyelidikan		Keterangan
		serta pengaruhnya terhadap konstruksi lain (permukaan dan bawah permukaan) sepanjang rute terowongan. Pengukuran ini digunakan sebagai dasar penentuan persyaratan penanggulangan.
	Airtanah	Pemakaian airtanah, elevasi muka airtanah, dan kualitas airtanah dan mata air yang berada di sekitar zona pengaruh terowongan harus diinvestigasi, karena perubahan muka airtanah dapat mempengaruhi kondisi batuan/tanah, lingkungan, dan penduduk sekitar. Penting untuk memahami hubungan curah hujan dan muka airtanah selama fase persiapan. Selain itu, perlu juga dilakukan kajian pengaruh terowongan terhadap area yang lebih luas, karena pembangunan terowongan dapat membuat muka airtanah naik di hulu dan turun di hilir.
	Pengaruh <i>slurry</i> , <i>chemical grouting</i> kimia, dan <i>backfill grouting</i> terhadap airtanah	Pada zona yang diestimasi terpengaruh oleh injeksi <i>chemical grouting</i> , kualitas airtanah sumur, sungai, dan tubuh air lain perlu diperiksa sebelum konstruksi, dan dimonitor untuk mengetahui penurunan kualitas airtanah selama dan setelah konstruksi. Demikian pula, pengukuran dan monitoring serupa juga perlu dilakukan jika diperkirakan <i>slurry</i> yang merembes masuk ke tanah, <i>backfill grouting</i> , dan lain-lain dapat mempengaruhi kondisi airtanah.
	Penanganan material, pembuangan material, dan penggunaan produk sisa konstruksi	Perlu untuk meminimalisir volume produk sisa konstruksi yang dihasilkan serta memaksimalkan penggunaannya kembali untuk operasional konstruksi yang lancar, serta untuk melestarikan lingkungan hidup di area sekitar. Selain itu, rute pengangkutan limbah, pabrik pengolahan final, dan fasilitas lain perlu diinvestigasi.
	Polusi tanah	Survei harus dilakukan ketika konstruksi menimbulkan risiko terhadap kesehatan manusia yang berhubungan dengan batuan, tanah, dan campuran yang secara alami mengandung logam berat dan bahan berbahaya lain.

4.2.2 Penyelidikan terowongan gali-dan-tutup

- Proses pembangunan terowongan dengan metode konstruksi terowongan gali-dan-tutup mengacu pada diagram alir dalam Gambar 3.
- Metode dan aspek penyelidikan geologi teknik dalam pembangunan terowongan dengan metode konstruksi terowongan gali-dan-tutup (*cut-and-cover tunnel*) secara umum dapat mengacu pada pada Tabel 3.
- Penyelidikan batuan pada Tabel 3 tidak perlu dilakukan, karena metode konstruksi ini umumnya dilakukan pada media tanah (seperti dijelaskan pada Tabel 1), sedangkan penyelidikan geomorfologi, struktur geologi, air tanah, dan kegempaan secara umum sama.

- d. Penyelidikan penting yang harus dilakukan pada pembangunan terowongan gali-dan-tutup adalah penyelidikan kehadiran bangunan, utilitas, dan infrastruktur bawah permukaan yang berpotensi menjadi obyek penghalang dalam konstruksi terowongan, karena umumnya berada di area perkotaan.
- e. Jenis dan metode perancangan dinding penahan tanah yang perlu diaplikasikan pada pembangunan terowongan gali-dan-tutup dapat mengacu pada SNI 8460:2017.



Gambar 3 - Diagram alir proses pembangunan terowongan gali-dan-tutup (modifikasi dari JSCE, 2018a)

4.2.3 Penyelidikan dampak terhadap lingkungan

Penyelidikan dampak terhadap lingkungan harus dilakukan untuk semua jenis terowongan yang mempunyai panjang ≥ 500 m sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. P.38/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2019 tentang Jenis Rencana Usaha dan/atau Kegiatan yang Wajib Memiliki Analisis Mengenai Dampak Lingkungan Hidup. Penyelidikan geologi teknik yang dilakukan dalam penyelidikan dampak pembangunan terowongan jalan terhadap kondisi lingkungan geologi di sekitar area pembangunan terowongan ditampilkan dalam

Tabel 6. Selain bagi kelancaran proses pembangunan, dampak pembangunan terhadap lingkungan terkait kondisi geologi teknik perlu diprediksi dan dikaji bagi penyusunan dokumen analisis dampak lingkungan dan perlu dilakukan dari tahap perencanaan rute terowongan.

Tabel 6 - Penyelidikan dampak pembangunan terowongan terhadap lingkungan geologi
(modifikasi dari JSCE, 2018b)

Jenis penyelidikan	Penyelidikan yang dilakukan	Pertimbangan	Tahap pembangunan			
			Pra-Studi Kelayakan dan Studi Kelayakan	Tahap Rencana Teknik Awal dan Rencana Teknik Akhir	Konstruksi	Pemeliharaan
Fitur-fitur geomorfologi, geologi, kondisi batuan/tanah	Kondisi masa kini dari bentuk lahan dan asal mulanya, stratigrafi, fasies, struktur geologi, pembagian umur lapisan batuan/tanah, ketebalan lapisan, kompresibilitas, permeabilitas	Kontinuitas, kehadiran sesar	•	⊙	○	○
Sumberdaya bawah tanah	Distribusi sumberdaya mineral, gas alam, dll.	Kehadiran gas berbahaya	•	⊙	○	○
Kondisi air tanah	Distribusi dan permeabilitas akuifer bebas, tekanan dan kualitas air tanah, arah dan kecepatan aliran air tanah, distribusi dan kuantitas mata air, kuantitas <i>recharge</i> air tanah	Penurunan kualitas dan kuantitas air tanah	•	⊙	⊙	○
Penurunan muka tanah	Tingkat penurunan permukaan tanah dan sedimentasi kumulatif tahunan area proyek, penurunan muka per lapisan dan laju penurunan muka tanah, pengaruh terhadap bangunan dan konstruksi lain	Investigasi pengaruh konstruksi terdahulu	•	⊙	⊙	•
Air berlumpur	Status drainase, laju aliran, dan kualitas air, rute drainase dan kondisi jalur air, kondisi sungai yang terdapat aliran air berlumpur (laju aliran, kualitas air, situasi penggunaan)	Berdasarkan regulasi, investigasi penyebab dan kondisi air berlumpur sebelum pembuangan untuk kajian dampak lingkungan	○	•	⊙	○
Diseminasi, polusi logam berat	pH, konduktivitas elektrik, analisis air, uji kandungan dan uji disolusi (H_2O , H_2O_2) dari sumber mata air	Perlu untuk menyelidiki hal-hal berikut: sabuk	○	•	⊙	○

Jenis penyelidikan	Penyelidikan yang dilakukan	Pertimbangan	Tahap pembangunan			
			Pra-Studi Kelayakan dan Studi Kelayakan	Tahap Rencana Teknik Awal dan Rencana Teknik Akhir	Konstruksi	Pemeliharaan
		mineralisasi, endapan bijih, <i>muck</i> , perawatan mata air				
○: Dilaksanakan jika diperlukan ●: Dilaksanakan ◎: Dilaksanakan, terutama aspek yang dianggap penting						

4.3 Penyelidikan pada kondisi khusus

Penyelidikan pada kondisi khusus meliputi penyelidikan kondisi geologi teknik khusus dan penyelidikan kondisi lokasi dan geometri khusus.

4.3.1 Kondisi geologi teknik khusus

- a. Aspek-aspek geologi teknik yang diinvestigasi dalam pembangunan terowongan melalui metode konstruksi terowongan pegunungan dengan kondisi geologi teknik khusus ditampilkan pada Tabel 7. Informasi penting yang harus diinvestigasi pada lokasi konstruksi dengan kondisi geologi teknik khusus ditampilkan dalam Tabel 8.
- b. Selain aspek batuan dan tanah, struktur geologi, dan airtanah, penyelidikan aspek kegempaan harus dilakukan dalam pembangunan terowongan pada zona sesar. Penyelidikan aspek kegempaan meliputi penyelidikan sesar aktif dan paleoseimik dengan metode pemetaan, *trenching*, dan *dating* (Bagian 5.5.1).

Tabel 7 - Aspek penyelidikan pada kondisi geologi teknik khusus (modifikasi dari JSCE, 2018b)

Aspek penyelidikan		Geomorfologi				Batuan atau Tanah												Struktur Geologi		Airtanah			Lain-lain					
		Relief (topografi, morfologi)	Proses geomorfologi	Penggunaan lahan	Deviasi tegangan in situ	Jenis	Sebaran	Kecepatan seismik	Sifat fisik	Mineral lempung	Sifat <i>slaking</i>	Absorpsi air dan laju <i>swelling</i>	Kuat tekan	Koefisien deformasi	Klasifikasi massa batuan	Diskontinuitas	Pelapukan atau alterasi	Tingkat konsolidasi	Sesar atau lipatan	Sebaran	Akuifer	Muka air tanah	Konduktivitas hidrolik	Aliran air tanah	Energi geotermal	Gas beracun	Logam berat	
Kondisi geologi teknik	Kondisi umum	Batuan keras atau agak keras	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		Batuan lunak	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Tanah	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	Kondisi khusus	Rembesan air berjumlah besar atau bertekanan tinggi	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Gerakan tanah	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Zona sesar atau lipatan	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Tanah tak terkonsolidasi	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		<i>Squeezing</i>	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Berpotensi <i>rock burst</i>	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		Geotermal, mata air panas, gas beracun, logam berat, dll.	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

Tabel 8 - Fenomena problematik dan informasi penting yang harus diinvestigasi pada lokasi konstruksi dengan kondisi geologi teknik khusus (modifikasi dari JSCE, 2018b; AGS(HK), 2005)

Kondisi geologi teknik khusus	Fenomena problematik	Informasi penting yang harus diinvestigasi
Lokasi pada zona rawan longsor	Peningkatan tegangan, tegangan tidak simetris, keruntuhan lereng, longsor tanah/ batuan	Geomorfologi, geologi, karakteristik kekuatan dan deformasi batuan/tanah, muka airtanah, sejarah longsor
Lokasi pada zona sesar dan/atau lipatan	Keruntuhan muka galian, <i>inflow</i> airtanah yang tidak terduga, kekeringan air permukaan karena rembesan airtanah, retakan dan deformasi lining dan invert akibat gempabumi	Karakteristik kekuatan dan deformasi batuan/tanah, kecepatan gelombang elastik, faktor kompetensi batuan, muka air tanah, distribusi dan karakteristik zona retakan/diskontinuitas, rekaman gempabumi, keaktifan sesar
Lokasi dengan material lepas, tidak terkonsolidasi, atau terkonsolidasi lemah	Keruntuhan muka galian, rantai terowongan tidak dapat dipertahankan, <i>outflow</i> massa	Karakteristik kekuatan dan deformasi batuan/tanah, densitas relatif tanah, distribusi ukuran butir tanah, muka airtanah,

Kondisi geologi teknik khusus	Fenomena problematik	Informasi penting yang harus diinvestigasi
	batuan/tanah, penurunan permukaan tanah, kekeringan air permukaan	tekanan air tanah, konduktivitas hidrolika/permeabilitas, jenis akuifer airtanah
Lokasi berpotensi mengalami batuan <i>squeezing</i>	Pengurangan penampang terowongan bagian dalam, deformasi sistem penyangga, deformasi terowongan dalam jangka panjang	Karakteristik kekuatan dan deformasi batuan/tanah, faktor kompetensi batuan, kandungan smektit, kandungan air alami, derajat keruntuhan akibat perendaman air
Lokasi berpotensi mengalami <i>rock burst</i>	Retakan batuan yang dipicu tegangan in situ, pengembangan (<i>bulking</i>) dinding dan atap galian, pengangkatan lantai galian/terowongan (<i>floor heave</i>), tegangan geser pada batuan, eaksi/lemparan blok batuan, dan keruntuhan muka galian yang dipicu seismik.	Karakteristik kekuatan dan deformasi batuan, <i>brittleness</i> , emisi akustik (AE)
Lokasi dengan topografi karst	Rembesan airtanah yang tidak terduga, kehadiran sungai bawah tanah, kekeringan air permukaan, <i>sinkhole</i>	Topografi, tingkat pelapukan batuan karbonat, pengkajian risiko rembesan airtanah, sifat fisik dan mekanik batuan, karakteristik airtanah dan air permukaan, uji SPT, survei geofisika (terutama <i>microgravity</i>), identifikasi ukuran rongga dan jenis material pengisi, uji kimia airtanah (pH, SO ₃ , Cl)
Lokasi geotermal, mata air panas, gas beracun, logam berat, dll.	Erupsi air bertekanan tinggi dan temperatur tinggi, gas beracun, pencucian logam berat, pembentukan air asam	Temperatur, konsentrasi gas, konsentrasi oksigen, konsentrasi logam berat pada mata air panas, pH
Lokasi dengan rembesan air berjumlah besar atau bertekanan tinggi	Peningkatan tegangan, tegangan tidak simetris, keruntuhan muka galian, kekeringan dan polusi air jika terjadi rembesan airtanah yang tidak terduga	Muka airtanah, debit, dan tegangan rembesan airtanah
Lokasi mengandung logam berat	Pencucian logam berat, pH rembesan airtanah, dan pencucian air dari <i>muck</i>	Distribusi lapisan pembawa logam berat, kandungan dan jumlah pencucian logam berat, pH rembesan airtanah, dan pencucian air dari <i>muck</i>

4.3.2 Kondisi lokasi dan geometri khusus

Informasi penting yang diinvestigasi pada pembangunan terowongan dengan kondisi lokasi dan geometri khusus ditampilkan pada Tabel 9.

Tabel 9 - Fenomena problematik dan informasi penting yang harus diinvestigasi dalam pembangunan terowongan dengan kondisi lokasi dan geometri khusus (modifikasi dari JSCE, 2018b)

Kondisi lokasi & geometri khusus		Fenomena problematik	Informasi penting yang harus diinvestigasi
Lokasi	Terowongan melalui area perkotaan atau berada di dekat konstruksi eksisting	Penurunan muka tanah, deformasi konstruksi sekitar, penurunan muka airtanah	Karakteristik kekuatan dan deformasi batuan/ tanah, permeabilitas batuan/ tanah, kondisi lokasi konstruksi sekitar
	Terowongan dengan <i>overburden tipis</i>	Penurunan muka tanah, keruntuhan, tegangan tanah tidak simetris	Kondisi geomorfologi termasuk potensi gerakan tanah, karakteristik kekuatan dan deformasi batuan/ tanah, permeabilitas batuan/ tanah, kondisi lokasi
	Terowongan dengan <i>overburden</i> sangat tebal	Tekanan rembesan airtanah tinggi, peningkatan tegangan batuan/tanah	Karakteristik kekuatan dan deformasi batuan/ tanah, permeabilitas, tekanan air, muka airtanah, tegangan in situ
	Terowongan di bawah air	Rembesan airtanah dalam jumlah besar	Karakteristik kekuatan dan deformasi batuan/ tanah, jumlah rembesan airtanah, permeabilitas, topografi dasar air
Geometri	Titik percabangan terowongan/profil melintang terowongan besar	Keruntuhan muka galian, deformasi	Karakteristik kekuatan dan deformasi batuan/ tanah, tegangan in situ

5 Metode penyelidikan geologi teknik

- a. Penyelidikan geologi teknik dalam pembangunan terowongan meliputi penyelidikan aspek geomorfologi, batuan dan tanah, struktur geologi, airtanah, dan geodinamika (aktivitas kegunungapian dan kegempaan). Secara umum, metode penyelidikan geologi teknik meliputi pemetaan (survei) lapangan, survei geofisika, pengeboran, uji lapangan, dan uji laboratorium.
- b. Untuk menganalisis kondisi geologi teknik, data hasil penyelidikan semua aspek geologi teknik yang relevan di lokasi konstruksi terowongan ditampilkan dalam suatu peta dan sayatan geologi teknik. Model geologi teknik 3 dimensi (3D) dalam bentuk fence diagram, isometric surface diagram, atau block diagram akan memberikan gambaran informasi kondisi geologi teknik lebih menyeluruh.
- c. Jenis-jenis peta geologi teknik dideskripsikan secara lengkap dalam IAEG (1976) dan Dearman (1981). Peta geologi teknik dapat dibedakan berdasarkan kegunaan, isi, dan skala. Peta geologi teknik untuk pembangunan terowongan dapat dibedakan menjadi

peta geologi teknik komprehensif, analitis, bantu, dan pelengkap. Peta geologi teknik komprehensif menampilkan informasi semua lingkungan geologi, sedangkan peta geologi teknik analitis atau tematik menampilkan detail atau evaluasi komponen-komponen tunggal lingkungan geologi (misalnya peta tingkat pelapukan, peta bahaya seismik). Peta geologi teknik bantu menampilkan data faktual (misalnya peta dokumentasi, peta struktur kontur), sedangkan peta geologi teknik pelengkap menampilkan data dasar (misalnya peta geomorfologi, peta geologi). Peta geologi teknik komprehensif umumnya dibuat dengan skala kecil ($\leq 1:100.000$) dan menengah ($< 1:10.000$ dan > 100.000), sedangkan peta geologi teknik analitis umumnya dibuat dengan skala menengah dan besar ($\geq 1:10.000$).

5.1 Penyelidikan geomorfologi

- d. Penyelidikan kondisi geomorfologi penting dilakukan dalam pembangunan terowongan karena fitur-fitur geomorfologi di permukaan bumi seringkali mencerminkan kondisi geologi, hidrologi, dan airtanah di permukaan dan bawah permukaan. Sebagai contoh, keberadaan gawir sesar, mata air, pola aliran sungai paralel dapat mengindikasikan keberadaan patahan atau sesar. Pada daerah dengan topografi karst banyak terbentuk rongga-rongga pada batuan di bawah permukaan akibat pelarutan. Penyelidikan geomorfologi juga dilakukan untuk memperkirakan ketebalan *overburden* dan deviasi tegangan in situ berdasarkan topografi lokasi pembangunan terowongan (Tabel 2).
- e. Skala sumber data dan informasi dan peta dasar yang digunakan dalam penyelidikan geomorfologi mengikuti skala penyelidikan tiap tahap pembangunan terowongan pada Tabel 2. Sumber data dan informasi yang dapat digunakan dalam penyelidikan geomorfologi di Indonesia disajikan dalam Tabel 10.
- f. Pada tahap Pra-Studi Kelayakan, identifikasi fitur-fitur geomorfologi beserta proses-proses geologi yang bekerja di area alternatif rute terowongan dilakukan berdasarkan analisis peta topografi, peta Rupa Bumi Indonesia, dan citra penginderaan jauh (foto udara, *Digital Elevation Model* DEM, *Digital Terrain Model* DTM, dan citra satelit). Fitur-fitur geomorfologi yang diidentifikasi meliputi fitur-fitur geomorfologi alami (topografi, morfologi atau bentuk lahan, pola penyaluran) dan buatan manusia (jalan, permukiman, dll). Proses-proses geologi yang diidentifikasi terutama proses-proses geologi di permukaan, antara lain pelarutan, erosi, gerakan tanah, dan likuifaksi.
- g. Dalam proses mengidentifikasi fitur-fitur geomorfologi, analisis kelurusan geomorfologi dilakukan untuk memperkirakan batas satuan batuan, pola penyaluran, zona lemah batuan terhadap erosi, atau struktur geologi regional di lokasi konstruksi terowongan dan sekitarnya. Analisis pola penyaluran digunakan untuk memperkirakan bentuk lahan

beserta proses-proses geomorfologi yang bekerja, topografi, kemiringan lereng, jenis batuan, dan struktur geologi di lokasi konstruksi terowongan dan sekitarnya. Ilustrasi pola penyaluran ditunjukkan pada Gambar 4, karakteristik dan kontrol geologi yang mempengaruhi bentuk pola penyaluran dijelaskan pada Tabel 11.

- h. Pada tahap pembangunan terowongan selanjutnya, hasil analisis fitur-fitur geomorfologi beserta proses-proses geologi yang bekerja harus dicek di lapangan melalui survei (pemetaan) geomorfologi.
- i. Hasil penyelidikan geomorfologi dituangkan dalam peta, sayatan, atau model tiga dimensi (3D) geomorfologi. Langkah-langkah penyusunan peta geomorfologi merujuk SNI 13-6185-1999 (BSN, 1999). Bentuk lahan di lokasi konstruksi terowongan diklasifikasikan berdasarkan klasifikasi yang telah dikembangkan, antara lain Lobeck (1939), van Zuidam (1985), atau Brahmantyo dan Bandono (2006).
- j. Hasil penyelidikan geomorfologi dikorelasikan dengan hasil penyelidikan aspek geologi teknik lain karena saling berhubungan. Fitur-fitur geomorfologi dan proses-proses geologi di permukaan juga dapat digambarkan pada peta geologi teknik komprehensif bersama dengan hasil penyelidikan aspek geologi teknik lain.

Tabel 10 - Sumber data sekunder kondisi geologi teknik di Indonesia (dirangkum dari berbagai sumber)

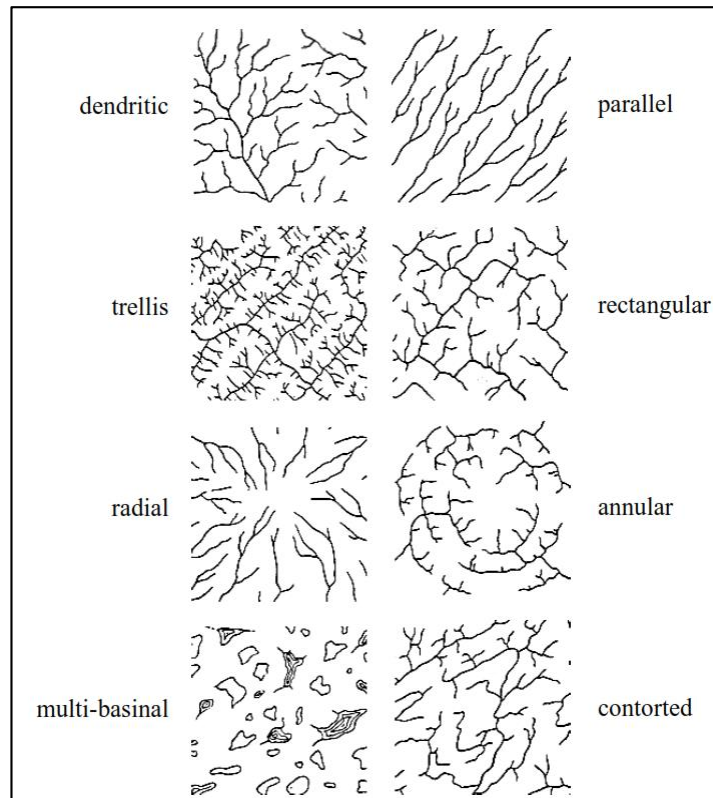
Agensi	Jenis Informasi	Deskripsi	Keterangan	Tautan
BIG (Badan Informasi Geospasial)	Peta Topografi	Skala 1:25.000 untuk area Jawa, Bali, NTB, NTT, selain itu berskala 1:50.000.	BIG adalah perubahan dari Bakosurtanal berdasarkan UU No. 4 tahun 2011 tentang Informasi Geospasial	https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/download/perwilayah
BIG (Badan Informasi Geospasial)	Peta DEMNAS	Data DEMNAS yang dirilis dipotong sesuai dengan Nomor Lembar Peta (NLP) skala 1:50k atau 1:25k, untuk setiap Pulau atau Kepulauan	Resolusi spasial DEMNAS adalah 0.27-arcsecond, dengan menggunakan datum vertikal EGM2008.	http://tides.big.go.id/DEMNAS/
BIG (Badan Informasi Geospasial)	Peta Batimetri Nasional	Sementara itu data BATNAS dibagi dalam blok dengan luas 5 derajat x 5 derajat	Resolusi spasial BATNAS adalah 6-arcsecond, dengan menggunakan datum vertikal EGM2008 dan MSL.	http://tides.big.go.id/DEMNAS/
BIG (Badan Informasi Geospasial)	Peta-peta lain	Peta-peta lain tersedia untuk setiap daerah di Indonesia, seperti peta airtanah, administrasi, lokasi tambang,	Ketersediaan data beragam antar daerah	https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/download/perwilayah

Agensi	Jenis Informasi	Deskripsi	Keterangan	Tautan
		infrastruktur, tata guna lahan, dll.		
Puslitbang Geologi ESDM	Peta Geologi Regional	Peta geologi regional berskala 1:100.000 untuk Pulau Jawa dan 1:250.000 untuk luar Pulau Jawa.	Peta Geologi seluruh Indonesia ini dibagi per pulau dan diberi nomor lembar serta nama lembar peta sesuai dengan yang ada di dalam Indeks Peta Geologi Seluruh Indonesia. Peta geologi regional sebelumnya dipublikasikan oleh Direktorat Geologi	http://www.info-geospasial.com/2015/06/peta-geologi-seluruh-indonesia.html
Bakosurtanal / BIG	Peta Rupa Bumi Indonesia	Peta RBI skala 1:25.000, menunjukkan tata guna lahan, infrastruktur, topografi, dan perairan.	Dibuat berdasarkan kompilasi foto udara skala 1:50.000 secara fotogrametri	http://www.info-geospasial.com/2015/06/peta-rbi-seluruh-indonesia.html
ESDM	Peta Geologi	Terdapat peta-peta digital yang berkaitan dengan kegeologian, sumberdaya geologi, dan kebencanaan untuk seluruh Indonesia, skala tidak diketahui	Merupakan hasil program ESDM One Map untuk membantu kementerian ESDM dan pemangku kepentingan terkait	https://geoportal.esdm.go.id/
ESDM	Peta Sumberdaya Geologi (Minerba dan Minyak dan Gas Bumi)			
ESDM	Peta Kebencanaan (KRB Gunungapi, KRB Gempabumi, Kerentanan Gerakan Tanah, Tsunami, Likuifaksi)			
KLHK (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan)	Peta Geomorfologi Regional (disebut Peta Ekoregion)	Peta Ekoregion Indonesia berskala 1:500.000, terbagi menjadi beberapa lembar peta	Peta ekoregion adalah peta geomorfologi regional yang disusun berdasarkan konsep morfologi dan morfogenesis. Penamaan satuan didasarkan pada karakteristik geomorfologi dominan yang dikombinasikan dengan nama kawasan hutan setempat.	http://webgis.dephut.go.id:8080/kemenhut/index.php/id/peta/peta-cetak/59-peta-cetak/328-peta-ekoregion-indonesia
KLHK (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan)	Peta Lingkungan	Tersedia berbagai macam peta yang menunjukkan informasi lingkungan hidup dan kehutanan secara lengkap, seperti kawasan hutan, tata	Tersedia dalam bentuk peta interaktif dan peta cetak yang bisa diunduh dan mencakup seluruh Indonesia.	http://webgis.dephut.go.id:8080/kemenhut/index.php/id/peta/peta-interaktif

Agensi	Jenis Informasi	Deskripsi	Keterangan	Tautan
		guna lahan, batas DAS, zona konservasi, dll. Skala yang tersedia beragam, umumnya berskala regional (lebih kecil dari 1:100.000)		
Pusat Studi Gempa Nasional Kementerian PUPR	Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia 2017	Tersedia berbagai macam peta yang menunjukkan informasi zona sumber gempa dengan probabilitas dalam rentang waktu 5 sampai 100 tahun berskala nasional (1:12.500.000)	Peta ini hasil pemutakhiran Peta Gempa Tahun 2010. Penyusunan pembaharuan Peta Gempa 2017 mengacu konsep <i>Probabilistic Seismic Hazard Analysis</i> (PSHA) dan <i>Deterministic Seismic Hazard Analysis</i> (DSHA) dengan menggunakan semua data dan informasi serta metode terkini untuk wilayah Indonesia, Peta ini disusun oleh PuSGeN (Pusat Studi Gempa Nasional) Kementerian PUPR bekerjasama dengan : BNPB, BMKG, Badan Geologi, LIPI, BIG, BPPT, ITB, dan UGM.	http://litbang.pu.go.id/puskim/page/detail/42/peta-sumber-dan-bahaya-gempa-2017/produk
Pusat Survei Geologi	Peta Geologi Interpretasi Indraja	Data Peta Geologi yang dirilis dipotong sesuai dengan Nomor Lembar Peta (NLP) Skala 1:50.000 untuk setiap Pulau atau kepulauan	Peta ini disusun atas kerjasama antar Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Badan Geologi, Ikatan Ahli Geologi Indonesia, Himpunan Ahli Geofisika Indonesia dan <i>GSi Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia</i> .	https://psg.bgl.esdm.go.id/geomap/#7/-9.333/140.128
Pusat Survei Geologi	Peta Geologi Inderaan jauh	Data Peta untuk Pulau Jawa, Kalimantan dan Irian Jaya Skala 1:50.000 untuk setiap Pulau.		https://psg.bgl.esdm.go.id/geomap/#5/-5.288/129.924
Pusat Survei Geologi	Peta Geologi	Data Peta untuk Pulau Jawa, Kalimantan dan Irian Jaya Skala 1:50.000 untuk setiap Pulau.		https://psg.bgl.esdm.go.id/geomap/#5/-6.075/122.849
Pusat Survei Geologi	Peta Magnetik	Data peta untuk Irian Jaya dengan skala 1:100.000		https://psg.bgl.esdm.go.id/geomap/#5/-6.075/122.850

Agensi	Jenis Informasi	Deskripsi	Keterangan	Tautan
Pusat Survei Geologi	Peta Thorium	Data peta untuk Irian Jaya dengan skala 1:100.000		https://psg.bgl.esdm.go.id/geomap/#5/-6.075/122.851
Pusat Survei Geologi	Peta Uranium	Data peta untuk Irian Jaya dengan skala 1:100.000		https://psg.bgl.esdm.go.id/geomap/#5/-6.075/122.852
Pusat Survei Geologi	Peta Potassium	Data peta untuk Irian Jaya dengan skala 1:100.000		https://psg.bgl.esdm.go.id/geomap/#5/-6.075/122.853
Pusat Survei Geologi	Peta Geologi Kuarter	Data peta untuk sebagian Pulau Jawa, Kalimantan dan Sumatera Skala 1:50.000 & 1:100.000		https://psg.bgl.esdm.go.id/geomap/#5/-6.075/122.854
Pusat Survei Geologi	Peta Seismotektonik	Data peta untuk sebagian Pulau Jawa, Sulawesi, Irian Jaya dan Sumatera Skala 1:50.000 & 1:100.000		https://psg.bgl.esdm.go.id/geomap/#5/-6.075/122.855
Pusat Survei Geologi	Peta Geomorfologi	Data peta untuk sebagian Pulau Jawa, Sulawesi, Kalimantan, Irian Jaya dan Sumatera Skala 1:50.000 & 1:100.001		https://psg.bgl.esdm.go.id/geomap/#5/-6.075/122.856
Direktorat Geologi Tata Lingkungan	Peta Hidrogeologi Indonesia	Peta Hidrogeologi meliputi aspek air bawah tanah dan kondisi geologi regional indonesia dengan skala 1:250.000 (peta berwarna dimensi 46cm x 46cm)	Peta ini disusun oleh Direktorat Geologi Tata Lingkungan	https://opac.perpusnas.go.id/DetailOpac.aspx?id=888835
NASA	<i>Multiband Imagery : Corrected reflectance, surface reflectance, radiance, earth at night</i>	Data citra dengan resolusi citra 31,25m-250m, resolusi sensor 30m-750m dengan temporal range dan bands yang beragam	Data termasuk kedalam produk citra dari Global Imagery Browse Services (GIBS). GIBS imagery archive memiliki kurang lebih 900 imagery products yang mewakili visualisasi data ilmiah dari NASA Earth	Informasi cara mengakses produk GIBS https://wiki.earthdata.nasa.gov/display/GIBS/GIBS+API+for+Developers
NASA	<i>Digital Elevation Model</i>	Data DEM dengan instrumen ASTER dan STS-99, Resolusi citra 31,25m, resolusi sensor 30m.	Observing System Data and Information System (EOSDIS). GIBS didesain untuk menampilkan global full resolution satellite imagery kepada pengguna dengan cara yang sangat responsif dan memungkinkan	Infomasi produk citra GIBS yang tersedia https://wiki.earthdata.nasa.gov/display/GIBS/GIBS+Available+Imagery+Products#expand-CorrectedReflectance17Products
NASA	<i>Land Cover</i>	Data Land cover dengan resolusi citra 200m-10km dan		

Agensi	Jenis Informasi	Deskripsi	Keterangan	Tautan
NASA		resolusi sensor 500m, dan temporal range beragam	eksplorasi interaktif terhadap bumi	
	<i>Land Surface Temperature</i>	Data suhu permukaan darat dengan resolusi citra 1km, resolusi sensor 1km, dan temporal range beragam		
	<i>Soil Moisture</i>	Data soil moisture dengan resolusi citra 2km, resolusi sensor 1°, 3km-36km dan temporal range beragam		
NASA	<i>Surface Pressure</i>	Data tekanan permukaan bulanan dengan resolusi citra 2 km, resolusi sensor 0.625° × 0.5° dan kisaran temporal 1980 hingga masa kini		
LAPAN	Data Penginderaan Jauh : Mosaik Landsat, SPOT, Pleiades dan TerraSAR-X	Data penginderaan jauh ditampilkan dalam platform berupa SPACeMAP (Sistem Penyajian Data Penginderaan Jauh Yang Cepat, Mudah, Aman, dan Populer) untuk mempermudah pengguna mengakses data penginderaan jauh yang dimiliki LAPAN	Pustekdata LAPAN menyediakan beberapa instances/portal SPACeMAP untuk Kementerian/Lembaga dan Pemerintah Provinsi. Untuk mengakses ketersediaan data mosaik dengan mengunjungi masing-masing portal. User dapat menggunakan fitur OGC (<i>Open Geospatial Consortium</i>) untuk menarik service WMS (<i>Web Map Service</i>) sehingga data dapat dimanfaatkan secara <i>online</i> . Untuk melakukan pengunduhan data, dibutuhkan <i>username</i> dan <i>password</i> yang dapat diperoleh melalui permintaan ke Pustekdata LAPAN	Akses portal SPACeMAP pada : http://spacemap.lapan.go.id/
			Petunjuk penggunaan portal SPACeMAP : http://spacemap.lapan.go.id/files/tutorial-spacemap.pdf	



Gambar 4 - Pola penyaluran sungai dasar (Howard, 1967)

Tabel 11 - Pola penyaluran dasar serta karakteristik dan kondisi geologi yang mempengaruhinya (modifikasi dari Morisawa, 1985)

Pola peyaluran dasar	Karakteristik dan kontrol geologi
Dendritik	Perlapisan batuan sedimen relatif datar atau batuan kristalin yang tidak seragam dan relatif tahan terhadap pelapukan. Secara regional, daerah aliran memiliki kemiringan landai, jenis pola pengaliran membentuk percabangan menyebar seperti pohon.
Paralel	Pada umumnya menunjukkan daerah yang berlereng sedang sampai agak curam dan dapat ditemukan pula pada daerah perbukitan yang memanjang. Sering terjadi pola peralihan antara pola dendritik dan paralel atau trellis. Bentuklahan perbukitan yang memanjang dengan pola pengaliran paralel mencerminkan perbukitan tersebut dipengaruhi oleh perlipatan.
Trellis	Batuan sedimen yang memiliki kemiringan perlapisan atau terlipat, batuan vulkanik, atau batuan metasedimen derajat rendah dengan perbedaan pelapukan yang jelas. Jenis pola pengaliran biasanya berhadapan pada sisi sepanjang aliran subsekuen.
Rektangular	Kekar dan/atau sesar yang memiliki sudut kemiringan, tidak memiliki perulangan lapisan batuan dan sering memperlihatkan pola pengaliran yang tidak menerus.

Pola peyaluran dasar	Karakteristik dan kontrol geologi
Radial	Daerah vulkanik, kerucut (kubah) intrusi dan sisa-sisa erosi. Pola pengaliran radial pada daerah vulkanik disebut sebagai pola pengaliran multi-radial. Pola pengaliran radial memiliki 2 sistem, yaitu sistem sentrifugal (menyebar ke luar dari titik pusat), berarti bahwa daerah tersebut berbentuk kubah atau kerucut, sedangkan sistem sentripetal (mengalir menuju titik pusat) memiliki arti bahwa daerah tersebut berbentuk cekungan.
Annular	Struktur kubah/kerucut, cekungan dan kemungkinan retas (<i>stocks</i>)
Multibasinal	Terdapat pada daerah perbedaan penggerusan batuan dasar, daerah gerakan tanah, vulkanisme, pelarutan gamping (area yang mengalami karstifikasi), dan lelehan salju (<i>permafrost</i>)

5.2 Penyelidikan batuan dan tanah

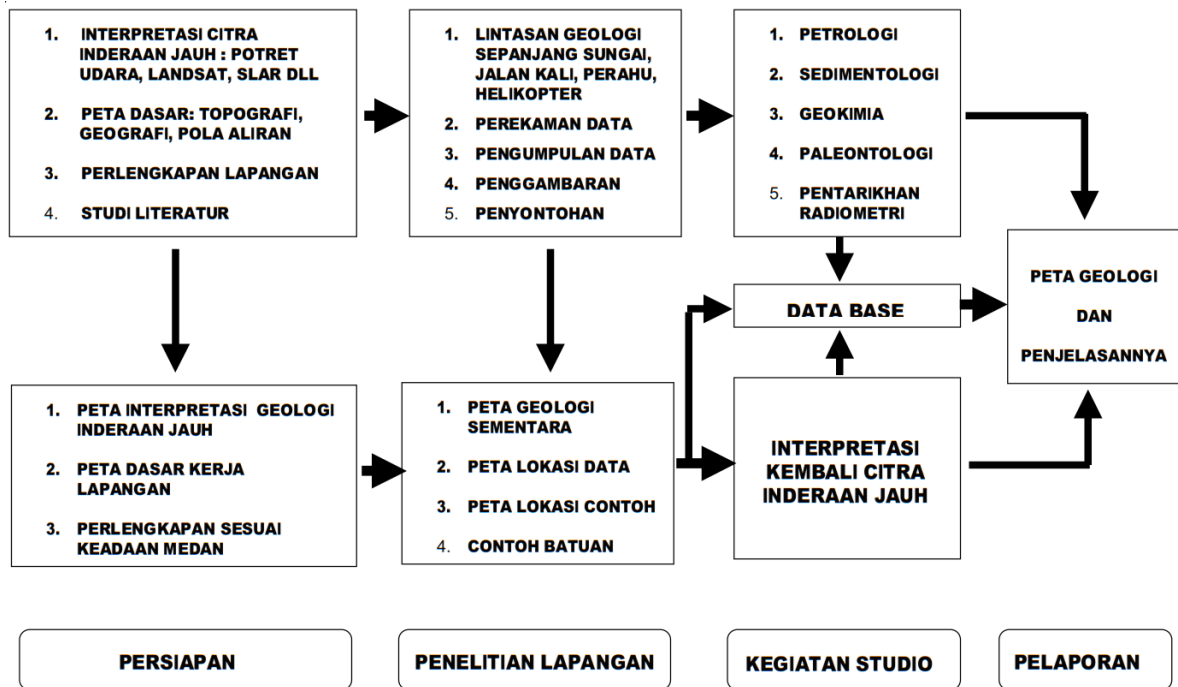
- a. Penyelidikan batuan dan tanah meliputi penyelidikan kondisi batuan dan tanah di permukaan dan bawah permukaan. Penyelidikan batuan dan tanah dilakukan melalui pemetaan geologi dan karakteristik geologi teknik batuan dan tanah di permukaan dan bawah permukaan (muka galian terowongan), survei geofisika (di dalam dan luar lubang bor), pengeboran inti (sepanjang trase dan muka galian terowongan), dan uji in situ (di dalam dan luar lubang bor), dan uji laboratorium.
- b. Pada tahap Pra-Studi Kelayakan, penyelidikan batuan dan tanah dilakukan melalui studi pustaka kondisi batuan dan tanah di area alternatif rute terowongan dari dokumen eksisting, bisa berupa peta-peta, publikasi, rekaman investigasi proyek lain yang dekat, dan dokumen lain. Analisis peta geologi regional dipadukan dengan analisis geomorfologi (Bagian 5.1) dilakukan untuk memberikan gambaran umum kondisi batuan dan tanah di area alternatif rute terowongan.
- c. Pada tahap Studi Kelayakan hingga Konstruksi, pemetaan geologi dan geologi teknik di permukaan dan muka galian terowongan, survei geofisika, pengeboran inti, uji in situ, dan uji laboratorium dilakukan untuk memverifikasi hasil studi pustaka sehingga diperoleh gambaran kondisi batuan dan tanah lebih baik. Skala dan jumlah penyelidikan semakin detil seiring dengan dengan kemajuan tahap pembangunan terowongan (Tabel 2).
- d. Survei geofisika dan pengeboran inti dilakukan untuk mengetahui jenis, urutan pembentukan, dan sebaran batuan di bawah permukaan. Metode penyelidikan batuan melalui survei geofisika dijelaskan pada Bagian 5.2.3, sedangkan pengeboran inti dijelaskan pada Bagian 5.2.3.2. Lokasi survei geofisika dan pengeboran inti harus didasarkan pada hasil pemetaan geologi permukaan.

5.2.1 Pemetaan geologi

- a. Keterbatasan akurasi hasil survei geofisika dan jumlah titik pengeboran inti seringkali menyulitkan korelasi batuan antar lubang bor. Pemetaan geologi permukaan dapat membantu dalam memahami kondisi geologi bawah permukaan secara menyeluruh.
- b. Pemetaan geologi dilakukan untuk memetakan jenis, urutan pembentukan, dan sebaran batuan dan struktur geologi di permukaan dan bawah permukaan (muka galian terowongan). Metode penyelidikan struktur geologi melalui pemetaan geologi dijelaskan dalam Bagian 5.3.
- c. Tahapan penyelidikan batuan melalui pemetaan geologi permukaan mengacu pada diagram alir dalam Gambar 5 dan dijelaskan dalam SNI 13-4691-1998 (BSN, 1998). Metode pemetaan geologi permukaan mengikuti skala peta yang akan disusun (Tabel 12). Skala pemetaan geologi permukaan mengikuti skala penyelidikan tiap tahap pembangunan terowongan pada Tabel 2.
- d. Pada tahap Pra-Studi Kelayakan, penyelidikan batuan melalui pemetaan geologi permukaan dilakukan melalui studi pustaka dan interpretasi kondisi batuan menggunakan citra penginderaan jauh. Hal ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut.
 - 1) Dokumen yang mengandung informasi mengenai jenis, urutan pembentukan, dan sebaran batuan di lokasi konstruksi dikumpulkan dan dikaji. Informasi dapat berasal dari peta geologi regional, laporan pekerjaan konstruksi terdahulu di sekitar lokasi, publikasi, maupun dokumen lain (Tabel 10).
 - 2) Selanjutnya, interpretasi jenis dan sebaran batuan dilakukan menggunakan citra penginderaan jauh berdasarkan analisis bentuk lahan, kelurusan lembah, dan pola pengaliran sungai, sebagaimana dijelaskan dalam Bagian 5.1. Dalam beberapa kondisi, orientasi (jurus dan kemiringan) lapisan batuan juga dapat diperkirakan melalui analisis citra penginderaan jauh untuk menentukan urutan pembentukan batuan.
 - 3) Jenis, urutan pembentukan, dan sebaran batuan yang diinterpretasikan melalui studi pustaka dan analisis citra penginderaan jauh digambarkan dalam suatu peta geologi tentatif dan selanjutnya dikonfirmasi kebenarannya secara langsung dalam pemetaan geologi permukaan di lapangan.
- e. Pada tahap Studi Kelayakan hingga Konstruksi, penyelidikan batuan melalui pemetaan geologi permukaan dan bawah permukaan (muka galian terowongan) dilakukan dengan ketentuan sebagai berikut.
 - 1) Pemetaan geologi permukaan meliputi pengamatan singkapan batuan di permukaan dan dekat permukaan dan uji laboratorium sampel batuan. Pengamatan singkapan

batuan meliputi identifikasi jenis dan urutan pembentukan batuan, penentuan sebaran lateral dan ketebalan batuan, dan pengukuran orientasi (jurus dan kemiringan) stuktur batuan (perlapisan pada batuan sedimen dan foliasi pada batuan metamorf). Pada beberapa kondisi yang tidak memungkinkan pengamatan singkapan batuan di permukaan, pembuatan parit uji dan pemetaan geologi pada dinding parit uji harus dilakukan.

- 2) Uji batuan di laboratorium meliputi jenis mineral dan kandungan kimia mineral penyusun batuan dan penentuan umur batuan. Uji mineralogi (petrografi, XRD, dan SEM) (Tabel 3) dan geokimia (XRF) dilakukan untuk membantu penamaan batuan dan penentuan batas satuan geologi (litologi) jika sulit dilakukan melalui pengamatan singkapan. Penentuan umur relatif batuan dilakukan melalui analisis paleontologi berdasarkan pengamatan fosil. Penentuan umur absolut batuan (endapan Kwartar) dilakukan menggunakan metode radiometri, diantaranya bagi penyelidikan paleoseismik (Bagian 5.3).
 - 3) Penamaan batuan merujuk pada klasifikasi dasar batuan yang persyaratkan dalam SNI 2436:2008 (BSN, 2008) diperlihatkan pada Gambar 6 hingga Gambar 8. Penggunaan klasifikasi batuan lain diperkenankan untuk kebutuhan penyelidikan lebih rinci melalui pengamatan petrografi, misalnya klasifikasi batuan piroklastik berukuran halus (abu) dapat merujuk pada klasifikasi Pettijohn (1975). Penamaan batuan metamorf secara lengkap merujuk pada klasifikasi yang diusulkan oleh IUGS-SCMR (2011).
- f. Hasil pemetaan geologi permukaan dituangkan dalam peta geologi, sayatan geologi, atau model geologi 3 dimensi (3D). Penyusunan peta geologi dijelaskan pada SNI 13-4691-1998 (BSN, 1998). Sayatan geologi atau model geologi 3D disusun berdasarkan analisis hasil pemetaan geologi permukaan, survei geofisika (Bagian 5.2.3), dan pengeboran inti (5.2.3.2) akan memberikan gambaran kondisi geologi bawah permukaan, termasuk kondisi geologi pada elevasi terowongan, secara menyeluruh. Penamaan satuan geologi (litologi) pada peta geologi mengikuti skala penyelidikan sebagaimana dijelaskan dalam Sandi Statigrafi Indonesia (IAGI, 1996).
- g. Pada tahap Konstruksi, pemetaan geologi bawah permukaan pada muka galian terowongan dilakukan untuk memeriksa interpretasi kondisi geologi yang dihasilkan berdasarkan pemetaan geologi permukaan, survei geofisika, dan pengeboran inti dan untuk memprediksi kondisi geologi di depan muka galian. Perbedaan kondisi geologi yang diamati dalam pemetaan muka galian dan interpretasi sebelumnya memungkinkan perubahan desain metode penggalian dan sistem penyangga terowongan.



Gambar 5 - Tahapan kerja kegiatan pemetaan geologi berdasarkan SNI 13-4691-1998 (BSN, 1998)

Tabel 12 - Perbandingan antar metode pemetaan geologi (JICA, 2018)

Metode pemetaan	Skala ideal	Indikasi	Kelebihan	Kekurangan
Langkah dan kompas	1:100-1:1.000	Peta prospek kasar. Pengisian di antara titik survei	Cepat, tidak membutuhkan pendampingan, membutuhkan peralatan yang sederhana	Akurasi survei buruk, terutama pada medan yang tidak seragam
Pita ukur dan kompas	1:100-1:1.000	Peta prospek rinci. Peta lintasan linier.	Cepat, akurasi baik, tidak butuh persiapan	Membutuhkan pendampingan, lambat untuk area ekuidimensional
Grid patok	1:500-1:2.500	Peta yang rinci dari prospek lokasi yang sudah ditentukan	Akurasi survei sedang, relatif cepat. Kontrol grid yang sama berkorelasi pada seluruh tahap eksplorasi	Mahal, membutuhkan persiapan sebelumnya, kontrol survei buruk pada medan dengan vegetasi lebat atau medan berbukit

Metode pemetaan	Skala ideal	Indikasi	Kelebihan	Kekurangan
Plane table	1:50-1:1.000	Pemetaan prospek yang rinci pada area dengan geologi kompleks.	Akurasi survei tinggi, tidak membutuhkan persiapan medan	Lambat, membutuhkan pendampingan, pemetaan geologi dan survei menjadi langkah yang terpisah
GPS dan DGPS	1:5.000-1:25.000	Pemetaan regional dan semi-regional. Pemetaan prospek awal.	Cepat, data survei digital mudah diunduh. Data cadangan yang bagus untuk teknik pemetaan lain dengan skala serupa	Cenderung menganggap pemetaan geologi sebagai pengumpulan data titik
Lembar peta dasar topografi	1:2.500-1:100.000	Pemetaan regional dan <i>reconnaissance</i> . Area-area dengan topografi curam. Sebagai dasar untuk <i>plotting</i> observasi GPS	Peta dasar yang akurat dan tergeoreferensi, menunjukkan kontur elevasi	Ketepatan lokasi sulit. Detil peta yang tidak relevan mengaburkan kondisi geologi. Tidak tersedia secara umum dalam skala besar
Pencitraan reflektansi penginderaan jauh	1:500-1:100.000	Pilihan yang baik, dasar pemetaan geologi yang ideal pada semua skala	Interpretasi geologi secara langsung dari citra, stereoplot, lokasi fitur mudah ditentukan	Distorsi skala (pada foto udara). Mahal jika survei baru perlu dilakukan

KELOMPOK GENESA			BEKU				
STRUKTUR UMUM			MASIF				
KOMPOSISI			Mineral terang : kwarsa, feldpar, mika		Mineral terang dan gelap	Mineral gelap	
			Asam	Menengah	Basa	Ultra basa	
UKURAN BUTIR (mm)	60	Berbutir sangat kasar	PEGMATIT				PIROKSENIT dan PERIDOTIT
		Berbutir kasar	GRANIT	DIORIT	GABRO		
	2	Berbutir sedang	GRANIT MIKRO	DIORIT MIKRO	DOLERIT		
		Berbutir halus	RIOLIT	ANDESIT	BASALT		
	0,06	Berbutir sangat halus					
	0,002						
Gelas Amorf			OBSIDIAN dan PITHSTONE		TAKILIT		
GELAS VULKANIK							

Gambar 6 – Klasifikasi batuan beku dalam SNI 2436:2008

KELOMPOK GENESA		SEDIMEN BAHAN ROMBAKAN				PIROKLASTIK	KIMIA/ORGANIK	
STRUKTUR UMUM		BERLAPIS						
KOMPOSISI		Butiran batu, kwarsa, feldpar dan mineral lempung			Butiran karbonat > 50%	Butiran batuan batu berbutir halus > 50%		
UKURAN BUTIR (mm)	60	Berbutir sangat kasar	Butiran berasal dari pecahan batuan			KALSI-RUDIT	Butiran membundar AGLOMERAT	GARAM GIP BATU-GAMPING DOLOMIT RIJANG
			Butiran membundar KONGLOMERAT					
	20	Berbutir kasar	Butiran menyudut BREKSI			KALKARENIT	Butiran menyudut BREKSI VOLKANIK TUF LAPILI:	
		Berbutir sedang	Butiran terutama berasal dari pecahan mineral BATU PASIR KWARSA : ARKASE 95% kwarsa 75% kwarsa 25 felepar GREWAKE 75% kwarsa 15% bahan rombakan batu dan felspar					
	0,06	Berbutir halus	BATU LANAU 50% partikel berbutir halus	BATU LUMPUR	NAPAL	KALSI SILTIT	TUFA BERBUTIR HALUS	
	0,002	Berbutir sangat halus	BATU LEMPUNG 50% partikel berbutir sangat halus	Serpih batu lumpur menyerpih				
Gelas Amorf							BATU-BARA	

Gambar 7 - Klasifikasi batuan sedimen dalam SNI 2436:2008.

KELOMPOK GENESA			MALIHAN		
STRUKTUR UMUM			BERFOLIASI	MASIF	
KOMPOSISI			Kwarsa, feldspar, mika, mineral gelap menjarum		
UKURAN BUTIR (mm)	60	Berbutir sangat kasar	GENES selang seling lapisan mineral berbutir dan berlembar	GENES MARMER GRANULIT	
		Berbutir kasar			
	2	Berbutir sedang	MIGMATIT SEKIS SERPENTINITIT	KWARSIT HORNFELS AMFIBOLIT	
		0,06	Berbutir halus		FILIT SABAK
			0,002		

Gambar 8 - Klasifikasi batuan metamorf dalam SNI 2436:2008

5.2.2 Pemetaan karakteristik geologi teknik batuan dan tanah

Pemetaan karakteristik geologi teknik batuan dan tanah dilakukan untuk mengkuantifikasi data dan informasi batuan dan tanah (atau endapan) yang diperoleh dalam pemetaan geologi. Pemetaan karakteristik geologi teknik batuan dan tanah meliputi pemetaan sifat, klasifikasi, atau perilaku keteknikan batuan dan tanah di permukaan dan di bawah permukaan.

- a. Data jenis dan karakteristik geologi teknik batuan dan tanah hasil pemetaan geologi dan karakteristik geologi teknik batuan dan tanah permukaan dan bawah permukaan, survei geofisika, pengujian in-situ batuan dan tanah, dan pengujian laboratorium sampel batuan dan tanah secara khusus disusun menjadi peta, sayatan, atau model 3D geologi teknik batuan dan tanah. Penyusunan peta geologi teknik batuan dan tanah mengacu pada SNI 03-2849-1992.
- b. Penentuan satuan geologi teknik pada peta geologi teknik batuan dan tanah mengikuti skala penyelidikan (IAEG, 1976; Dearman, 1991):
 - 1) Engineering type (ET): penamaan satuan ini digunakan pada peta geologi teknik berskala >1:5.000. Pada kondisi yang sangat detil, peta atau skema yang menunjukkan muka ekskavasi pada terowongan dapat ditunjukkan. ET adalah subdivisi dalam LT yang memiliki fisik yang seragam. Perbedaan satuan ET dapat didasarkan pada tingkat pelapukan batuan, pola dan frekuensi diskontinuitas, kekuatan batuan atau tanah, atau konsistensi tanah. Penentuan satuan didasarkan karakter fisik dan mekanika batuan atau tanah.
 - 2) Lithological type (LT): penamaan satuan ini digunakan pada peta geologi teknik berskala 1:5.000 – 1:10.000. Satuan ini dibagi berdasarkan homogenitas komposisi mineralogi, tekstur, dan struktur. Perbedaan antar satuan LT didasarkan pada

- pengamatan petrografi. Karakter satuan ditentukan dari pengeboran, pengambilan sampel, survei geofisika, pengujian in situ, pengujian laboratorium sistematis.
- 3) Engineering formation (EF): penamaan satuan ini digunakan pada peta geologi teknik berskala 1:10.000 – 1:200.000. Satuan ini dibagi berdasarkan kesamaan genetis litologi yang terbentuk pada kondisi paleogeografi dan geotektonik tertentu. Dengan demikian, maka tidak mungkin dapat ditunjukkan sifat fisik dan mekanika dari satu formasi, tetapi hanya data jenis litologi penyusun atau perilaku umum suatu formasi. Karakter satuan ditentukan dari pengeboran, pengambilan sampel, survei geofisika dan pengamatan petrografis, pengujian laboratorium untuk sifat indeks.
 - 4) Engineering group (EG): penamaan satuan ini digunakan pada peta geologi teknik berskala < 1:200.000. Tiap EG terdiri dari banyak EF yang terbentuk dalam kondisi paleogeografi dan tektonik yang cenderung mirip. Tiap EG memiliki karakteristik litologi tertentu yang membedakan dengan EG lain. Delineasi satuan peta dilakukan dari kajian peta geologi eksisting, survei reconnaissance, foto udara. Satuan peta ditentukan dari evaluasi data sekunder/studi pustaka.
- c. Pada tahap Pra-Studi Kelayakan, penyelidikan dilakukan pada skala 1:50.000-1:10.000. Pemetaan karakteristik geologi teknik batuan dan tanah permukaan dilakukan melalui studi pustaka dan interpretasi kondisi batuan menggunakan citra penginderaan jauh. Hal ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut.
- 1) Dokumen yang mengandung informasi mengenai karakteristik geologi teknik batuan dan tanah di lokasi konstruksi dikumpulkan dan dikaji. Informasi dapat berasal dari peta geologi teknik batuan dan tanah regional, laporan pekerjaan konstruksi terdahulu di sekitar lokasi, publikasi, maupun dokumen lain (Tabel 10).
 - 2) Selanjutnya, karakteristik massa batuan, terutama intensitas diskontinuitas batuan, diperkirakan melalui interpretasi citra penginderaan jauh, antara lain berdasarkan analisis bentuk lahan, kelurusan lembah, dan pola pengaliran sungai (Bagian 5.1).
 - 3) Jenis dan karakteristik geologi teknik batuan dan tanah yang diinterpretasikan melalui studi pustaka dan analisis citra penginderaan jauh digambarkan dalam suatu peta geologi teknik batuan dan tanah tentatif dan selanjutnya dikonfirmasi kebenarannya secara langsung dan lebih detail dalam pemetaan geologi teknik batuan dan tanah permukaan di lapangan pada tahap pembangunan selanjutnya.
 - 4) Mengacu pada aturan penentuan satuan geologi teknik batuan dan tanah (Poin b), peta geologi teknik batuan dan tanah yang disusun pada tahap ini berisi data jenis litologi penyusun formasi batuan dan perilaku geologi teknik formasi batuan secara umum.

- d. Pada tahap Studi Kelayakan hingga Konstruksi, pemetaan karakteristik geologi teknik dilakukan pada batuan dan tanah di permukaan dan bawah permukaan (muka galian terowongan) dilakukan dengan ketentuan sebagai berikut.
- 1) Pada tahap Studi Kelayakan, pemetaan karakteristik geologi teknik batuan dan tanah permukaan berskala 1:5.000 – 1:10.000 dilakukan di sepanjang rute terowongan dan dilakukan sebagai bagian dari pemetaan geologi teknik terutama untuk menganalisis kondisi khusus, diantaranya bahaya penurunan tanah dan likuifaksi. Mengacu pada aturan penentuan satuan geologi teknik batuan dan tanah (Poin b), peta geologi teknik batuan dan tanah yang disusun pada tahap ini berisi data jenis litologi penyusun formasi batuan dan perilaku geologi teknik formasi batuan secara umum. Pada zona dengan kondisi khusus di sepanjang rute terowongan dan portal terowongan, pemetaan jenis dan karakteristik geologi teknik batuan dan tanah permukaan lebih rinci (berskala 1:5.000-1:1.000) harus dilakukan.
 - 2) Pada tahap Rencana Teknik Awal dan Akhir, pemetaan karakteristik geologi teknik batuan dan tanah permukaan berskala 1:>5.000 terutama dilakukan di area rencana portal terowongan dan dilakukan sebagai bagian dalam pemetaan geologi teknik bagi perancangan lereng portal terowongan. Pemetaan jenis dan karakteristik geologi teknik batuan dan tanah bawah permukaan hasil survei geofisika dan pengujian in-situ di sepanjang terowongan digambarkan dalam sayatan geologi teknik batuan dan tanah.
 - 3) Pemetaan karakteristik geologi teknik batuan dan tanah permukaan meliputi pengamatan sifat dan klasifikasi keteknikan singkapan batuan dan tanah di permukaan dan dekat permukaan dan uji laboratorium. Pada beberapa kondisi yang tidak memungkinkan pengamatan singkapan batuan di permukaan, pembuatan parit uji dan pemetaan karakteristik geologi teknik batuan pada dinding parit uji harus dilakukan.
 - 4) Pemetaan karakteristik geologi teknik batuan diantaranya pengamatan dan pengujian tingkat pelapukan, kekuatan batuan utuh, karakteristik diskontinuitas batuan, dan berbagai parameter lain dalam klasifikasi massa batuan (Bagian 5.2.3). Pengamatan karakteristik geologi teknik tanah, meliputi inspeksi visual konsistensi dan sifat mekanika tanah, mengacu pada SNI 6371:2015 dan SNI 8460:2017.
 - 5) Selain secara visual dengan mengacu pada Tabel 13, batuan dan tanah juga dapat dibedakan berdasarkan kuat tekan uniaksial (UCS) dengan mengacu pada Tabel 14.
 - 6) Dalam penyelidikan sifat dan klasifikasi keteknikan batuan, batuan harus dibedakan menjadi batuan utuh (intact rock) dan massa batuan (rock mass). Massa batuan terdiri dari batuan utuh dan diskontinuitas (discontinuity). Diskontinuitas batuan terbentuk karena proses-proses geologi, seperti proses sedimentasi, metamorfisme, dan

tektonik. Contoh diskontinuitas batuan adalah batas litologi, perlapisan pada batuan sedimen, foliasi pada batuan metamorf, kekar, sesar, dan perlipatan.

- 7) Tingkat pelapukan batuan dideskripsikan sesuai prosedur yang direkomendasikan oleh ISRM (1981) (Tabel 13).
 - 8) Deskripsi karakteristik diskontinuitas batuan, antara lain orientasi, spasi, kemenerusan, kekasaran, kekuatan, apertur, material pengisi, rembesan airtanah, dan jumlah pasangan diskontinuitas mengacu pada prosedur yang direkomendasikan ISRM (1981).
 - 9) Beberapa klasifikasi keteknikan massa batuan telah dikembangkan secara empiris, diantaranya untuk penilaian kualitas atau kekuatan massa batuan bagi pemilihan metode penggalian dan sistem penyangga terowongan (Bagian 5.2.5). Sistem klasifikasi massa batuan yang umum digunakan dalam pekerjaan pembangunan terowongan antara lain Tunneling Quality Index, Q-system (dusulkan oleh Barton et al., 1974), Rock Mass Rating, RMR (dusulkan oleh Bieniawski, 1973), dan Geological Strength Index, GSI (dusulkan oleh Hoek, 1994). Klasifikasi massa batuan untuk terowongan jalan yang dikembangkan oleh Japanese Society for Civil Engineers, JSCE (2018) telah menjadi acuan dalam perencanaan dan konstruksi terowongan di Indonesia dan tercantum dalam Surat Edaran Menteri PUPR No.:30/SE/M/2015 (PUPR, 2015). Secara umum, klasifikasi massa batuan tersebut menggunakan parameter kekuatan batuan utuh, karakteristik (terutama spasi dan kondisi) diskontinuitas batuan, ukuran blok batuan (diwakili oleh RQD), dan tegangan sekitarnya (oleh tekanan airtanah maupun tegangan in situ).
 - 10) Klasifikasi massa batuan dikembangkan secara empiris sehingga memiliki keterbatasan untuk dapat diterapkan di seluruh kondisi geologi. Untuk mengatasi ketidakpastian kesesuaian penggunaan suatu klasifikasi massa batuan di lokasi pembangunan terowongan, penentuan kualitas massa batuan dan perancangan metode penggalian dan sistem penyangga terowongan tidak hanya didasarkan hanya pada 1 sistem klasifikasi massa batuan. Selain itu, perancangan metode penggalian dan sistem penyangga terowongan dengan metode empiris klasifikasi massa batuan harus dikombinasikan dengan metode lain, seperti metode analitik dan observasi (AFTES, 2003; Kolymbas, 2005).
- e. Pada tahap Konstruksi, pemetaan detail geologi dan karakteristik geologi teknik batuan dan tanah bawah permukaan pada muka galian terowongan dilakukan untuk memeriksa secara langsung kondisi geologi teknik bawah permukaan yang digambarkan pada sayatan geologi teknik dalam tahap pembangunan sebelumnya. Selain itu, pemetaan muka galian juga dilakukan untuk memprediksi kondisi geologi teknik batuan dan tanah

di depan muka galian. Perubahan metode penggalian dan sistem penyangga terowongan harus dipertimbangkan jika terdapat perbedaan kondisi geologi teknik yang dijumpai saat pemetaan muka galian dan saat perancangan.

- f. Di lokasi konstruksi terowongan yang terdiri dari batuan atau campuran batuan dan tanah, peta geologi teknik pada muka galian lereng portal dan terowongan dapat berupa peta tingkat pelapukan batuan, peta kondisi dan frekuensi diskontinuitas, dan peta kualitas massa batuan. Peta kualitas massa batuan disusun berdasarkan klasifikasi massa batuan. Pemetaan klasifikasi massa batuan, diantaranya RMR dan Q-system, membutuhkan penyelidikan aspek geologi teknik lain, yaitu kondisi struktur geologi, airtanah, dan tegangan in situ batuan yang bekerja.
- g. Pengukuran orientasi dan kekuatan bidang diskontinuitas batuan dan analisis kinematika harus dilakukan dalam perencanaan dan konstruksi lereng portal maupun dalam tahap penggalian terowongan batuan yang kestabilannya dikontrol oleh diskontinuitas batuan. Hal ini dilakukan untuk memperkirakan bentuk keruntuhan batuan pada lereng dan lubang galian terowongan agar upaya mitigasi dapat direncanakan.

Tabel 13 - Klasifikasi tingkat pelapukan batuan (ISRM, 1981)

Tingkat pelapukan	Deskripsi
Segar	Tidak terlihat tanda-tanda pelapukan material batuan; sedikit perubahan warna pada permukaan diskontinuitas utama
Sedikit lapuk	Perubahan warna menandai pelapukan material batuan dan permukaan diskontinuitas; seluruh material batuan dapat berubah warna karena pelapukan dan sedikit lemah di bagian luar dibandingkan saat segar
Lapuk sedang	Kurang dari setengah material batuan terdekomposisi dan/atau terdisintegrasi menjadi tanah; mengandung batuan segar atau mengalami perubahan warna, baik menerus atau sebagai inti-inti batuan segar
Lapuk tinggi	Lebih dari setengah material batuan terdekomposisi dan/atau terdisintegrasi menjadi tanah; mengandung batuan segar atau mengalami perubahan warna, baik menerus atau sebagai inti-inti batuan segar

Tingkat pelapukan	Deskripsi
Lapuk seluruhnya	Seluruh material batuan terdekomposisi dan/atau terdisintegrasi menjadi tanah namun struktur asli massa batuan sebagian besar masih utuh
Tanah residual	Seluruh material batuan terdekomposisi dan/atau terdisintegrasi menjadi tanah; struktur massa batuan dan kemas material sudah hancur; mengalami perubahan pada volume, namun tanah belum mengalami transportasi secara signifikan

Tabel 14 - Klasifikasi batuan dan tanah berdasarkan nilai UCS (ISRM, 1981)

Kelas	Deskripsi	Identifikasi lapangan	Kisaran UCS (MPa)
S ₁	Tanah sangat lunak	Keluar diantara jari bila ditekan	<0.025
S ₂	Tanah lunak	Mudah ditekan beberapa centimeter dengan ibu jari	0.025-0.05
S ₃	Tanah teguh	Dapat ditekan beberapa centimeter dengan ibu jari dengan upaya sedang	0.05-0.1
S ₄	Tanah kaku	Mudah diindentasi dengan ibu jari, namun dapat ditekan hanya dengan upaya sangat keras	0.1-0.25
S ₅	Tanah sangat kaku	Mudah diindentasi dengan kuku ibu jari	0.25-0.5
S ₆	Tanah keras	Dapat diindentasi dengan kuku ibu jari dengan upaya keras	>0.5
R ₀	Batuan ekstrim lemah	Dapat diindentasi dengan kuku ibu jari	0.25-1
R ₁	Batuan sangat lemah	Hancur oleh pukulan kuat dari ujung palu geologi, bisa dikupas dengan pisau lipat	1-5
R ₂	Batuan lemah	Dapat dikupas dengan pisau lipat dengan usaha keras, indentasi dangkal oleh pukulan kuat dengan ujung palu geologi	5-25

Kelas	Deskripsi	Identifikasi lapangan	Kisaran UCS (MPa)
R ₃	Batuan agak kuat	Tidak dapat dicuil atau dikupas dengan pisau lipat, bisa retak karena satu pukulan kuat dengan palu geologi	25-50
R ₄	Batuan kuat	Membutuhkan lebih dari satu pukulan palu geologi untuk meretakkan	50-100
R ₅	Batuan sangat kuat	Membutuhkan banyak pukulan palu geologi untuk meretakkan	100-250
R ₆	Batuan ekstrim kuat	Hanya bisa dicuil dengan palu geologi	>250

5.2.3 Pengujian lapangan batuan dan tanah

5.2.3.1 Survei geofisika

- a. Survei geofisika dalam pembangunan terowongan jalan dilakukan untuk memperkirakan kondisi geologi teknik (topografi, batuan dan tanah, struktur geologi, dan airtanah) bawah permukaan melalui pengukuran parameter fisik. Walaupun memiliki keterbatasan akurasi pendugaan kondisi bawah permukaan, survei geofisika memiliki berbagai keuntungan, antara lain pengukuran dapat dilakukan secara relatif cepat, cenderung non-invasif/non-destruktif, dan memungkinkan interpolasi antar lubang bor (ASTM, 1999).
- b. Dalam penyelidikan geologi teknik batuan, survei geofisika dilakukan untuk mengetahui sifat dan klasifikasi keteknikan batuan di bawah permukaan. Lokasi survei geofisika harus didasarkan pada hasil pemetaan geologi dan geologi teknik batuan dan tanah permukaan.
- c. Prosedur berbagai metode survei geofisika yang umumnya digunakan dalam penyelidikan geologi teknik mengacu pada standar yang dideskripsikan dalam Tabel 15. Kesesuaian penggunaan metode survei geofisika untuk berbagai penyelidikan geologi teknik ditampilkan pada Tabel 16.

Tabel 15 - Metode survei geofisika, parameter yang diukur, sifat fisik, model sifat fisik, aplikasi terhadap penyelidikan geologi teknik, dan standar acuan pengujian (modifikasi dari FHWA, 2009 dalam Surat Edaran Menteri PUPR No.30/SE/M/2015, dan Anderson, 2006)

Metode survei geofisika	Parameter yang diukur	Sifat fisik	Model sifat fisik yang dihasilkan	Aplikasi terhadap penyelidikan geologi teknik	Standar acuan pengujian
Seismik Refraksi Dangkal	Waktu tempuh energi seismik bias (gelombang P atau S)	Kecepatan akustik (fungsi dari modulus elastik dan densitas)	Model kecepatan akustik terhadap kedalaman, umumnya menunjukkan interpretasi batas lapisan	Profil geologi (perlapisan tanah/batuan, kedalaman batuan dasar), kedalaman muka airtanah	ASTM D5777-2011
Seismik Refleksi Dangkal	Waktu tempuh dan amplitudo energi seismik pantul (gelombang P atau S)	Densitas dan kecepatan akustik	Model kecepatan akustik terhadap kedalaman, umumnya menunjukkan interpretasi batas lapisan	Profil geologi: permukaan batuan dasar, struktur geologi (sesar dan lipatan), stratigrafi litologi, identifikasi rongga bawah permukaan, geometri perlapisan batuan/tanah	ASTM D7128-05(2010)
Tomografi Seismik <i>Cross-hole</i>	Waktu tempuh dan amplitudi energi seismik (gelombang P atau S)	Densitas dan kecepatan akustik	Model yang menunjukkan variasi spasial dari kecepatan akustik	Profil geologi: perlapisan tanah dan batuan, kedalaman batuan dasar, sisipan pasir, bongkah, atau material organik, identifikasi batuan/tanah permeabel	ASTM D4428 / D4428M-14
<i>Multichannel analyses of surface waves (MASW)</i>	Waktu tempuh energi gelombang permukaan yang dihasilkan	Kecepatan akustik	Model kecepatan akustik (gelombang geser Vs) terhadap kedalaman, umumnya menunjukkan	Profil geologi	ASTM D5777-00(2011)e1

Metode survei geofisika	Parameter yang diukur	Sifat fisik	Model sifat fisik yang dihasilkan	Aplikasi terhadap penyelidikan geologi teknik	Standar acuan pengujian
	dari sumber aktif		interpretasi batas lapisan		
<i>Refraction Microtremor (ReMi)</i>	Waktu tempuh energi gelombang permukaan pasif	Kecepatan akustik	Model kecepatan akustik (gelombang geser Vs) terhadap kedalaman, umumnya menunjukkan interpretasi batas lapisan	Profil geologi (interpretasi batas lapisan), pengkajian area/lereng rawan gerakan tanah	ASTM D5777
<i>Ground-penetrating radar (GPR)</i>	Waktu tempuh dan amplitudo dari pantulan sinyal energi elektromagnetik	Konstanta dielektrik, permeabilitas magnetik, konduktivitas, dan kecepatan elektromagnetik	Model kecepatan elektromagnetik terhadap kedalaman dengan menunjukkan interpretasi batas lapisan	Profil geologi: kedalaman batuan dasar kedalaman muka airtanah, identifikasi rongga bawah permukaan, identifikasi objek terpendam	ASTM D6432-11
Elektromagnetik (EM)	Respon terhadap energi elektromagnetik alami	Konduktivitas elektrik dan induktivitas	Model konduktivitas terhadap kedalaman, umumnya menunjukkan interpretasi batas lapisan	Profil geologi-hidrologi, karakteristik material bawah permukaan, identifikasi struktur geologi bawah permukaan	ASTM D6639-18
Resistivitas elektrik	Beda potensial yang dihasilkan dari arus listrik yang dialirkan	Resistivitas elektrik	Model resistivitas terhadap kedalaman, umumnya menunjukkan interpretasi batas lapisan	Profil geologi-hidrologi: kedalaman batuan dasar, kedalaman muka airtanah, lokasi batuan dengan rekahan tinggi atau zona sesar, identifikasi rongga bawah tanah, sisipan pasir, bongkah,	<ul style="list-style-type: none"> • SNI 2528:2012 • SNI 2818:2012 • ASTM G57-06(2012)

Metode survei geofisika	Parameter yang diukur	Sifat fisik	Model sifat fisik yang dihasilkan	Aplikasi terhadap penyelidikan geologi teknik	Standar acuan pengujian
				atau material organik, identifikasi batuan/tanah permeabel, perubahan lateral dan vertikal batuan/tanah	
<i>Induced Polarization (IP)</i>	Voltase polarisasi atau tahanan tanah bergantung frekuensi	Kapasitivitas elektrik	Model kapasitivitas terhadap kedalaman	Model menunjukkan variasi spasial dari kandungan lempung atau mineralisasi logam	ASTM D6820 - 20
<i>Self potential (SP)</i>	Beda potensial listrik alami	Potensial listrik alami	Model yang menunjukkan variasi spasial dari potensi listrik alami bawah permukaan	Model hidrologi (rembesan melalui bendungan, tanggul, atau batuan terkekarkan, dll.)	
Magnetik	Variasi spasial dari kekuatan medan geomagnetik	Kerentanan magnetik dan magnetisasi remanen	Model yang menunjukkan variasi spasial dari kerentanan magnetik bawah permukaan	Profil atau peta geologi (lokasi sesar, variasi kedalaman terhadap batuan dasar, dll.)	
Gravitasi / Mikrogravitasi (<i>microgravity</i>)	Variasi spasial dari kekuatan medan gravitasi Bumi	<i>Bulk density</i>	Model yang menunjukkan variasi spasial dari densitas bawah permukaan, umumnya menunjukkan interpretasi batas lapisan	Profil atau peta geologi (lokasi rongga karst, variasi kedalaman terhadap batuan dasar, dll.)	ASTM D6430-18

Tabel 16 – Metode geofisika yang diaplikasikan pada penyelidikan geologi teknik (modifikasi dari Anderson, 2006 dan ASTM D 6429-99)

Penyelidikan Geologi Teknik	Seismik Refraksi	Seismik Refleksi	Tomografi Seismik	GPR	EM	Resistivitas	IP	SP	Magnetik	Gravitasi/ Mikro-gravitasi	MASW	ReMi
Pemetaan jenis batuan (kedalaman <10 m)	M	X		M	X	X					M	M
Pemetaan jenis batuan (kedalaman >10 m)	X	M	X		X	X					M	M
Estimasi kandungan mineral lempung					M	X	X				X	X
Mencari lokasi endapan tak terkonsolidasi (pasir dan <i>gravel</i>) dangkal	M	X		M	M	M					X	X
Mencari lokasi endapan pasir dan gravel (yang mengandung mineral berat)									M			
Menentukan volume material organik pada danau atau rongga karst yang terisi sedimen	M	M			M					M	X	X
Pemetaan permukaan airtanah	M (gelombang P)	M (gelombang P)		M	M	M						
Pemetaan konus depresi airtanah	X	X		M	X	X						
Aliran fluida bawah tanah								M				
Pemetaan topografi batuan dasar (kedalaman <10 m)	M			M	X	X				X	M	M
Pemetaan topografi batuan dasar (kedalaman >10 m)	X	M		X	X	X				X	M	M
Delineasi kontak geologi dengan kemiringan curam (kedalaman <10 m)	M			M	M	M						
Delineasi kontak geologi dengan kemiringan curam (kedalaman >10 m)	X	M	X		X	X			X			
Pemetaan orientasi kekar/retakan (batuan dasar dekat permukaan)	M			M								
Identifikasi daerah yang berpotensi lemah (contohnya <i>shear zone</i> dan sesar; kedalaman <10 m)	M		X	M	X	X			X			
Identifikasi daerah yang berpotensi lemah (contohnya <i>shear zone</i> dan sesar; kedalaman >10 m)	X	X	M		X	X			X			
Identifikasi <i>sinkhole</i> dan rongga karst dekat permukaan dan sebaran lateralnya	M	M		M	X	X				M		
Pemetaan rongga terisi udara, contohnya terowongan (kedalaman <10 m)	X	X	X	M	X	M				X	X	X

Penyelidikan Geologi Teknik	Seismik Refraksi	Seismik Refleksi	Tomografi Seismik	GPR	EM	Resistivitas	IP	SP	Magnetik	Gravitasi/ Mikro-gravitasi	MASW	ReMi
Pemetaan rongga terisi udara, contohnya terowongan (kedalaman >10 m)	X	M	M		X	X				X	X	X
Pemetaan rongga terisi air	X (gelombang P)	M (gelombang P)	M	X							X	X
Pemetaan rongga terisi lempung	X	M	M		X	X						
Estimasi <i>rippability</i>	M		X								X	X
Evaluasi lokasi tanah longsor/gerakan tanah	M		M	X	M	M					X	M
Mencari lokasi jalur pipa, dan objek feromagnetik lain			M	M				M				
Mencari lokasi infrastruktur nonmagnetik terpendam			M									
Mencari lokasi infrastruktur magnetik terpendam				M								
Pemetaan situs arkeologi magnetik	X	X		M	M	X			M	X		
Pemetaan situs arkeologi nonmagnetik	X	X		M		X				X		
Pemetaan orientasi kekar/retakan	M		M									
Menentukan sifat batuan/tanah in-situ (modulus bulk, shear, dan Young)	M		M								M	M
Estimasi sifat batuan in-situ (kejenuhan air, porositas, permeabilitas)					M	M					X	X
Penentuan densitas batuan in-situ										M		
Penentuan konstanta dielektrik batuan in-situ				X								
Keterangan: M : Metode utama yang sering diaplikasikan X: Metode alternatif atau opsional yang tidak selalu diaplikasikan												

Dinding lubang bor bekas pengambilan inti menyediakan gambaran yang baik mengenai kondisi bawah permukaan dimana seluruh kondisi batuan dan tanah masih berada pada posisi aslinya. Gambaran ini dapat menjadi penting, terutama jika bagian inti batuan hilang atau *loss* selama pengeboran, dan jika *true dip* dan *strike* dari diskontinuitas dibutuhkan untuk analisis lanjutan. Perekaman lubang bor menggunakan metode geofisika (seismik, resistivitas, *borehole scanner*, dll) dapat dilakukan untuk penyelidikan batuan, tanah, struktur geologi, dan airtanah (Tabel 3).

5.2.3.2 Pengeboran Inti dan Pengambilan Sampel

Pengeboran inti dilakukan mulai tahap Studi Kelayakan. Tujuan pengeboran inti diantaranya (JICA, 2018; USACE, 2001):

- a. Menyelidiki stratigrafi dan struktur geologi bawah permukaan, serta zona/material dengan kondisi geologi yang kompleks.
- b. Mendapatkan sampel inti untuk observasi, klasifikasi, dan pemeriksaan struktur massa batuan (diskontinuitas) untuk logging inti geologi dan pengkajian kualitas massa batuan.
- c. Mengumpulkan sampel inti batuan utuh dan tanah untuk uji laboratorium.
- d. Menyediakan lubang untuk pengujian in-situ, diantaranya uji SPT dan uji Lugeon.
- e. Menyediakan lubang untuk instalasi instrumentasi geoteknik, seperti piezometer untuk pengukuran muka airtanah.
- f. Menyediakan lubang untuk survei lain, seperti survei geofisika perekaman lubang bor.
- g. Membantu interpretasi dan pembuatan model geologi dengan mengintegrasikan dengan pemetaan geologi permukaan, survei geofisika, dan data-data lain.

Prosedur penyelidikan batuan dan tanah melalui pengeboran inti merujuk pada beberapa standar, diantaranya SNI 03-6802-2002, SNI 4148-1:2017, dan SNI 8460:2017.

Jumlah, kedalaman, dan jarak pengeboran inti yang dibutuhkan untuk penyelidikan bawah permukaan dalam pembangunan terowongan secara umum tergantung pada jenis dan ukuran struktur terowongan dan kompleksitas dari kondisi geologi teknik bawah permukaan. Tidak ada aturan umum jumlah, kedalaman, jarak pengeboran inti yang dapat diterapkan dalam semua situasi. Lokasi pengeboran inti harus didasarkan pada hasil pemetaan geologi dan geologi teknik batuan dan tanah permukaan.

- a. Lokasi lubang bor

Pengeboran inti dilakukan sepanjang alinyemen terowongan, pada lereng portal, pada area akses, dan pada zona geologi kompleks, seperti zona sesar (JICA, 2018). Lereng portal

umumnya memiliki ketebalan *overburden* yang lebih kecil, zona pelapukan tinggi, dan permeabilitas tinggi terhadap peningkatan aliran air. Faktor-faktor ini dapat menyebabkan deformabilitas yang lebih besar dan mengurangi kekuatan material penyusun lereng dibandingkan bagian terowongan lain.

Zona geologi kompleks memiliki kondisi bawah tanah yang tidak menguntungkan dan berkontribusi terhadap ketidakstabilan massa batuan di sekitar terowongan selama dan setelah konstruksi, sehingga pada akhirnya menyebabkan keterlambatan konstruksi dan penambahan biaya. Zona geologi kompleks meliputi:

- 1) Sesar dan zona tektonik
- 2) Zona tegangan in-situ tinggi
- 3) Area dengan material lemah, ekspansif, *squeezing*, dan *swelling*
- 4) Area dengan material agresif dan abrasif
- 5) Zona atau area dengan laju rembesan tinggi dan *inflow* air yang besar
- 6) Zona atau area yang terhubung dengan gas bawah tanah dan temperatur tinggi.

b. Jarak dan kedalaman lubang bor

Secara umum, jarak dan kedalaman pengeboran berdasarkan jenis terowongan dan kondisi lokasi mengacu pada Tabel 17. Panduan jarak lubang bor tersebut dapat digunakan sebagai titik awal bagi penentuan jumlah dan lokasi pengeboran. Namun, untuk terowongan panjang melewati area pegunungan, kriteria ini tidak layak secara ekonomi atau menghabiskan banyak waktu untuk melakukan pengeboran. Dengan demikian, pengeboran inti dapat dikombinasikan dengan metode eksplorasi bawah permukaan lainnya, seperti survei geofisika seismik refraksi, untuk mengurangi jumlah lubang bor. Setidaknya 1 lubang bor umumnya diperlukan untuk tiap lereng portal. Lubang bor sebanyak 2-3 perlu ditambahkan jika ada potensi longsor.

Pengeboran inti dilakukan hingga setidaknya 1,5 kali diameter terowongan di bawah *invert* terowongan yang direncanakan. Jika terdapat ketidakpastian mengenai profil akhir terowongan, khususnya pada tahap perencanaan dan perancangan pendahuluan, pengeboran inti harus dilakukan hingga 2-3 kali lipat diameter terowongan di bawah *invert* terowongan rancangan (FHWA, 2009). Kedalaman penyelidikan tanah untuk terowongan dapat mengacu pada SNI 8460:2017 (BSN, 2017).

Tabel 17 - Jarak dan kedalaman pengeboran berdasarkan jenis terowongan dan kondisi lokasi (modifikasi dari SNI 8460:2017; AASHTO, 1988; FHWA, 2009; USACE, 1997)

Jenis terowongan	Kondisi lokasi	Jarak lubang bor	Kedalaman pengeboran	Keterangan	Referensi	
Terowongan transportasi (terowongan pegunungan/batuan, terowongan perisai, terowongan gali-tutup)	Daerah pemukiman	10-75 m	Lebih besar atau sama dengan jumlah antara kedalaman terowongan ditambah 2 kali lebar terowongan.	-Jarak besar dapat dipakai pada investigasi awal -Tambah titik diantara lubang bor apabila hasil investigasi awal menunjukkan adanya variasi tanah yang perlu diinvestigasi lebih detil -Konsultan Perencana wajib menjamin kecukupan jumlah titik bor	SNI 8460:2017	
	Daerah terbuka	20-200 m				
	Portal	Masing-masing minimum 1 titik				
Terowongan gali-dan-tutup		30-90 m				
Terowongan batuan	Kondisi sulit	15-60 m	Pada kondisi khusus dimana terowongan melewati area pegunungan, di bawah tubuh air yang dalam, atau pada area urban yang padat, pengeboran bisa saja tidak layak dilakukan secara ekonomis dan efisien.	AASHTO, 1988; FHWA, 2009		
	Kondisi menguntungkan	150-300 m				
Terowongan batuan/tanah lunak	Kondisi sulit	15-30 m				
	Kondisi menguntungkan	100-150 m				
Terowongan campuran batuan dan tanah (<i>mixed face</i>)	Kondisi sulit	7,5-15 m				
	Kondisi menguntungkan	15-22,5 m				
Terowongan batuan	Geologi sederhana	300-750 m			Kedalaman/panjang pengeboran adalah untuk setiap 100 m terowongan	USACE, 1997
	Geologi kompleks	45-150 m				
	Pedesaan	300-750 m				
	Pemukiman padat	45-120 m				
	Terowongan dalam	Tambah jarak lubang bor secara proporsional terhadap kedalaman terowongan				
	Akses permukaan sulit	750 m s/d lebih dari 3000 m				
	Shaft dan portal	Masing-masing minimum 1 titik				
Masalah khusus	30-150 m secara lokal					

c. Diameter lubang bor

Diameter lubang bor harus ditentukan dengan mempertimbangkan kualitas inti batuan dan ukuran sampel inti batuan yang dibutuhkan untuk pengujian laboratorium. Disarankan untuk melakukan pengeboran inti batuan dengan tabung inti sebesar mungkin untuk mengoptimasi *recovery* inti dan meminimalisir kerusakan inti akibat pengeboran. Secara umum, lubang bor diameter besar (60-90 cm) digunakan untuk mendapatkan inti batuan berkualitas tinggi dan *recovery* tinggi.

Spesimen uji laboratorium harus berbentuk silinder batuan dengan rasio panjang terhadap lebar sebesar 2. Metode ASTM menggunakan diameter inti HQ berukuran 2,5 inci (64 mm). Untuk pengukuran RQD, ISRM merekomendasikan ukuran inti setidaknya NX (54,7 mm).

d. Arah pengeboran

Tiga arah pengeboran inti yang umum untuk eksplorasi terowongan: vertikal, direksional (miring), dan horizontal. Secara umum, pemboran vertikal dan miring harus direncanakan dan dilakukan untuk menyediakan rekaman menerus dari kondisi batuan dan informasi yang penting bagi alinyemen terowongan. Akan tetapi, pada alinyemen terowongan pada pegunungan dalam, pengeboran inti berarah horizontal lebih ekonomis dan disarankan untuk menghindari pengeboran material *overburden* yang tidak perlu dan gangguan terhadap aktivitas pada permukaan tanah.

Tata cara pencatatan dan identifikasi batuan dan tanah hasil pengeboran inti mengacu pada SNI 2436:2008 (BSN, 2008).

5.2.3.3 Pengujian in-situ batuan dan tanah lainnya

Pengujian in-situ batuan dan tanah, tipe material yang sesuai diuji, parameter yang didapatkan, serta referensi pedoman standar SNI, ASTM, dan standar lain ditunjukkan pada Tabel 18.

Tabel 18 - Jenis pengujian in-situ batuan dan tanah, tipe material yang sesuai diuji, parameter yang didapatkan, serta referensi pedoman standar SNI, ASTM, dan standar lain. (FHWA, 2002a, 2009; USACE, 1997, 2001; BSN, 2017; dan JICA, 2018)

Jenis pengujian in-situ batuan/tanah	Tipe material yang sesuai	Parameter yang didapatkan	Standar SNI	Standar ASTM	Standar lain
Uji penetrasi standar (SPT)	Tanah	Nilai N-SPT	SNI 4153-2008	ASTM D1586 /D1586M-18	EN ISO 22476-3:2005
Uji geser baling lapangan / <i>Field Vane Shear Test</i> (FVST)	Tanah lunak berbutir halus	<i>Undrained shear strength</i> (S_u) dan sensitivitas	SNI 03-2487-1991	ASTM D2573/ D2573M-15	EN ISO 22476-9:2005
Uji sondir / <i>Cone Penetration Test</i> (CPT)	Tanah: lanau, pasir, lempung, dan gambut	Pendugaan tipe dan perlapisan tanah	SNI 2827:2008	ASTM D5778-20	EN ISO 22476-12:2009
		Pasir: sudut geser efektif (ϕ'), densitas relatif (D_r), tekanan efektif horisontal in-situ (σ_p')			
		Lempung: <i>undrained shear strength</i> (S_u), tekanan pre-konsolidasi (σ_p')			
<i>Piezocene penetrometer</i> (CPTu)	Tanah: lanau, pasir, lempung, dan gambut	Pendugaan tipe dan perlapisan tanah		ASTM D5778-20	
		Pasir: sudut geser efektif (ϕ'), densitas relatif (D_r), tekanan efektif horisontal in-situ (σ_{ho}'), u_o , muka airtanah			
		Lempung: <i>undrained shear strength</i> (S_u), tekanan pre-konsolidasi (σ_p'), koefisien konsolidasi horisontal (c_h), konduktivitas hidrolik horisontal (k_h), rasio konsolidasi berlebih (OCR)			
<i>Flat Plate Dilatometer</i> (DMT)	Tanah: lanau, pasir, lempung, dan gambut	Pendugaan tipe dan perlapisan tanah, berat isi tanah		ASTM D6635-15	EN ISO 22476-5
		Pasir: sudut geser efektif (ϕ'), Modulus Young (E), densitas relatif (D_r), koefisien kompresibilitas volumetrik (m_v)			
		Lempung: <i>undrained shear strength</i> (S_u), tekanan pre-konsolidasi (σ_p'), koefisien tekanan tanah saat diam (K_0), koefisien kompresibilitas volumetrik (m_v), Modulus Young (E), koefisien konsolidasi horisontal (c_h), konduktivitas hidrolik horisontal (k_h)			

Jenis pengujian in-situ batuan/tanah	Tipe material yang sesuai	Parameter yang didapatkan	Standar SNI	Standar ASTM	Standar lain	
<i>Pre-bored pressuremeter (PMT)</i>	Tanah: lempung, lanau, gambut, beberapa jenis pasir dan kerikil	Modulus Young (E), modulus geser (G), koefisien kompresibilitas volumetrik (m_v), <i>undrained shear strength</i> (S_u)		ASTM D4719-07	EN-ISO 22476	
Uji pembebanan pelat / <i>Plate Loading Test (PLT)</i>	Tanah	Estimasi daya dukung tanah, kekuatan in situ, deformasi vertikal		ASTM D1194-94	EN ISO 22476-13	
	Batuan lunak	Kekuatan in-situ dan sifat deformasi		ASTM STP402		
Uji pendugaan dinamis / <i>Dynamic Probing Test (DP)</i>	Tanah	Resistensi penetrasi dinamis konus, penentuan sifat kekuatan dan deformasi dengan korelasi			ISO 22476-2:2005	
	Batuan Lunak					
Pengambilan contoh batuan inti dan Penamaan Mutu Batu, PMB (<i>Rock Quality Designation, RQD</i>)	Batuan yang terpotong diskontinuitas, terutama batuan keras	Nilai RQD (%)	SNI 2436:2008	ASTM D6032/D6032M-17		
<i>Hydraulic fracturing</i>	Batuan dan tanah	Tegangan in-situ (<i>in-situ stress</i>)	SNI 13-4180-1996			
<i>Overcoring</i>	Batuan	Tegangan in-situ massa batuan lokal		ASTM D4623-08		
<i>Flat Jack test</i>	Batuan	Tegangan in-situ dan modulus deformasi		ASTM D4729-08		
<i>Plate bearing test</i>	Batuan dan tanah	Modulus deformasi		ASTM D1195/ D1195M-09		
<i>Borehole dilatometer test</i>	Batuan		SNI 6664-2015			
<i>Flat jack test</i>	Batuan			ASTM D4729-08		
<i>Radial jacking test</i>	Batuan			ASTM D4506-13e1		
<i>Pressuremeter</i>	Batuan				Pd T-03.2-2005-A	
<i>Dynamic measurement</i>	Batuan				ASTM D4395-08, ASTM D4971-08	
<i>Acoustic televiewing</i>	Batuan		Pencitraan dan identifikasi diskontinuitas pada lubang bor		ASTM D5753-05(2010), ASTM D6167-11	

Jenis pengujian in-situ batuan/tanah	Tipe material yang sesuai	Parameter yang didapatkan	Standar SNI	Standar ASTM	Standar lain
<i>Borehole video televiewing</i>	Batuan			ASTM D5753-05(2010)	
<i>Slug test</i>	Batuan	Permeabilitas		ASTM D4044-96(2008)	
<i>Packer test / Lugeon test</i>	Batuan dan tanah		SNI 2411:2008	ASTM WK64382	
<i>Pumping test</i>	Batuan dan tanah	Karakteristik akuifer (permeabilitas/konduktivitas hidrolik, transmisivitas, storativitas)	SNI 03-6453-2000	ASTM D6034-20	
Uji geser langsung in-situ	Diskontinuitas batuan	Kuat geser in-situ diskontinuitas batuan		ASTM D4554-12	
Uji <i>Schmidt Rebound Hammer</i>	Batuan dengan UCS 1-100 MPa	<i>Rebound hardness number, H_r</i> ; UCS (MPa)		ASTM D5873-14	
Pembuatan sumur uji (<i>test pit</i>)	Batuan dan tanah	Mengamati struktur batuan/tanah, pengujian in-situ, pengambilan sampel untuk uji laboratorium, mengidentifikasi keberadaan utilitas di bawah tanah	SNI 03-6376-2000		
Pembuatan parit uji (<i>trenching</i>)	Batuan dan tanah	Penyelidikan paleoseismologi dan indikasi sesar aktif			NUREG/CR-5503 (1999)

5.2.4 Pengujian laboratorium batuan dan tanah

Jenis dan acuan uji batuan dan tanah di laboratorium mengacu pada pada Tabel 19.

Persyaratan minimum benda uji yang disarankan (Tabel 20), parameter pengujian dan jenis tanah untuk uji klasifikasi tanah (Tabel 21), dan uji laboratorium untuk penentuan parameter geoteknik (Tabel 22) telah disyaratkan dalam SNI 8460:2017. Untuk contoh batuan, jumlah minimum pengujian laboratorium mekanika batuan ditunjukkan pada Tabel 23.

Tabel 19 - Jenis uji laboratorium batuan dan tanah beserta acuan (FHWA, 2009; PUPR, 2015; BSN, 2017)

Jenis pengujian laboratorium batuan/tanah		Standar SNI	Standar ASTM	Standar lain
Sifat indeks	Densitas tanah	SNI 03-3637-1994	ASTM D7263-09(2018)e2	
	Densitas batuan	SNI 03-2437-1991		
	Porositas tanah dan batuan	SNI 03-2437-1991		
	Kadar airtanah dan batuan	SNI 1965:2008, SNI 7750-2012	ASTM D2216-19	
	Uji <i>Slake durability</i> batuan lemah	SNI 3406:2011	ASTM D4644-16	ISRM1 1977 [EUR4] Part 2
	Uji <i>swelling</i> tanah kohesif	SNI 6424:2008		
	Uji <i>swelling</i> material batuan			ISRM Part 2
	Uji beban titik (<i>point load</i>) batuan	SNI 03-2814-1992		
	Konsistensi (<i>hardness</i>) tanah	SNI 1966:2008, SNI 1967:2008, SNI 3422:2008		
	Konsistensi (<i>hardness</i>) batuan	SNI 13-6582-2001		
	<i>Abrasivity</i>	SNI 2417:2008	ASTM D7625-10	
Uji kuat tekan uniaksial	Tanah	SNI 3638:2012		
	Batuan	SNI 2825:2008		
Uji kuat tekan triaksial	Tanah	SNI 2455:2015, SNI 4813:2015		
	Batuan	SNI 2815:2011		
Uji kuat tekan bebas (UCS)	Tanah	SNI 3638:2012		
	Batuan	SNI 2825:2008	ASTM D2938-95(2002)	
Uji kuat tarik batuan (<i>Brazilian test</i>)		SNI 2486:2011	ASTM D3967-16	
Uji geser langsung	Tanah	SNI 3420:2016, SNI 2813:2008		
	Batuan	SNI 2824:2011	ASTM D5731-08	
Uji berat isi tanah		SNI 03-3637-1994		
Uji laboratorium cepat rambat ultrasonik dan konstanta elastik		SNI 2485:2015		
Analisis ukuran butir tanah		SNI 3423:2008		

Jenis pengujian laboratorium batuan/tanah		Standar SNI	Standar ASTM	Standar lain
Penentuan batas konsistensi tanah (<i>Atterberg limits</i>)		SNI 1967:2008, SNI 1966:2008, SNI 3422:2008		
Koreksi kepadatan tanah berbutir kasar		SNI 1976:2008		
Uji dispersibilitas tanah		SNI 6874:2012		
Uji kimia dan kandungan organik tanah dan airtanah		SNI 13-6793-2002, SNI 6787:2015	ASTM D4373-14, ASTM D512-12	
Uji konsolidasi tanah		SNI 2812:2011, SNI 8072:2016		
Uji kompaksi / pepadatan tanah	Uji Proctor	SNI 1742:2008, SNI 1743:2008		
	Uji <i>California Bearing Ratio</i> (CBR)	SNI 1744:2012		
Deformabilitas	Modulus elastisitas tanah	SNI 2455:2015, SNI 4813:2015		
	Modulus elastisitas batuan	SNI 2826:2008		
	Rasio Poisson tanah	SNI 2455:2015, SNI 4813:2015		
	Rasio Poisson batuan	SNI 2826:2008		
Uji permeabilitas	Tanah	SNI 2435:2008, SNI 03-6870-2002, SNI 03-6871-2002		
	Batuan		ASTM D4525 - 13e2	
Mineralogi dan ukuran butir	Analisis petrografi sayatan tipis	SNI 7573:2010		
	Analisis termal diferensial		ASTM E794-06(2012)	
	<i>X-ray diffraction</i> (XRD)	SNI 13-6584-2001		
Persiapan contoh uji batuan di laboratorium mekanika batuan		SNI 2848-2008	ASTM D2113-08	
Identifikasi dan deskripsi batuan di laboratorium				ISO 14689-1:2003
Identifikasi pada pemeriksaan contoh tanah		SNI 03-6797-2002		

Tabel 20 - Persyaratan jumlah minimum benda uji yang disarankan dalam SNI 8460:2017 (BSN, 2017)

Deskripsi	Satuan	Pengalaman Sejenis		
		Tidak Ada	Ada	Sangat Banyak
A Sifat Indeks atau Klasifikasi				
1 Distribusi ukuran butir	tes	4-6	3-5	2-4
2 Kadar air	tes	Semua contoh tanah kualitas kelas 1 s.d 3		
3 Indeks kekuatan (<i>engineering properties</i>)	tes	Semua contoh tanah kualitas kelas 1		
4 Batas Atterberg	tes	3-5	2-4	1-3
5 Kandungan Organik	tes	3-5	2-4	1-3
6 Berat Volume				
- untuk nilai ≥ 20 kN/m ³	tes	4	3	2
- untuk nilai ≤ 20 kN/m ³	tes	3	2	1
7 Index kepadatan (kepadatan relatif)		Secukupnya (ditentukan oleh Ahli Geoteknik yang bertanggungjawab)		
8 Berat jenis	tes	2	1	1
B Sifat Mekanikal				
1 Uji Triaksial untuk kuat geser efektif				
Untuk variasi amplop kekuatan dengan koefisien regresi "r"				
- $r \leq 0.95$	set	4	3	2
- $0.95 < r < 0.98$	(3 benda uji pada tekanan berbeda)	3	2	1
- $r \geq 0.98$		2	1	1
2 Uji Triaksial untuk kuat geser tak alir				
Untuk variasi kuat geser tak alir pada tegangan konsolidasi yang sama				
- Rasio nilai maks / min > 2	set	6	4	3
- $1.25 < \text{Rasio nilai maks / min} \leq 2$	(3 benda uji pada tekanan berbeda)	4	3	2
- Rasio nilai maks / min ≤ 1.25		3	2	1
3 Uji Geser langsung				
Untuk variasi amplop kekuatan dengan koefisien regresi "r"				
- $r \leq 0.95$	set	4	3	2
- $0.95 < r < 0.98$	(3 benda uji pada tekanan berbeda)	3	2	1
- $r \geq 0.98$		2	2	1
4 Uji Konsolidasi				
Untuk variasi Modulus Oedometer (E_{oed}) pada rentang tekanan yang relevan				
- Rentang nilai $E_{oed} \geq 50\%$	tes	4	3	2
- $\approx 20\% < \text{Rentang nilai } E_{oed} < \approx 50\%$	tes	3	2	2
- Rentang nilai $E_{oed} < \approx 20\%$	tes	2	2	1
C Sifat Hidrolis				
1 Uji Permeabilitas				
Untuk variasi koefisien permeabilitas (k)				
- Rasio nilai maks / min > 100	tes	5	4	3
- $10 < \text{Rasio nilai maks / min} \leq 100$	tes	5	3	2
- Rasio nilai maks / min ≤ 10	tes	3	2	1
D Sifat Kimia				
1 Kandungan Karbonat	tes	Secukupnya (ditentukan oleh Ahli Geoteknik yang bertanggungjawab)		
2 Kandungan Sulfat	tes	Secukupnya (ditentukan oleh Ahli Geoteknik yang bertanggungjawab)		
3 pH	tes	Secukupnya (ditentukan oleh Ahli Geoteknik yang bertanggungjawab)		
4 Kandungan Klorit	tes	Secukupnya (ditentukan oleh Ahli Geoteknik yang bertanggungjawab)		
E Lain-lain				
1 Dispersibilitas tanah	tes	Secukupnya (ditentukan oleh Ahli Geoteknik yang bertanggungjawab)		
2 Uji kembang tanah	tes	Secukupnya (ditentukan oleh Ahli Geoteknik yang bertanggungjawab)		

Tabel 21 - Uji klasifikasi tanah berdasarkan jenis tanah dan benda uji (dalam SNI 8460:2017)

Parameter	Jenis Tanah							
	Tanah Lempung			Tanah Lanau			Tanah Pasiran, Berkerikil	
	Jenis benda uji			Jenis benda uji			Jenis benda uji	
	Tak Ter-ganggu	Ter-ganggu	Dibentuk Kembali	Tak Ter-ganggu	Ter-ganggu	Dibentuk Kembali	Ter-ganggu	Dibentuk Kembali
Deskripsi geologi dan klasifikasi tanah	X	X	X	X	X	X	X	X
Kadar air	X	(X)	(X)	X	(X)	(X)	(X)	(X)
Berat isi curah (<i>bulk density</i>)	X	(X)	-	X	(X)	-	-	-
Kepadatan minimum dan maksimum	-	-	-	(X)	(X)	(X)	X	X
Batas Atterberg	X	X	X	X	X	X	-	-
Distribusi ukuran partikel	X	X	X	X	X	X	X	X
Kuat geser tak alir	X	-	-	(X)	-	-	-	-
Permeabilitas	X	-	-	X	(X)	(X)	(X)	(X)
Sensitifitas	X	-	-	-	-	-	-	-
<p>X = normal untuk ditentukan</p> <p>(X) = mungkin untuk ditentukan, tidak selalu mewakili</p> <p>- = tidak tersedia</p> <p>CATATAN – Untuk beberapa jenis tanah, pengujian lebih lanjut perlu dipertimbangkan, misalnya penentuan kadar organik, kepadatan partikel, dan keaktifan.</p>								

Tabel 22 - Uji laboratorium untuk penentuan parameter geoteknik berdasarkan SNI 8460:2017 (BSN, 2017)

Parameter Geoteknik	Jenis Tanah					
	Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung terkonsolidasi normal (NC clay)	Lempung terkonsolidasi berlebih (OC clay)	Lempung gambut organik
Modulus Oedometer (E _{oed}); indeks kompresi (C _c); [kompresibilitas satu dimensi]	(OED) (TX)	(OED) (TX)	(OED) (TX)	(OED) (TX)	(OED) (TX)	(OED) (TX)
Modulus Young's (E); modulus Geser (G)	TX	TX	TX	TX	TX	TX
Kuat geser terdrainase (effective) (c', (φ)	TX (SB)	TX (SB)	TX (SB)	TX (SB)	TX (SB)	TX (SB)
Kuat geser residual (c' _R , (φ _R)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)
Kuat geser tak terdrainase (c _u)	-	-	TX DSS SIT	TX DSS (SB) SIT	TX DSS (SB) SIT	TX DSS (SB) SIT
Kepadatan curah, <i>bulk density</i> (ρ)	BDD	BDD	BDD	BDD	BDD	BDD
Koefisien konsolidasi (c _v)			OED TX	OED TX	OED TX	OED TX
Permeabilitas(k)	TXCH PSA	TXCH PSA	PTC TXCH (PTF)	TXCH (PTF) (OED)	TXCH (PTF) (OED)	TXCH (PTF) (OED)

- = Tidak Tersedia
() = Hanya tersedia sebagian; untuk detail, lihat 5.6.

Singkatan pengujian laboratorium:
 BDD Penentuan kepadatan curah(*bulk density*)
 DSS Pengujian geser langsung sederhana
 OED Pengujian oedometer
 PTF Pengujian permeabilitas untuk the Parameter Tekanan dari atas
 PTC Pengujian permeabilitas untuk the Parameter Tekanan tetap
 RS Cincin Geser(*ring shear*)
 SB Pengujian kotak geser translasional
 SIT Pengujian indeks kekuatan(biasanya dilakukan pada fase pendahuluan)
 PSA Analisis ukuran partikel
 TX Pengujian triaksial

Tabel 23 - Jenis uji mekanika batuan, bentuk benda uji, dimensi, dan jumlah minimum pengujian berdasarkan SNI 2848:2008 (BSN, 2008)

No.	Jenis uji mekanika batuan	Bentuk benda uji			Dimensi			Jumlah minimum
		Silinder	Balok persegi	Tak teratur	Diameter (cm)	Luas penampang (cm ²)	Panjang (cm)	
1	Sifat dasar batuan (berat isi, berat jenis, kadar air, porositas, dll)	√	√	√	-	-	-	2 - 1 kg
2	Abrasi Los Angeles	√	√	√	-	-	-	10 kg
3	Ketahanan lapuk	√	√	√	-	-	-	1 kg
4	Kekekalan bentuk	√	√	√	-	-	-	10 kg *)
5	Beban titik	√	√	√	5,4	-	-	20 kg
6	Cepat rambat ultrasonik	√	√	-	5,4	-	11	5 buah
7	Kuat tekan sumbu tunggal	√	√	-	5,4	5 x 5	11	3 buah
8	Kuat tekan triaksial	√	-	-	5,4	Tergantung diameter	11	3 buah
9	Kuat geser	√	√	-	5,4	5 x 5	-	3 buah
10	Kuat tarik tak langsung	√	-	-	5,4	-	5	1 buah
11	Kuat lentur	√	√	-	5,4	5 x 5	15-35	1 buah

Keterangan :

*) mewakili 1 massa batuan

5.2.5 Klasifikasi massa batuan

Klasifikasi massa batuan pada terowongan perlu dilakukan untuk mengetahui karakter massa batuan, menentukan parameter kekuatan massa batuan, dan merekomendasi sistem perkuatan batuan yang diperlukan. Klasifikasi massa batuan yang perlu ditentukan dalam proyek terowongan jalan tol adalah klasifikasi *Q-System*, *Rock Mass Rating (RMR)*, *Geological Strength Index (GSI)*, dan *JSCE*. Klasifikasi massa batuan utamanya ditentukan dalam proyek terowongan pegunungan yang tersusun atas batuan dan memiliki kondisi geologi yang kompleks, namun dapat dilakukan pada proyek metode terowongan lain jika diperlukan. Penentuan kelas massa batuan perlu dilakukan dalam pemetaan muka galian (*face mapping*), serta ditunjukkan pada peta dan sayatan geologi sepanjang sumbu terowongan. Hal ini dilakukan untuk membantu menentukan segmen terowongan yang kemungkinan bermasalah dan memerlukan perhatian khusus. Klasifikasi massa batuan juga perlu dilakukan pada hasil pengeboran inti untuk kemudian dikorelasi dan membantu pendetilan sayatan geologi yang menunjukkan pembagian kelas massa batuan.

a. Q-System

Tunneling Quality Index (Q-system) dihitung dengan persamaan berikut (Barton dkk. 1974):

$$Q = \left[\frac{RQD}{J_n} \right] \times \left[\frac{J_r}{J_a} \right] \times \left[\frac{J_w}{SRF} \right] \quad (1)$$

Keterangan:

RQD adalah penamaan mutu batuan PMB (*Rock Quality Designation*);

J_n adalah angka set kekar;

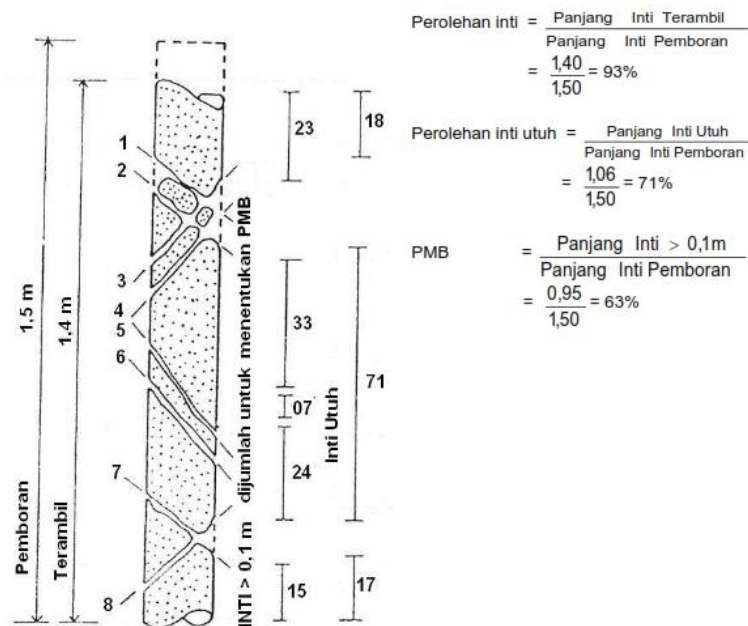
J_r adalah angka kekasaran kekar; ;

J_a adalah angka alterasi kekar;

J_w adalah faktor reduksi air dalam kekar;

SRF adalah faktor reduksi tegangan, yang mengukur reduksi beban akibat ekskavasi, tegangan semu, *squeezing*, dan *swelling*.

Rock Quality Designation merupakan persentase dari perolehan inti batuan dengan jumlah panjang potongan inti batuan utuh yang melebihi 100 mm dan dibagi dengan panjang inti batuan (Gambar 9). Penentuan J_n, J_r, J_a, J_w, dan SRF untuk klasifikasi Q-system mengacu pada Tabel 24.



Gambar 9 - Ilustrasi prosedur pengukuran dan perhitungan PMB (SNI 2436:2008)

Tabel 24 - Deskripsi dan nilai parameter untuk klasifikasi Q-system (simplifikasi dari Grimstad dan Barton, 1993)

RQD (Rock Quality Designation)

Sangat buruk	RQD = 0-25%
Buruk	25-50
Sedang	50-75
Bagus	75-90
Sangat bagus	90-100
<p>Catatan: (i) Jika RQD dilaporkan atau terukur senilai <10% (termasuk 0), harga 10 digunakan untuk mengevaluasi Q (ii) Interval RQD sebesar 5, contohnya 100, 95,90, dll. dinilai cukup akurat</p>	

Jn (angka set kekar)

Masif, tanpa atau sedikit kekar	Jn = 0.5-1
Satu set kekar	2
Satu set kekar plus kekar acak	3
Dua set kekar	4
Dua set kekar plus kekar acak	6
Tiga set kekar	9
Tiga set kekar plus kekar acak	12
Empat atau lebih set kekar, sangat terkekarkan, tekstur "sugar-cube", dll.	15
Batuan hancur, mirip tanah	20
<p>Catatan: (i) Untuk persimpangan terowongan, gunakan (3.0 x Jn) (ii) Untuk portal, gunakan (2.0 x Jn)</p>	

Jr (angka kekasaran kekar)

<p>a) Kontak dinding-batuan b) Kontak dinding-batuan sebelum pergeseran 10 cm</p>		<p>c) Tidak ada kontak dinding-batuan ketika terjadi pergeseran</p>	
Kekar tidak menerus	Jr = 4	Zona yang mengandung mineral lempung cukup tebal hingga menghalangi kontak dinding-batuan	Jr = 1.0
Kasar atau tidak seragam, berundulasi	3	Zona hancuran, kerikil-kerakalan, atau pasiran yang cukup tebal hingga menghalangi kontak dinding-batuan	1.0
Halus, berundulasi	2	<p>Catatan: (i) Tambahkan 1.0 jika rata-rata spasi dari set kekar yang relevan lebih besar dari 3 m (ii) Jr = 0.5 dapat digunakan untuk kekar planar, tercerminsesarkan yang memiliki lineasi, dengan syarat lineasinya berorientasi sedemikian rupa hingga menghasilkan kekuatan minimal</p>	
Halus, berundulasi	1.5		
Kasar atau tidak seragam, planar	1.5		
Halus, planar	1		
Tercerminsesarkan, planar	0.5		
<p>Catatan: (i) Deskripsi secara berturut-turut merujuk pada fitur skala kecil, dan fitur skala menengah</p>			

Ja (angka alterasi pelapukan)

Kontak antara dinding kekar	KARAKTER DINDING KEKAR		Kondisi	Kontak dinding
	KEKAR BERSIH	Kekar yang 'sembuh' atau terlaskan:		terisi kuarsa, epidot, dll.
PELAPIS ATAU PENGISI TIPIS	Dinding kekar segar:		tanpa pelapis atau pengisi, kecuali noda akibat oksidasi	1
	Dinding kekar sedikit teralterasi:		mineral pelapis non-lunak, partikel bebas-lempung, dll.	2
Kontak dinding sebagian atau tidak ada	JENIS PENGISI:	Tipe	Kontak dinding sebagian	Tidak ada kontak dinding
			Pengisi tipis (<5 mm)	Pengisi tebal
	Material friksi	pasir, lanau, kalsit, dll. (non-lunak)	Ja = 4	Ja = 8
	Material kohesif keras	pengisi terkompaksi dari lempung, klorit, talk, dll.	6	5 - 10
	Material kohesif lunak	material <i>overconsolidated</i> sedang hingga rendah dari lempung, klorit, talk, dll.	8	12
	Material lempung <i>swelling</i>	material pengisi menunjukkan sifat <i>swelling</i>	8 - 12	13 - 20

Jw (faktor reduksi air kekar)

Ekskavasi kering atau rembesan minor, contohnya <5 liter/menit secara lokal	$p_w < 1 \text{ kg/cm}^2$	Jw = 1
Rembesan atau tekanan sedang, pengisi kekar terkadang mengalami pencucian	1 - 2.5	0.66
Rembesan atau tekanan besar pada batuan kompeten dengan kekar tidak terisi	2.5 - 10	0.5
Rembesan atau tekanan besar, banyak pencucian pada pengisi kekar	2.5 - 10	0.3
Rembesan atau tekanan air sangat besar pada peledakan, menurun seiring waktu	> 10	0.2 - 0.1
Rembesan atau tekanan air sangat besar yang berlanjut tanpa menunjukkan penurunan	> 10	0.1 - 0.05
<p>Catatan: (i) Keempat faktor terakhir adalah perkiraan kasar. Tingkatkan Jw jika pengukuran drainase terpasang (ii) Masalah khusus yang disebabkan oleh pembentukan es tidak dipertimbangkan</p>		

SRF (Stress Reduction Factor / Faktor Reduksi Tegangan)

Zona-zona lemah memencit	Beberapa zona lemah dengan lempung atau batuan terdisintegrasi secara kimiawi, batuan sekitar sangat urai (kedalaman berapapun)	SRF = 10
	Zona lemah tunggal mengandung lempung atau batuan terdisintegrasi secara kimiawi (kedalaman ekskavasi < 50 m)	5

	Zona lemah tunggal mengandung lempung atau batuan terdisintegrasi secara kimiawi (kedalaman ekskavasi > 50 m)			2.5
	Beberapa zona geser/gerus pada batuan kompeten (tanpa lempung), batuan sekitar urai (kedalaman berapapun)			7.5
	Zona geser/gerus tunggal pada batuan kompeten (tanpa lempung), batuan sekitar urai (kedalaman ekskavasi < 50 m)			5
	Zona geser/gerus tunggal pada batuan kompeten (tanpa lempung), batuan sekitar urai (kedalaman ekskavasi > 50 m)			2.5
	Batuan urai, kekar terbuka, sangat terkekarkan atau "sugar-cube", dll. (kedalaman berapapun)			5
Catatan: (i) Kurangi nilai SRF sebesar 25-50% jika zona geser yang relevan hanya mempengaruhi penggalian tanpa memotongnya				
Batuan kompeten, masalah tegangan batuan		σ_c / σ_1	σ_θ / σ_c	SRF
	Tegangan rendah, dekat permukaan, kekar terbuka	> 200	< 0.01	2.5
	Tegangan sedang, kondisi tegangan menguntungkan	200 - 10	0.01 - 0.3	1
	Tegangan tinggi, struktur sangat rapat. Biasanya menguntungkan terhadap stabilitas, bisa jadi terkecuali untuk dinding	10 - 5	0.3 - 0.4	0.5 - 2
	Slabbing sedang setelah > 1 jam pada batuan masif	5 - 3	0.5 - 0.65	5 - 50
	Slabbing dan rock burst setelah beberapa menit pada batuan masif	3 - 2	0.65 - 1	50 - 200
	Rock burst parah (strain burst) dan deformasi dinamis seketika pada batuan masif	< 2	> 1	200 - 400
Catatan: (ii) Untuk kondisi medan dengan tegangan sangat anisotropik (jika terukur): ketika $5 < \sigma_1/\sigma_3 < 10$, kurangi σ_c menjadi $0.75 \sigma_c$. Ketika $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, kurangi σ_c menjadi $0.5 \sigma_c$.				
(iii) Hanya ada sedikit rekaman kasus yang menunjukkan bahwa kedalaman crown di bawah permukaan kurang dari lebar span. Sarankan kenaikan SRF dari 2.5 menjadi 5 untuk kasus tegangan rendah.				
			σ_θ / σ_c	SRF
Batuan squeezing	Aliran plastis batuan tidak kompeten di bawah pengaruh tekanan tinggi	Tekanan batuan squeezing kecil	1 - 5	5 - 10
		Tekanan batuan squeezing besar	> 5	10 - 20
Batuan swelling	Aktivitas swelling kimiawi bergantung pada kehadiran air	Tekanan batuan swelling kecil		5 - 10
		Tekanan batuan swelling besar		10 - 15

Nilai *Excavation Support Ratio* (ESR) berhubungan dengan tingkat keamanan yang disyaratkan dari sistem penyangga terowongan untuk mempertahankan kestabilan ekskavasi. Nilai ESR untuk berbagai jenis ekskavasi bawah tanah ditunjukkan pada Tabel 25. Nilai ESR sebesar 1,0 disarankan untuk proyek terowongan sipil (FHWA, 2009). Dimensi ekuivalen (D_e) ekskavasi diperoleh menggunakan persamaan berikut:

$$D_e = \frac{\text{Span, diameter, atau tinggi ekskavasi (m)}}{\text{ESR}} \quad (2)$$

Tabel 25 - Nilai rasio perkuatan ekskavasi (ESR) untuk berbagai struktur bawah tanah (Barton et al., 1974)

Kategori Ekskavasi		Nilai ESR yang Disarankan
A	Bukaan tambang sementara	3-5
B	Bukaan tambang permanen, terowongan air untuk PLTA, terowongan eksplorasi (<i>pilot tunnels</i>), <i>drift</i> dan <i>heading</i> untuk ekskavasi besar	1,6
C	Ruang penyimpanan, fasilitas pengolahan air, terowongan jalan dan rel kereta api kecil, <i>surge chambers</i> , terowongan akses	1,3
D	Stasiun pembangkit listrik, terowongan jalan dan rel kereta api besar, ruang pertahanan sipil, persimpangan portal	1,0
E	Pembangkit listrik tenaga nuklir bawah tanah, stasiun kereta api, fasilitas olahraga dan publik, pabrik	0,8

Setelah kualitas massa batuan Q dan ESR ditentukan, sistem perkuatan terowongan dapat ditentukan berdasarkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 10.

Barton et al. (1980) mengusulkan panjang *rock bolt*, maksimum bentangan tanpa penyangga (*maximum unsupported span*), dan tekanan penyangga atap galian untuk melengkapi rekomendasi sistem penyangga. Panjang *rock bolt* L dapat diestimasi dari lebar ekskavasi B dan ESR sebagai berikut:

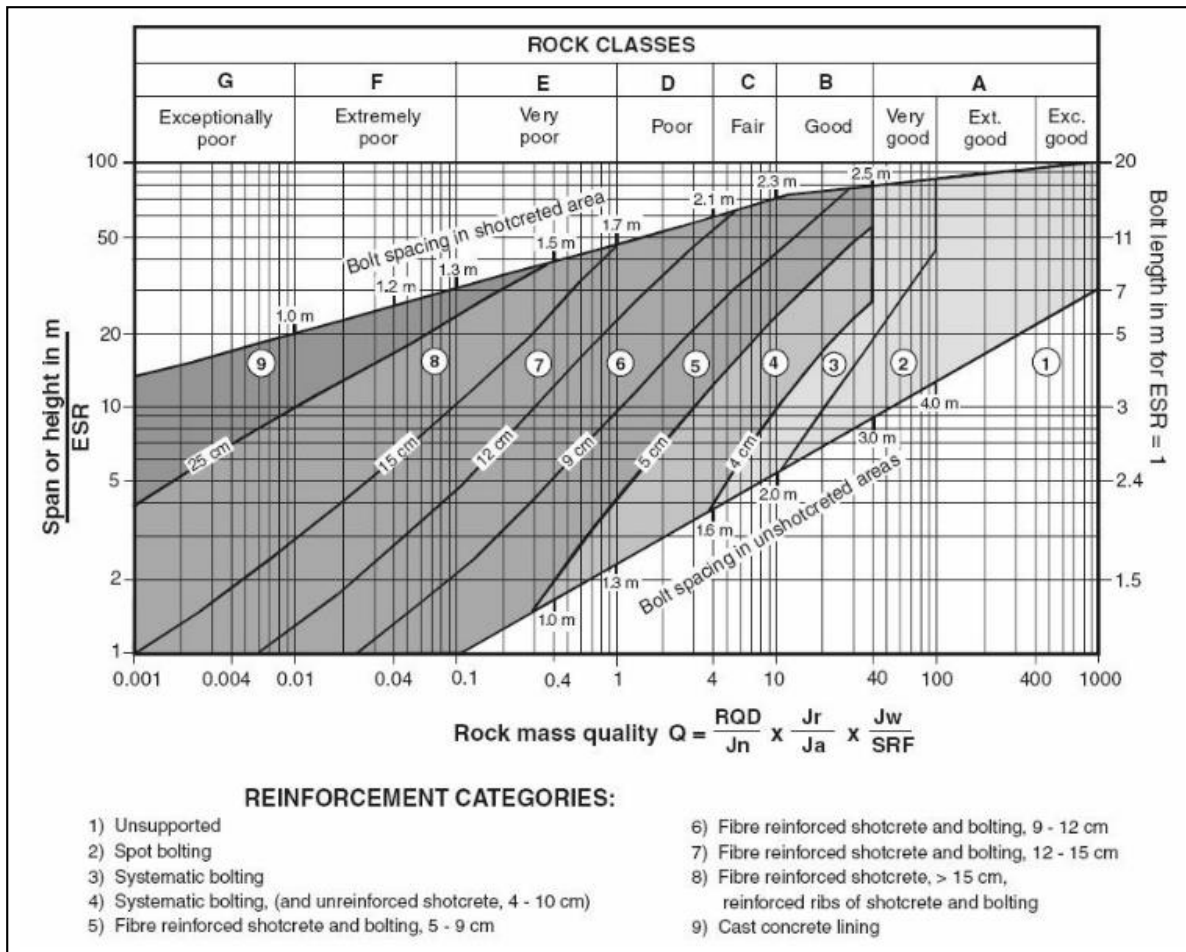
$$L = \frac{2+0,15 B}{ESR} \text{ (dalam meter)} \quad (3)$$

Bentangan ekskavasi tanpa penyangga maksimum (*maximum unsupported span*) dapat diestimasi sebagai berikut:

$$\text{Maximum Unsupported Span} = 2 \text{ ESR } Q^{0,4} \quad (4)$$

Grimstad dan Barton (1993) mengusulkan hubungan antara nilai Q dan tekanan penyangga atap permanen P_{roof} sebagai berikut:

$$P_{\text{roof}} \text{ (MPa)} = \frac{2\sqrt{J_n} Q^{-1/3}}{3 J_r} \quad (5)$$



Gambar 10 - Kategori estimasi kekuatan berdasarkan klasifikasi indeks kualitas terowongan Q (Grimstad dan Barton, 1993)

Selain berdasarkan pengamatan langsung pada inti batuan dan singkapan massa batuan dinding galian terowongan dalam *face mapping*, klasifikasi Q-system massa batuan juga dapat diperkirakan melalui pengukuran kecepatan rambat gelombang seismik primer (V_p) dalam survei geofisika seismik refraksi dangkal, terutama hingga kedalaman 25 m (Bagian 5.2.3). Prosedur penentuan klasifikasi massa batuan melalui survei seismik refraksi dijelaskan dalam Barton et al. (1992), Barton (1995), Barton (1996), dan Barton (1999).

b. *Rock Mass Rating (RMR)*

Klasifikasi *Rock Mass Rating (RMR)* terutama digunakan pada massa batuan yang keruntuhannya dikontrol oleh bidang diskontinuitas. Klasifikasi ini mengalami pengembangan hingga versi tahun 1989.

- 1) Dalam penggunaan klasifikasi massa batuan RMR, perlu diperhatikan perbedaan parameter dan rating yang digunakan pada klasifikasi RMR versi 1973 dan 1989.

Parameter dan rating yang digunakan pada klasifikasi RMR versi 1989 ditunjukkan pada Tabel 26 dan Tabel 28.

- 2) Kekuatan batuan utuh didasarkan pada nilai *uniaxial compressive strength* (UCS) atau *point load index*. Nilai kekuatan batuan utuh juga dapat diperkirakan di lapangan menggunakan metode yang ditunjukkan pada Tabel 14.

Tabel 26 - Parameter RMR dan bobot (Bieniawski, 1989)

PARAMETER			Kisaran nilai // bobot						
1	Kekuatan material batuan utuh	Indeks kekuatan beban titik	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Untuk kisaran rendah ini, kuat tekan uniaxial lebih disarankan		
		Kuat tekan uniaxial, UCS	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	BOBOT	15	12	7	4	2	1	0	
2	Kualitas inti bor RQD		90 - 100%	75 - 90 %	50 - 75%	25 - 50%	< 25%		
	BOBOT		20	17	13	8	5		
3	Spasi diskontinuitas		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	BOBOT		20	15	10	8	5		
4	Kondisi diskontinuitas	Panjang	< 1 m	1-3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		Bobot	6	4	2	1	0		
		Separasi	tidak ada	< 0.1 mm	0.1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
		Bobot	6	5	4	1	0		
		Kekasaran	sangat kasar	kasar	agak kasar	halus	sangat halus		
		Bobot	6	5	3	1	0		
		Pengisi (<i>gouge</i>)	tidak ada	Pengisi keras		Pengisi lunak			
		Bobot	6	4	2	2	0		
5	Airtanah	Rembesan per 10 m panjang terowongan	tidak ada	< 10 liter/menit	10 - 25 liter/menit	25 - 125 liter/menit	> 125 liter/menit		
		p_w / σ_1	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
5	Airtanah	Kondisi umum	kering seluruhnya	lembab	basah	menetes	mengalir		
		BOBOT	15	10	7	4	0		

Tabel 27 - Pengaruh orientasi diskontinuitas terhadap arah penggalian terowongan (Bieniawski, 1989)

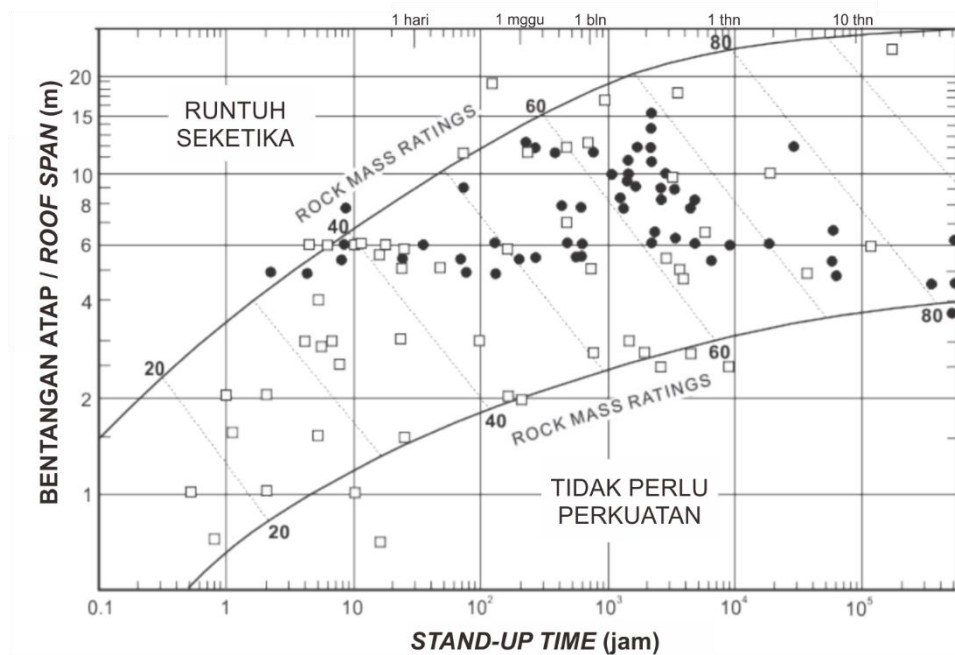
Strike tegak lurus terhadap sumbu terowongan				Strike sejajar terhadap sumbu terowongan		Tidak berhubungan
Ekskavasi searah dip		Ekskavasi berlawanan dip		terowongan		
Dip 40- 90°	Dip 20- 45°	Dip 45- 90°	Dip 20- 45°	Dip 20- 45°	Dip 45- 90°	Dip 45- 90°
Sangat menguntungkan	Menguntungkan	Sedang	Tidak menguntungkan	Sedang	Sangat tidak menguntungkan	Sedang

Tabel 28 – Pengaruh orientasi diskontinuitas pada nilai RMR (Bieniawski, 1989)

Penilaian orientasi diskontinuitas untuk:	Sangat menguntungkan	Menguntungkan	Sedang	Tidak menguntungkan	Sangat tidak menguntungkan
Terowongan	0	-2	-5	-10	-12
Fondasi rakit	0	-2	-7	-15	-25
Lereng*	0	-5	-25	-50	-60

*rekomendasi menggunakan metode *slope mass rating* (SMR)

Stand-up time terowongan dengan berbagai ukuran bentang (span) pada berbagai nilai klasifikasi RMR diperkirakan menggunakan grafik pada Gambar 11. Metode penggalian dan sistem penyangga terowongan berdasarkan klasifikasi RMR ditunjukkan pada Tabel 29.



Gambar 11 - Hubungan antara *stand-up time*, bentang, dan RMR (Bieniawski, 1989)

Tabel 29 – Panduan metode penggalian dan sistem penyangga terowongan dengan bentang 10 m berdasarkan RMR (Bieniawski, 1989)

Kelas massa batuan	RMR (Bieniawski, 1989)	Stand-up time rata-rata	Kohesi massa batuan (kPa)	Sudut gesek dalam massa batuan (°)	Ekskavasi	Perkuatan		
						Baut batuan (diameter 20 mm digrouting seluruhnya)	Beton semprot	Set baja
I Sangat baik	81 - 100	20 tahun untuk	>400	>45	Muka galian utuh, kemajuan 3 m	Umumnya, tidak ada perkuatan yang diperlukan terkecuali beberapa pembautan di titik-titik tertentu.		

Kelas massa batuan	RMR (Bieniawski, 1989)	Stand-up time rata-rata	Kohesi massa batuan (kPa)	Sudut gesek dalam massa batuan (°)	Ekskavasi	Perkuatan		
						Baut batuan (diameter 20 mm digrouting seluruhnya)	Beton semprot	Set baja
		bentang 15 m						
II Baik	61 - 80	1 tahun untuk bentang 10 m	300-400	35-45	Muka galian utuh, kemajuan 1.0-1.5 m, perkuatan lengkap sejauh 20 m dari muka galian	Secara lokal, baut dalam <i>crow</i> n sepanjang 3 m, berjarak 2.5 m, dengan sesekali <i>wire mesh</i> .	50 mm pada <i>crow</i> n jika dibutuhkan	Tidak ada
III Sedang	41 - 60	1 minggu untuk bentang 5 m	200-300	25-35	<i>Heading</i> dan <i>bench</i> , kemajuan 1.5-3 m pada <i>heading</i> . Perkuatan dipasang setelah setiap peledakan. Perkuatan lengkap sejauh 10 m dari muka galian	Baut sistematis sepanjang 4 m, berjarak 1.5-2 m dalam <i>crow</i> n dan dinding, dengan <i>wire mesh</i> pada <i>crow</i> n.	50-100 mm pada <i>crow</i> n dan 30 mm pada sisi	Tidak ada
IV Buruk	21 - 40	10 jam untuk bentang 2,5 m	100-200	15-25	<i>Heading</i> atas dan <i>bench</i> . Kemajuan 1.0-1.5 pada <i>heading</i> atas. Perkuatan dipasang bersamaan dengan ekskavasi 10 m dari muka galian.	Baut sistematis sepanjang 4-5 m, berjarak 1-1.5 m dalam <i>crow</i> n dan dinding dengan <i>wire mesh</i> .	100-150 mm pada <i>crow</i> n dan 100 mm pada sisi	Rusuk ringan hingga sedang berjarak 1.5 m di lokasi yang dibutuhkan
V Sangat buruk	< 20	30 menit untuk bentang 1 m	<100	<15	Beberapa <i>drift</i> dengan kemajuan 0.5-1.5 m pada <i>heading</i> atas. Perkuatan dipasang bersamaan dengan ekskavasi.	Baut sistematis sepanjang 5-6 m, berjarak 1-1.5 m dalam <i>crow</i> n dan dinding dengan <i>wire mesh</i> . Baut pada <i>invert</i> .	150-200 mm pada <i>crow</i> n, 150 mm pada sisi, dan 50 mm pada muka galian	Rusuk sedang hingga berat berjarak 0.75 m dengan <i>steel lagging</i> dan <i>forepoling</i> jika

Kelas massa batuan	RMR (Bieniawski, 1989)	Stand-up time rata-rata	Kohesi massa batuan (kPa)	Sudut gesek dalam massa batuan (°)	Ekskavasi	Perkuatan		
						Baut batuan (diameter 20 mm digrouting seluruhnya)	Beton semprot	Set baja
					Beton semprot segera setelah peledakan.			dibutuhkan. Tutup <i>invert</i> .

3) *Geological Strength Index (GSI)*

Geological Strength Index (GSI) diusulkan oleh Hoek (1994) untuk menggantikan RMR sebagai salah satu parameter dalam kriteria keruntuhan Generalised Hoek-Brown karena RMR dianggap kurang sesuai digunakan untuk massa batuan berkualitas buruk. GSI kurang sesuai diterapkan pada batuan tanpa diskontinuitas dan massa batuan *highly anisotropic* karena kehadiran bidang diskontinuitas (Marinos et al., 2005).







Penilaian GSI didasarkan pada pengamatan parameter struktur massa batuan dan kondisi permukaan diskontinuitas dengan mengacu pada Gambar 12. Walaupun penilaian GSI secara kualitatif berdasarkan Gambar 12 sangat disarankan, penilaian GSI secara kuantitatif dapat dilakukan pada inti batuan hasil pengeboran menggunakan persamaan berikut (Hoek et al., 2013):

$$GSI = 1,5JCond_{89} + \frac{RQD}{2} \quad (6)$$

Keterangan dimana:

Jcond adalah *Joint Condition*;

RQD adalah *Rock Quality Designation*.

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)		SURFACE CONDITIONS				
<p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40		
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				30	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes					20
						10
		N/A	N/A			

Gambar 12 - Estimasi nilai GSI untuk massa batuan (Hoek and Marinos, 2000)

4) Klasifikasi Massa Batuan JSCE

Menurut JSCE (2007b, 2018b) yang tertuang dalam Surat Edaran Menteri PUPR No.: 30/SE/M/2015, massa batuan dapat dibagi menjadi 7 kategori untuk kepentingan perencanaan dan konstruksi terowongan (lihat Tabel 30). Penentuan kategori batuan dilakukan untuk menentukan metode penggalian terowongan, pemilihan sistem perkuatan dan *lining*, serta penentuan metode perkuatan tambahan (*auxiliary*). Penentuan metode penggalian dan sistem perkuatan, beserta hal-hal yang harus diperhatikan dalam klasifikasi batuan/tanah ini dapat diacu langsung dari JSCE (2007b, 2018b) dan PUPR (2015).

Tabel 30 - Klasifikasi massa batuan JSCE dalam Surat Edaran Kementerian PUPR (2015)

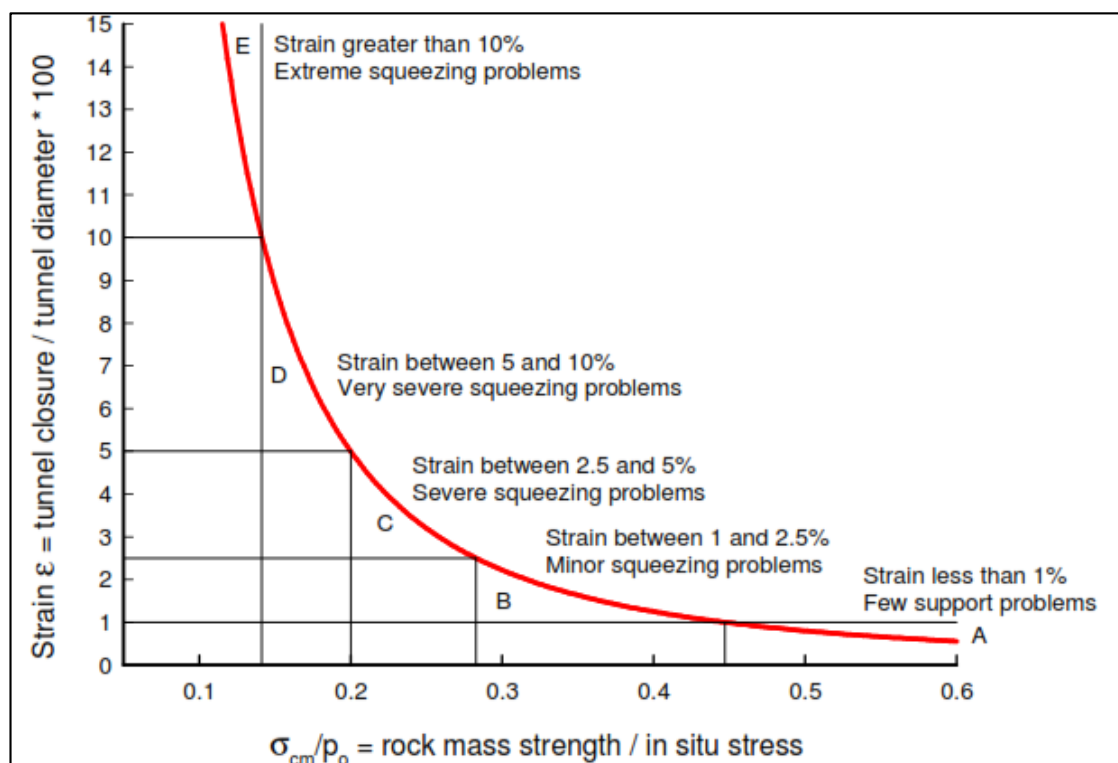
Kategori tanah/batuan	Jenis batuan	Nama batuan yang mewakili	Kecepatan gelombang elastik (Vp, km/detik)						Kondisi geologi			Kondisi inti pengeboran RQD	Faktor kompetensi tanah/batuan	Situasi penggalian terowongan dan standar pergerakan
			1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	Pengaruh oleh air dan karakter litologi	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 tandanda sedikit lapuk. Kondisi batuan tidak terlihat retak-retak karena air. 	Interval retakan rata-rata terlihat tandanda sekitar 50 cm.	<ul style="list-style-type: none"> Hampir tidak memiliki celin esar dan milonit (<i>fault clay</i>) 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, basalt, nolit, dasit												
	L Masif	Batupasir atau konglomerat Tersier												
	M Berlapis	Serpentin, tuf, breksi tuf												
	L Berlapis	Batu sabak (<i>slate</i>), Serpih Paleozoikum & Mesozoikum												
C I	L Berlapis	Batulumpur Tersier						<ul style="list-style-type: none"> Batuan relatif keras dan segar atau terlihat tandanda 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 celin esar dan milonit pada diskontinuitasnya. 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 jatuhan 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>) 	
	H Masif	Granit, granodiorit, porfiri kuarsa, batu tanduk												
	M Masif	Andesit, basalt, nolit, dasit												
	L Masif	Batupasir atau konglomerat Tersier												
	M Berlapis	Serpentin, tuf, breksi tuf												
C II	L Berlapis	Batu sabak, Serpih Paleozoikum & Mesozoikum						<ul style="list-style-type: none"> 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 celin esar 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 mempengaruhi, konvergensi karena penggalian dicapai pada sekitar 30 mm yang merupakan batas elastis-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>) 	
	H Masif	Granit, granodiorit, porfiri kuarsa, batu tanduk												
	M Masif	Andesit, basalt, nolit, dasit												
	L Masif	Batupasir atau konglomerat Tersier												
	M Berlapis	Serpentin, tuf, breksi tuf												
D I	L Berlapis	Batu sabak, Serpih Paleozoikum & Mesozoikum						<ul style="list-style-type: none"> Kondisi batuan sebagian masih segar, tetapi umumnya batuan mengalami pelapukan dan alterasi yang kuat. Perlipasan 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 celin esar (<i>stickenside</i>) and telah mengalami milonitisasi (<i>fault clay</i>). Batuan di dalam patahan kecil yang sempit dan berisi lempung. Material tanah bercampur dengan banyak batu apung, tatus, dll. Terlihat retak-retak atau lepas-lepas dengan sangat jelas karena air. 	Interval retakan rata-rata sekitar 20 cm.	<ul style="list-style-type: none"> Memiliki celin esar 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 cincin (<i>ring cuts</i>) and mengaplikasikan beton semprot pada muka bidang galian sesuai dengan kondisi tanah/ground. 	
	H Masif	Granit, granodiorit, porfiri kuarsa, batu tanduk												
	M Masif	Andesit, basalt, nolit, dasit												
	L Masif	Batupasir atau konglomerat Tersier												
	M Berlapis	Serpentin, tuf, breksi tuf												
D II	L Berlapis	Batu sabak, Serpih Paleozoikum & Mesozoikum						<ul style="list-style-type: none"> 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) 	Interval retakan rata-rata sekitar 20 cm.	<ul style="list-style-type: none"> Memiliki celin esar 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. 	
	H Masif	Granit, granodiorit, porfiri kuarsa, batu tanduk												
	M Masif	Andesit, basalt, nolit, dasit												
	L Masif	Batupasir atau konglomerat Tersier												
	M Berlapis	Serpentin, tuf, breksi tuf												
E	L Berlapis	Batu sabak, Serpih Paleozoikum & Mesozoikum						<ul style="list-style-type: none"> Sesar, daerah patahan, daerah rombakan lereng besar, dll. Mengandung formasi lempung dengan tekanan tanah tidak simetris. Perlunakan akibat perusak oleh air. 	Interval retakan rata-rata sekitar 20 cm.	<ul style="list-style-type: none"> Memiliki celin esar 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. 	1 atau lebih kecil	<ul style="list-style-type: none"> Tanah terjerpit akan terjadi pada muka bidang galian, dan dapat runtuh. Fenomena tanah terjerpit akibat tekanan akan terjadi jika bukaan yang tidak disangga. 	
	L Berlapis	Batulumpur Tersier												

Catatan:
 1) Pembagian H, M, L: berdasarkan kekuatan pada batuan utama dan kondisi batuan segar, yang akan dibagi dengan kuat tekan uniaxial sebagai berikut:
 H: $q_u \geq 80 \text{ N/mm}^2$, M: $20 \text{ N/mm}^2 \leq q_u < 80 \text{ N/mm}^2$, L: $q_u < 20 \text{ N/mm}^2$
 2) Pembagian untuk Masif, Berlapis:
 Masif: batuan dimana bidang retakan menjadi permukaan diskontinuitas yang dominan.
 Berlapis: batuan dimana bidang perlipasan 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 retakan (*essure*).

5.2.6 Batuan berpotensi *squeezing* dan *rock burst*

- Squeezing* dan *rock burst* adalah kondisi geologi teknik khusus yang perlu diidentifikasi dalam proyek terowongan jalan tol. *Squeezing* ditemui pada massa batuan yang memiliki rasio kekuatan massa batuan terhadap tegangan in-situ yang kecil, dan menyebabkan regangan (*strain*) yang besar. *Rock burst* ditemui pada terowongan dengan massa batuan yang mengalami tegangan sangat besar, baik karena kedalaman yang sangat besar dan/atau kehadiran sesar aktif.
- Fenomena *squeezing* yang ditemui harus diklasifikasikan dahulu berdasarkan regangannya (*strain*). Klasifikasi batuan *squeezing* berdasarkan regangan yang terjadi ditunjukkan pada **Error! Reference source not found.** Identifikasi dan klasifikasi *squeezing* ini didasarkan pada hubungan antara regangan (*strain*) dengan rasio kekuatan massa batuan dan tegangan in-situ. **Error! Reference source not found.** menunjukkan kelas *squeezing* berdasarkan regangan, permasalahan geoteknik yang ditemui, serta tipe perkuatan umum yang direkomendasi.
- Penentuan spesifikasi dan sistem perkuatan untuk terowongan yang melewati batuan *squeezing* lebih rinci dapat dilihat dalam Hoek (2000), JSCE (2018b), dan SNI 8460:2017 (BSN, 2017).



Gambar 13 - Klasifikasi *squeezing* berdasarkan regangan massa batuan (*strain*) dan rasio kekuatan massa batuan dengan tegangan in-situ (Hoek, 2000)

Tabel 31 - Kelas *squeezing* berdasarkan regangan, permasalahan geoteknik yang dialami, serta tipe perkuatan yang direkomendasikan (Hoek dan Marinos, 2000)

Kelas <i>squeezing</i>	Regangan ϵ (%)	Permasalahan geoteknik	Tipe perkuatan
A (<i>no squeezing/few support problems</i>)	< 1	Sedikit permasalahan kestabilan dan metode perancangan sistem perkuatan terowongan yang sangat sederhana dapat digunakan. Rekomendasi perkuatan terowongan berdasarkan klasifikasi massa batuan menyediakan dasar yang cukup untuk perancangan.	Kondisi penerowongan yang sangat sederhana, <i>rockbolts</i> dan <i>shotcrete</i> umum digunakan sebagai perkuatan.
B (<i>minor squeezing</i>)	1-2,5	Metode pembatasan konvergensi (<i>convergent confinement</i>) digunakan untuk memprediksi pembentukan zona plastik pada massa batuan di sekitar terowongan dan interaksi antara perkembangan zona ini serta jenis sistem perkuatan yang diperlukan.	Permasalahan <i>squeezing</i> minor yang umumnya ditanggulangi dengan <i>rockbolts</i> dan <i>shotcrete</i> , terkadang dengan <i>light steel sets</i> atau <i>lattice girders</i> yang ditambahkan untuk keamanan tambahan.
C (<i>severe squeezing</i>)	2,5-5	Analisis elemen hingga 2 dimensi dengan model yang melibatkan elemen perkuatan dan tahap penggalian biasanya digunakan untuk masalah <i>squeezing</i> ini. Kestabilan muka galian umumnya bukan merupakan masalah utama.	Permasalahan <i>squeezing</i> parah yang membutuhkan pemasangan sistem perkuatan dengan cepat dan mengontrol kualitas konstruksi secara hati-hati. <i>Heavy steel sets</i> yang ditanam dalam <i>shotcrete</i> biasanya dibutuhkan sebagai sistem perkuatan.
D (<i>very severe squeezing</i>)	5-10	Perancangan terowongan didominasi oleh masalah kestabilan muka galian. Analisis elemen hingga 2 dimensi umumnya dilakukan, dengan tambahan estimasi efek <i>forepoling</i> dan perkuatan muka galian.	Permasalahan <i>squeezing</i> dan kestabilan muka galian yang sangat parah. Sistem perkuatan umumnya berupa <i>forepoling</i> dan perkuatan muka galian dengan <i>steel sets</i> yang ditanam dalam <i>shotcrete</i> .
E (<i>extreme squeezing</i>)	>10	Masalah kestabilan yang parah pada muka galian bersamaan dengan <i>squeezing</i> terowongan menghasilkan masalah 3 dimensi yang sangat sulit, dimana tidak ada metode perancangan efektif yang tersedia. Penentuan sistem perkuatan dan penanggulan pada kasus ini mengutamakan pengalaman.	Permasalahan <i>squeezing</i> ekstrim. <i>Forepoling</i> dan perkuatan muka galian umumnya diaplikasikan, pada beberapa kasus ekstrim <i>yielding support</i> bisa dibutuhkan.

d. Pengkajian risiko *rock burst* sangat penting dalam penggalian bawah tanah untuk mengetahui penanggulangan dan sistem perkuatan yang perlu diaplikasikan. Terdapat 5 parameter yang digunakan untuk menilai risiko *rock burst*:

- 1) Kedalaman : semakin dalam penggalian dari permukaan tanah, tegangan vertikal dan energi elastik yang dialami massa batuan bertambah, sehingga potensi *rock burst* meningkat.
- 2) Tegangan tektonik : akumulasi energi dalam massa batuan merupakan gabungan efek tegangan dan deformasi, sehingga kondisi tegangan adalah indikator penting dari *rock burst*.
- 3) Kecepatan vertikal pergerakan kerak bumi : *rock burst* cenderung lebih sering terjadi pada area yang berada pada kerak bumi yang naik.
- 4) Sesar aktif : *rock burst* paling banyak ditemui pada area yang berada dekat dengan sesar aktif besar. Jarak pengaruh aktivitas sesar aktif ditunjukkan dengan rumus berikut:

$$b = K \cdot 10 h \quad (7)$$

Keterangan:

K (=1,2,3) adalah koefisien aktivitas sesar aktif;

h adalah *vertical drop* dari sesar (dalam meter).

Nilai K=1 jika sesar lemah (laju pergerakan horizontal >1 mm/tahun dan sejarah gempa bumi berkekuatan $M \geq 7$), nilai K=2 jika sesar sedang (laju pergerakan horizontal 0,1-1 mm/tahun dan sejarah gempa bumi berkekuatan $5 \leq M < 7$), dan nilai K=3 jika sesar kuat (laju pergerakan horizontal <0,1 mm/tahun dan sejarah gempa bumi berkekuatan $M < 5$).

- 5) Persentase batuan keras pada atap galian: massa batuan yang berada 100 m dari atap galian memiliki pengaruh yang besar terhadap *rock burst*. Semakin banyak batuan keras (UCS > 35 MPa), kekuatan atap galian cenderung meningkat.

Error! Reference source not found. menunjukkan penilaian risiko *rock burst* berdasarkan parameter-parameter yang telah disebutkan. Evaluasi risiko *rock burst* yang lebih jauh secara analitik dapat menggunakan *fuzzy comprehensive evaluation method* dan *analytic hierarchy process* (AHP) yang dapat diacu dalam publikasi oleh Zhu et al. (2018).

Tabel 32 - Penilaian risiko *rock burst* berdasarkan parameter geodinamik (Zhu et al., 2018)

Kedalaman (h)	$h \leq 400$ m	$400 \text{ m} < h \leq 600$ m	$600 \text{ m} < h \leq 800$ m	$h > 800$ m
Risiko <i>rockburst</i>	Dapat diabaikan	Kecil	Sedang	Risiko serius
Rasio tegangan utama horizontal maksimal terhadap tegangan vertikal (λ)	$\lambda < 1$	$1,0 \leq \lambda < 3$	$1,3 \leq \lambda < 2,0$	$\lambda \geq 2,0$
Risiko <i>rockburst</i>	Dapat diabaikan	Kecil	Sedang	Risiko serius
Kecepatan vertikal pergerakan kerak bumi (mm/tahun)	$-3 \leq x \leq -1$	$x < -3$	$x \geq 1$	$-1 < x < 1$
Risiko <i>rockburst</i>	Dapat diabaikan	Kecil	Sedang	Risiko serius
Hubungan antara posisi ekskavasi dan area dampak sesar aktif (b)	$x > b$	$0,5 b < x \leq b$	$0,3 b < x \leq 0,5 b$	$x \leq 0,3 b$
Risiko <i>rockburst</i>	Dapat diabaikan	Kecil	Sedang	Risiko serius
Persentase batuan keras dalam area sejauh 100 m dari atap penggalian	$< 20\%$	20-50%	50-80%	$\geq 80\%$
Risiko <i>rockburst</i>	Dapat diabaikan	Kecil	Sedang	Risiko serius

5.3 Penyelidikan struktur geologi

Penyelidikan struktur geologi dilakukan dalam perencanaan terowongan jalan. Struktur geologi dapat menjadi zona lemah, bidang gelincir blok batuan, atau jalur rembesan airtanah ke dalam terowongan saat penggalian (Tabel 8). Selain itu, pergerakan sesar aktif dapat menghasilkan gempa bumi dan keruntuhan batuan dan tanah di sepanjang zona sesar sehingga dapat memberikan masalah keamanan pada saat konstruksi maupun pasca konstruksi terowongan. Penyelidikan sesar aktif dapat dilihat pada bagian 5.5.1.

Tahapan penyelidikan struktur geologi secara umum adalah sebagai berikut:

- a. Pada tahap Pra-Studi Kelayakan, penyelidikan struktur geologi diawali dengan studi pustaka. Semua dokumen yang mengandung informasi mengenai struktur geologi di lokasi konstruksi dikumpulkan dan dikaji. Informasi dapat berasal dari peta geologi

regional, laporan pekerjaan konstruksi terdahulu di sekitar lokasi, publikasi, maupun dokumen lain (Tabel 10). Selanjutnya, penyelidikan geomorfologi dilakukan untuk mengidentifikasi fitur-fitur geomorfologi yang mencerminkan kehadiran struktur geologi, seperti pola pengaliran sungai, perubahan aliran sungai, deretan mataair, kelurusan lembah, gawir sesar, *triangular facet*, dan lain-lain (Bagian 5.1). Struktur geologi yang diidentifikasi dari studi pustaka dan studi geomorfologi digambarkan dalam suatu peta geologi tentatif yang dikonfirmasi kebenarannya secara langsung dalam pemetaan geologi (Bagian 5.2.1).

- b. Pada tahap Studi Kelayakan hingga Konstruksi, fitur-fitur geomorfologi menyerupai rekahan di permukaan harus dikonfirmasi dalam pemetaan geologi lapangan sebagai sesar akibat proses tektonik atau fitur pseudotektonik (antara lain rekahan-rekahan yang berasosiasi dengan pembentukan dan keruntuhan kubah vulkanik dan diapir/kubah garam atau rekahan pada sumbu lipatan, tebing-tebing linier yang diekskavasi sepanjang zona batuan lemah, erosi selektif sepanjang gawir sesar, dan fitur buatan manusia seperti sistem irigasi lampau dan jalan).
- c. Pengukuran karakteristik sesar, antara lain orientasi dan kemenerusan bidang sesar, kedudukan struktur garis pada bidang sesar (*pitch*, *trend*, dan *plunge*), dilakukan untuk memperoleh informasi arah dan besar pergerakan bidang sesar dan jenis sesar. Pengukuran orientasi bidang sesar, kekar, perlapisan batuan sedimen, dan foliasi batuan metamorf di permukaan, dilakukan untuk memperoleh informasi arah gaya tektonik di masa lampau dan kemungkinan arah tegangan utama in situ yang masih bekerja. Arah tegangan in situ utama harus menjadi salah satu pertimbangan dalam pemilihan rute terowongan untuk menghindari masalah dalam penggalian terowongan dan dalam pemilihan sistem penyangga terowongan.
- d. Survei geofisika (Bagian 5.2.3) dan pengeboran inti (Bagian 5.2.3.2) dilakukan untuk menginterpretasikan kehadiran struktur geologi yang tidak teridentifikasi di permukaan. Selain survei geofisika di permukaan, identifikasi jenis dan sebaran struktur geologi dapat dilakukan dengan logging seismik dan elektrik dan pengamatan menggunakan *borehole scanner* dalam lubang bor. Pembuatan parit uji atau terowongan eksplorasi di dekat trase terowongan direkomendasikan untuk memastikan sebaran struktur geologi.

Berbeda dengan terowongan perisai, terowongan pegunungan umumnya terletak pada lokasi konstruksi yang relatif stabil, sehingga secara umum tidak perlu mempertimbangkan efek dari gempa bumi. Namun, terowongan pegunungan mungkin mengalami kerusakan akibat gempa bumi pada beberapa kondisi, antara lain terowongan pada lokasi *overburden* tipis, zona sesar, tegangan in situ besar, dan batas perlapisan antara *unconsolidated materials* dan massa batuan.

5.4 Penyelidikan airtanah

Kondisi geologi sangat mempengaruhi karakteristik aliran airtanah pada batuan atau tanah. Jenis kondisi airtanah dan aliran airtanah berdasarkan kondisi geologinya beserta pengaruhnya terhadap pembangunan terowongan dan penyelidikan yang perlu dilakukan adalah sebagai berikut (USACE, 1997):

- a. Aliran *porous* (*porous flow*) terjadi pada material geologi dengan pori dan rongga yang saling terhubung, sementara kekar dan diskontinuitas lain tertutup atau berspasi jauh, sehingga bukan menjadi pengontrol aliran. Contohnya adalah pada sebagian besar sedimen tak terkonsolidasi (lanau, pasir, kerikil) dan banyak batuan sedimen (batulanau, batupasir, konglomerat, dan batuan berpori lain dengan diskontinuitas sedikit atau tertutup). Permeabilitas material-material ini dapat diperkirakan dengan akurasi cukup baik dengan uji *packer* dalam lubang bor. Karakterisasi material tak terkonsolidasi seringkali dilakukan menggunakan uji pemompaan dengan sumur observasi untuk mengukur penurunan muka airtanah (*drawdown*) sebagai fungsi dari laju pemompaan.
- b. Aliran retakan (*fracture flow*) mendominasi material geologi dengan permeabilitas dan porositas yang rendah pada batuan utuhnya (*intact rock*), sebagian besar batuan beku dan metamorf, dan batuan sedimen (termasuk serpih/*shale*, batugamping, dan dolomit). Aliran retakan sangat sulit untuk ditentukan, dikarakterisasi, dan diprediksi karena variabilitas alami dari retakan yang tinggi.
- c. Aliran melalui retakan terbuka dapat dihitung secara teoritis, dengan mengasumsikan bidang-bidang sejajar dari retakan atau kekar. Aliran akan bertambah, untuk gradien yang sama, seiring besarnya bukaan/apertur retakan. Akan tetapi, kekar asli memiliki apertur yang beragam, dan biasanya tertutup sebagian, sehingga sebagian besar aliran akan melewati jalur-jalur rumit yang paling mudah dilalui. Fenomena ini disebut aliran jalur (*flow channeling*). Pada kasus ini, pemetaan retakan yang ekstensif pada singkapan atau dalam lubang bor tidak dapat memfasilitasi prediksi aliran airtanah ke dalam terowongan secara akurat.
- d. Pengukuran langsung aliran airtanah pada suatu gradien dengan uji *packer* lebih dapat diandalkan untuk mengetahui karakteristik hidrologi dari massa batuan yang terkekarkan. Hasil pengujian ini menghasilkan pengukuran permeabilitas, yang dapat menjelaskan seluruh efek dari retakan terhadap aliran airtanah. Pengujian dengan jumlah yang banyak direkomendasikan untuk mendapatkan data statistik yang dapat mewakili massa batuan dengan baik.
- e. Pada massa batuan dengan retakan/kekar yang memiliki spasi (jarak antar retakan/kekar) yang lebar relatif terhadap ukuran bukaan bawah tanah, aliran airtanah yang signifikan akan terjadi melalui tiap-tiap retakan/kekar. Jenis aliran airtanah ini ke

dalam terowongan sangat sulit untuk diprediksi. Di sisi lain, jumlah air yang tersimpan dalam tiap retakan kecil, dan debit aliran akan berkurang dengan cepat seiring waktu, kecuali retakan mendapatkan imbuhan air dari lokasi yang dekat.

- f. Pada massa batuan dengan retakan/kekar yang memiliki spasi kecil (5-50 kekar sepanjang bukaan), beberapa retakan sangat mungkin mendominasi jalur aliran airtanah. Rembesan dapat diprediksi berdasarkan jumlah uji *packer* yang cukup, namun tidak terlalu akurat.
- g. Sesar-sesar kecil seringkali menjadi sumber aliran retakan ke dalam terowongan. Sesar atau *shear zone* yang lebih besar diketahui dapat menghasilkan rembesan ke dalam terowongan hingga 3.600 L/detik (USACE, 1997). Permeabilitas material geologi dalam suatu *shear zone* dapat sangat bervariasi, tergantung apakah zona tersebut mengandung batuan hancur dan terpotong atau material pengisi berupa lempung (*clay gouge*) atau endapan sekunder yang tidak permeabel. Pada banyak kasus, sesar bertindak sebagai batas antara 2 wilayah hidrologi. Hal ini terjadi jika permeabilitas material dalam zona sesar lebih rendah dibanding material di sekitarnya yang lebih permeabel. Dengan demikian, tekanan air pori bisa sangat berbeda jauh pada sisi bidang sesar yang berbeda/berlawanan. Penggalan terowongan melalui sesar dari sisi tekanan air pori lebih rendah dapat menyebabkan rembesan airtanah yang terjadi secara tiba-tiba dan tidak terduga.
- h. Kehadiran *dike* dapat mempengaruhi kondisi aliran airtanah. *Dike* merupakan suatu tubuh batuan beku intrusif yang memotong lapisan-lapisan batuan yang lebih tua. Pembentukan *dike* seringkali mengganggu dan meretakkan material *host* yang dilewatinya. Permeabilitas material *host* yang dekat dengan *dike* dapat beberapa kali lebih besar dari tubuh utama dari massa batuan. Di sisi lain, jika tidak mengalami retakan intensif, *dike* umumnya sangat padat dan impermeabel, sehingga bertindak sebagai batas airtanah, seperti sesar yang telah dijelaskan pada poin sebelumnya. Dengan demikian, terowongan yang digali melewati banyak *dike* harus memberikan perhatian khusus pada persebaran *dike*, variabilitas tekanan air pori dan muka airtanah.
- i. Batas antara batuan dan *overburden* dapat mempengaruhi kondisi aliran airtanah. Karena umumnya batuan dasar (*bedrock*) lebih impermeabel dibanding *overburden*, airtanah *perched* seringkali ditemukan tepat diatas batas antara batuan dasar dan *overburden*. Sedimen/tanah berbutir kasar seringkali ditemukan di atas batuan dasar. Tanah residual kohesif di atas batuan dasar juga seringkali memiliki retakan dan mengandung air. Dengan demikian, penting untuk memberikan perhatian terhadap permukaan batuan dasar, karena dapat menyebabkan kesulitan pada konstruksi *shaft* dan *incline*, begitu pula terowongan pada media campuran tanah dan batuan (*mixed-face tunneling*).

- j. Batuan dan mineral yang mudah larut, diantaranya batugamping (mengandung kalsit), gipsum, anhidrit, halit, dan batuan yang tersementasi oleh atau mengandung jenis-jenis material tersebut. Kasus yang paling sering yaitu pelarutan pada batugamping yang dapat menghasilkan rongga-rongga karst yang terisi airtanah sehingga sulit dan berbahaya jika dilalui penggalian terowongan (lihat bagian 5.4.7). Di sisi lain, batugamping yang belum mengalami karstifikasi dapat menjadi media yang ideal untuk terowongan karena penggaliannya yang mudah dan *stand-up time* yang lama.
- k. Kehadiran air termal perlu diperhatikan dalam pembangunan terowongan. Air termal merupakan air panas yang dapat bersumber dari air meteorik atau air magmatik yang mengalami kontak dengan lapisan batuan yang panas, atau campuran antara keduanya. Beberapa daerah di Indonesia memiliki sumber panas magmatik yang masih aktif, contohnya pada area geotermal, sehingga pembuatan terowongan melalui area ini perlu penyelidikan mengenai air termal secara komprehensif. Air termal yang mengalami pemanasan di dalam tanah naik ke permukaan melalui jalur-jalur seperti patahan. Selain permasalahan keamanan akibat potensi rembesan air termal ke dalam terowongan, air termal juga sulit untuk dikelola dan dibuang dalam cara yang dapat diterima dengan baik pada lingkungan hidup.

Pada tahap Pra-Studi Kelayakan, penyelidikan airtanah dilakukan melalui studi pustaka. Studi pustaka dilakukan berdasarkan dokumen yang tersedia, antara lain peta geomorfologi, peta geologi, peta hidrologi dan hidrogeologi, data hasil pengeboran airtanah, data hasil survei geofisika, data hidroklimatologi dan hidrologi, dan data hasil penyelidikan hidrogeologi lain. Studi dilakukan untuk mendapatkan data dan informasi aliran air permukaan, kualitas airtanah, kontur muka airtanah, pola aliran airtanah, lokasi dan karakteristik akuifer di lokasi konstruksi dan sekitarnya secara umum (USACE, 2001).

Pada tahap Studi Kelayakan hingga Konstruksi, penyelidikan airtanah dilakukan melalui pengukuran muka airtanah, pengukuran permeabilitas, piezometer, uji pemompaan airtanah, uji akuifer, prediksi aliran airtanah ke dalam terowongan, uji kualitas airtanah, serta kajian risiko rembesan airtanah pada area kars. Seluruh sumur air eksisting di lokasi sekitar rencana terowongan harus dipetakan dan dilakukan kajian dan pengukuran muka airtanah. Hasil penyelidikan airtanah digunakan bagi penyusunan sistem hidrogeologi dan dituangkan dalam peta, penampang, dan model hidrogeologi, antara lain jenis dan sistem konfigurasi akuifer airtanah, kontur muka airtanah, jumlah dan arah aliran airtanah, kualitas airtanah. Penyelidikan airtanah dalam konteks penyelidikan hidrologi secara umum dirangkum dalam Tabel 33.

Tabel 33 – Metode penyelidikan airtanah (modifikasi dari JSCE, 2018b)

Perihal	Tujuan penyelidikan	Jenis Penyelidikan	Tahap				Keterangan	
			Pra-Studi Kelayakan dan Studi Kelayakan	Rencana Teknik Awal dan Akhir	Konstruksi	Pemeliharaan		
Kategori investigasi hidrologi	Data	<ul style="list-style-type: none"> Geomorfologi dan geologi Meteorologi hidrologi: curah hujan, temperatur, dll. Penggunaan air tanah: sumur, irigasi, dll. 	⊙	⊙	○	○		
	Studi kasus	<ul style="list-style-type: none"> Evaluasi rembesan airtanah dan kisaran pengurangan air pada terowongan rencana Pengkajian kelayakan berbagai metode investigasi 	⊙	○	○	○		
	Investigasi hidrogeologi	Penyelidikan jenis & konfigurasi sistem akuifer airtanah, karakteristik akuifer, dan sifat-sifat fisik dan kimia airtanah untuk memperkirakan zona aliran airtanah, area imbuhan airtanah, jumlah aliran, dan kualitas airtanah	Analisis kondisi geomorfologi dan geologi	⊙	⊙	●	○	Lihat bagian 5.1 dan 5.2.1
			Survei aspek hidrogeologi dan hidrologi pada sumur gali, sumur bor, mata air, sungai, dll	⊙	⊙	●	○	
			Survei geofisika	●	⊙	○	○	Lihat bagian 5.2.3
			Pengeboran eksplorasi airtanah	●	⊙	○	○	
			Logging lubang bor	○	○	○	○	
			Uji permeabilitas lubang bor (contohnya metode piezometer)	●	⊙	○	○	Lihat bagian 5.4.2
			Uji tekanan rembesan air, uji injeksi	●	⊙	●	○	Uji injeksi dapat mengacu SNI 03-6436-2000
			Uji pemompaan, uji <i>crosshole</i>	●	⊙	○	○	Lihat bagian 5.4.3 dan 5.4.4
			Uji <i>tracer</i> , uji arah dan kecepatan aliran air tanah	○	○	○	○	
			Uji reduksi kedalaman air tanah	○	○	○	○	
	Uji kualitas airtanah (in-situ dan laboratorium)	○	●	●	●	Lihat bagian 5.4.5		
	Keseimbangan air	Meteorologi hidrologi, jumlah aliran air permukaan, muka air tanah, dll diselidiki untuk mengkaji keseimbangan air, untuk memprediksi perilaku air tanah selama konstruksi	Meteorologi hidrologi: curah hujan, temperatur	⊙	⊙	⊙	⊙	
Aliran air permukaan: jumlah aliran sungai, danau, waduk, irigasi, mata air, dll.			⊙	⊙	⊙	⊙		
Muka air tanah: sumur observasi, sumur eksisting			⊙	⊙	⊙	⊙	Lihat bagian 5.4.1	
Laju evaporasi			●	●	●	●		

Perihal	Tujuan penyelidikan	Jenis Penyelidikan	Tahap				Keterangan
			Pra-Studi Kelayakan dan Studi Kelayakan	Rencana Teknik Awal dan Akhir	Konstruksi	Pemeliharaan	
		Rembesan dalam terowongan, pengaruh pengurangan air	○	○	⊙	⊙	Lihat bagian 5.4.6
Lingkungan hidrologi	Untuk mengkaji sumberdaya air dan penggunaan air di area imbuhan air dan sekitarnya, untuk dapat memprediksi dampak konstruksi terhadap air tanah dan penggunaannya	Sumberdaya air: mata air, sungai, danau, waduk, sumur, curah hujan efektif	⊙	⊙	●	●	
		Penggunaan air: suplai air dan jalur pembuangan, air untuk keperluan industri dan agrikultur	●	⊙	●	●	
Metode prediksi	Untuk memprediksi kemungkinan rembesan air, jumlahnya, lokasi, dan area imbuhan air	Contoh konstruksi terdahulu	⊙	●	○	○	Lihat bagian 5.4.6
		Kondisi geografi dan hidrogeologi	●	⊙	○	○	
		Rumus-rumus hidrolika	●	⊙	○	○	
		Analisis numerik	○	○	○	○	
○: Penyelidikan dilakukan jika diperlukan ●: Penyelidikan direkomendasikan ⊙: Penyelidikan dilakukan sebagai penyelidikan penting							

5.4.1 Pengukuran muka airtanah

- a. Muka airtanah statis diukur dan dimonitor secara akurat menggunakan sumur observasi airtanah. Sumur observasi airtanah secara umum tidak terisolasi pada zona atau lapisan tertentu, akan tetapi memberikan gambaran umum terhadap muka airtanah, sehingga lebih tepat untuk lokasi konstruksi dengan kondisi bawah permukaan yang seragam.
- b. Sumur observasi sebaiknya diamati pada periode waktu yang lama untuk menghasilkan informasi variasi musiman dari muka airtanah (FHWA, 2009). Muka airtanah biasanya diukur dari pekerjaan pengeboran. Muka airtanah dan muka air piezometrik mengalami fluktuasi akibat musim atau buatan manusia, sehingga penting untuk mencatat kondisi ketika dilakukan pengukuran dan perubahan muka airtanah dalam jangka waktu panjang. Tekanan air pori masing masing lapisan permeabel juga penting untuk diukur.
- c. Pada tanah berlapis dengan dua atau lebih akuifer, tekanan airtanah dapat berbeda tergantung dengan kedalamannya. Pada kondisi beragam tersebut pengukuran muka airtanah dilakukan menggunakan piezometer. Piezometer memiliki penutup yang mengisolasi *screen* atau sensor pada zona atau lapisan tertentu dalam perlapisan tanah, sehingga menghasilkan pengukuran tekanan air pada zona tersebut.
- d. Pemasangan piezometer melalui lubang bor yang telah dipersiapkan perlu dilakukan untuk memantau tekanan air pori tanah yang meliputi pengukuran muka air tanah,

perhitungan dan penggambaran grafik tentang hubungan antara waktu dan besarnya tekanan air pori tanah.

- e. Piezometer sebaiknya diobservasi pada periode waktu yang lama untuk menghasilkan informasi variasi musiman dari muka airtanah (FHWA, 2009).

5.4.2 Pengukuran permeabilitas lubang bor

Permeabilitas adalah salah satu parameter akuifer yang penting untuk diketahui dalam proyek pembangunan terowongan. Permeabilitas dapat mempengaruhi besarnya rembesan airtanah ke dalam terowongan, dan sebagai salah satu parameter kontrol untuk mengevaluasi dampak pembangunan terowongan terhadap airtanah.

Uji permeabilitas lubang bor memberikan pengukuran permeabilitas tanah dan batuan dengan biaya yang rendah. Uji permeabilitas lubang bor sangat berguna terutama pada material seperti pasir dan kerikil yang sulit dilakukan pengambilan sampel tak terganggu untuk uji permeabilitas di laboratorium.

- a. Uji permeabilitas pada tanah antara lain dengan metode *falling head test*, *rising head test* dan *constant head test*. *Rising head* maupun *falling head test* digunakan untuk uji material tanah dengan permeabilitas rendah, sedangkan material tanah dengan permeabilitas tinggi diuji dengan *constant head test*.
- b. Uji permeabilitas pada batuan dilakukan menggunakan *pressure* atau "*packer*" *test*. *Packer test* dilakukan dengan memaksa air di bawah tekanan ke dalam batuan di sekitar lubang bor. Uji ini menentukan permeabilitas semu massa batuan dan menghasilkan pengukuran kualitatif dari kualitas batuan. Pengujian dilakukan dengan memilih seberapa panjang dari lubang bor untuk diuji, kemudian mengisi *packer* (lengan silinder karet) dengan udara di atas zona uji untuk mengisolasi bagian lubang bor yang diuji. Kemudian uji *packer* dapat dilakukan secara intermitten seiring pemboran. Uji Lugeon atau uji *packer* merupakan uji tekanan air dimana satu bagian dari lubang bor diisolasi dan air dipompa ke dalam bagian tersebut hingga kecepatan airnya konstan. Satu Lugeon = kehilangan air dari 1 liter/menit/panjang dari bagian uji pada tekanan efektif 1 MPa. 1 Lugeon kira-kira setara dengan 10^{-7} m/s (Look, 2014). Indikasi kondisi kekar massa batuan dari uji Lugeon ditunjukkan pada Tabel 34.

Tabel 34 - Indikasi kondisi kekar massa batuan berdasarkan uji Lugeon (Look, 2014)

Lugeon	Kondisi kekar
<1	Tertutup atau tidak ada kekar
1-5	Kekar kecil terbuka
5-50	Beberapa kekar terbuka
>50	Banyak kekar terbuka

5.4.3 Uji pemompaan sumur

- a. Uji pemompaan sumur (*well test*) merupakan pengujian yang dilakukan dengan memompa sumur selama beberapa waktu dan mengamati perubahan muka airtanah pada akuifer. Tes pemompaan dapat digunakan untuk menentukan kapasitas sumur dan sifat hidrolika akuifer.
- b. Hal yang menjadi inti dari *pumping test* ini adalah perbandingan antara penurunan muka air pada saat *pumping* terhadap kenaikan muka air pada saat *recovery* dalam tenggat waktu yang sama. Untuk mendapatkan nilai debit sesungguhnya dari sumber dapat diketahui dengan mengalikan luas area sumber dengan tinggi kenaikan muka air rata-rata pada saat *recovery*.
- c. Uji pemompaan digunakan untuk menentukan hasil air (*water yield*) dari suatu sumur dan permeabilitas dari material bawah permukaan in-situ pada area yang luas. Data tersebut menghasilkan informasi penting untuk memprediksi rembesan airtanah selama penggalian terowongan; kuantitas air yang mungkin dibutuhkan untuk dipompa untuk menurunkan muka airtanah; dan radius pengaruh untuk pekerjaan pemompaan.

5.4.4 Uji pemompaan akuifer

- a. Uji akuifer (*aquifer test*) perlu dilakukan untuk mengetahui sifat hidrolika akuifer, terutama akuifer yang mempengaruhi dan dipengaruhi oleh pembangunan terowongan. Uji akuifer (UA) adalah pengujian sifat-sifat hidrolika akuifer melalui proses pemompaan, dengan debit tetap maupun debit berubah. Metode pengujian tergantung pada jenis akuifer yang akan diuji, seperti yang ditunjukkan pada acuan normatif. Teknik ini diyakini menghasilkan estimasi sifat hidrolika akuifer yang paling tepat, serta perhitungan debit sumur optimum atau sering disebut debit aman (*safe yield*). Dengan uji akuifer, juga akan didapatkan profil penurunan muka airtanah dalam proses pemompaan.
- b. Uji akuifer penting dilakukan untuk memahami karakteristik akuifer dalam hubungannya terhadap proses pembangunan terowongan, termasuk perancangan sistem drainase (baik selama konstruksi maupun pasca-konstruksi) dan program proteksi airtanah.
- c. Uji akuifer (uji pemompaan) dilaksanakan untuk mengevaluasi karakteristik akuifer dengan menstimulasi akuifer melalui pemompaan dan observasi terhadap respon aquifer berupa penurunan muka airtanah. Pengujian ini juga umum dilakukan untuk mengkarakterisasi sistem akuifer, akuitar, pola aliran, dan batas aliran (*flow system boundaries*) bila ada.
- d. Uji pemompaan yang biasa dilaksanakan dalam uji akuifer menggunakan debit konstan pada periode minimum satu hari (atau 24 jam), dengan mengukur muka airtanah pada

sumur pantau. Saat air dipompa ke permukaan, maka tekanan dalam akuifer akan menurun. Penurunan ini ditandai dengan penurunan muka airtanah pada sumur pantau. Besarnya penurunan ini akan berkurang dalam radius tertentu dari titik sumur pemompaan yang dinamakan radius pengaruh. Sumur pompa dan sumur pantau memiliki sistem saringan (*screen*) yang terletak pada akuifer yang sama.

e. Karakteristik akuifer yang didapatkan dari pengujian akuifer mencakup:

1) Konduktivitas hidrolika

Konduktivitas hidrolik merupakan banyaknya volume air yang mengalir melalui satu satuan luas akuifer per satuan gradien hidrolik yang dinyatakan dalam satuan galon/hari/m² (dalam satuan US), sedangkan dalam SI satuan yang digunakan adalah m³/hari/m², atau disederhanakan menjadi m/hari (atau satuan yang relevan).

2) Storativitas

Storativitas merupakan banyaknya jumlah air dalam akuifer tertekan yang mampu dikeluarkan setiap perubahan muka airtanah.

3) Transmisivitas

Transmisivitas merupakan banyaknya jumlah air yang mampu dialirkan untuk tiap satuan ketebalan dan lebar akuifer pada tiap unit gradien hidrolik.

f. Selain ketiga parameter karakteristik di atas, terdapat beberapa karakteristik tambahan lainnya:

1) Debit efektif atau porositas spesifik

Debit efektif merupakan nilai jumlah air yang dilepaskan oleh akuifer tak tertekan saat dikeringkan sepenuhnya.

2) Koefisien bocoran

Koefisien bocoran merupakan besarnya aliran air yang dialirkan oleh suatu akuifer ke akuifer lain yang dibatasi oleh lapisan akuitar.

3) Kehadiran batas akuifer dalam bentuk batas imbuhan atau batas tanpa aliran serta jaraknya dari sumur pompa dan sumur pantau.

5.4.5 Uji kualitas airtanah

g. Sifat fisika air tanah terdiri dari suhu air, warna, bau, rasa, konduktivitas elektrik, total padatan terlarut (TDS). Sifat kimia air tanah yang perlu diidentifikasi dalam proyek pembangunan terowongan adalah pH, kandungan karbon dioksida agresif (CO₂), serta kandungan ion-ion mayor seperti karbonat (CO₃²⁻), sulfat (SO₄²⁻), dan klorida (Cl⁻). Karbon dioksida agresif adalah jenis karbon dioksida yang paling berbahaya, karena kadarnya yang tinggi dapat menyebabkan korosi pada logam dan beton. Ion-ion mayor juga dapat

menyebabkan kerusakan pada material yang menyusun konstruksi terowongan. Kehadiran garam pada airtanah dapat menyebabkan kerusakan pada terowongan perisai. Kandungan ion klorida pada airtanah harus selalu diamati, serta penanganan terhadap kerusakan yang diakibatkannya (JSCE, 2018).

- h. Pengambilan sampel airtanah dapat dilakukan melalui sumur-sumur observasi ataupun lubang bor yang tersedia di sekitar konstruksi.
- i. Pengambilan sampel ion-ion mayor terutama SO_4^{2-} serta Cl^- dilakukan dengan penyaringan dengan filter dengan ukuran 0,2 atau 0,45 μm , tidak dilakukan pengasaman, serta disimpan dalam wadah sampel apapun dengan suhu kurang lebih 4°C dan mampu bertahan sampai tujuh hari sebelum diuji di laboratorium kimia air.
- j. Pengambilan sampel karbonat (CO_3^{2-}) dilakukan dalam wadah tertutup (*well-sealed sample*), tidak dilakukan penyaringan, serta langsung dilakukan pengukuran pH pada saat setelah dilakukan pengambilan sampel air. Preparasi sampel air yang mengandung ion karbonat ini dapat disimpan dalam wadah sampel apapun namun hanya dapat bertahan selama satu jam saja.
- k. Pengujian sifat fisika airtanah seperti suhu dan pH dapat dilakukan menggunakan *water test kit*, sedangkan untuk pengujian sifat kimia airtanah dapat menggunakan uji laboratorium, salah satunya yaitu *Ion Chromatography* (IC). Metode pengambilan contoh airtanah dan metode pengujian harus mengacu pada standar yang tertera pada acuan normatif.

5.4.6 Prediksi rembesan airtanah ke dalam terowongan

Rembesan airtanah ke dalam menyebabkan permasalahan seperti berkurangnya kestabilan massa batuan/tanah di sekeliling terowongan, penambahan tekanan pada sistem penyangga terowongan sementara dan permanen, terhambatnya laju penggalian terowongan, dan permasalahan finansial yang disebabkan metode penanggulangan yang perlu diaplikasikan.

Metode analitik dapat diaplikasikan untuk memprediksi rembesan airtanah ke dalam terowongan. Beberapa persamaan analitik untuk memprediksi rembesan airtanah ke dalam terowongan ditunjukkan pada Tabel 35.

Tabel 35 – Persamaan analitik untuk memprediksi rembesan airtanah ke dalam terowongan
(Hadi dan Homayoon, 2017)

Referensi	Persamaan	Deskripsi
Polubarinova-Kochina (1962)	$Q = \frac{2\pi K(d - \phi_0)}{\ln\left(\frac{2D}{r}\right)}$	Untuk terowongan horizontal pada media yang sepenuhnya jenuh, homogen <i>semi-infinite</i> , Polubarinova-Kochina menurunkan ekspresi perkiraan untuk Q, laju rembesan <i>steady state</i> per satuan panjang terowongan. D adalah kedalaman dari titik tengah terowongan, ϕ_0 adalah <i>hydraulic head</i> pada perimeter terowongan, dan d adalah ketinggian muka airtanah
Goodman (1965)	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)}$	Persamaan ini memiliki 3 syarat utama; aliran radius, tidak ada perubahan signifikan pada perlapisan, aplikasi akurat pada media dengan permeabilitas ekuivalen
Heuer (1995)	$Q = 2\pi K \frac{H_0}{\ln\left(\frac{2Z}{r}\right)} \times \frac{1}{8}$	Koefisien reduksi Heuer ($\frac{1}{8}$) dan beberapa perubahan penyebut yang diaplikasikan untuk merevisi persamaan Goodman
Lei (1999)	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right) + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1}}$	Pada persamaan ini, metode Goodman telah dikoreksi dengan aplikasi terhadap kondisi aktual yang tepat
El-Tani (1999)	$Q = 2\pi K \frac{1 - 3\left(\frac{r}{2h}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{r}{2h}\right)^2\right] \ln\left(\frac{2h}{r}\right) - \left(\frac{r}{2h}\right)^2}$	El-Tani menjelaskan persamaan ini sebagai persamaan optimum dengan mempertimbangkan persamaan-persamaan di atas
Karlsrud (2001)	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{2h}{r} - 1\right)}$	Kombinasi dari beberapa persamaan di atas, berdasarkan observasi lapangan, dan diedit untuk mengurangi eror pada terowongan dalam dan dangkal (di bawah muka airtanah)
Lombardi (2002)	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right) \left(1 + 0,4 \frac{r^2}{h}\right)}$	Pada persamaan ini metode Karlsrud telah dikoreksi berdasarkan aplikasi dari kondisi aktual yang tepat

Referensi	Persamaan	Deskripsi
El-Tani (2003)	$Q = 2\pi K \frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 + 1} \frac{h}{\ln \lambda}$	Pada persamaan ini, El-Tani telah mengaplikasikan metode transformasi Mobius dan seri Fourier dan menghasilkan solusi analitik baru untuk perhitungan aliran, dimana: $\lambda = \left(\frac{h}{r}\right) - \left(\left(\frac{h^2}{r^2}\right) - 1\right)^{0,5}$
Park et al. (2007)	$Q = \frac{2\pi KL(A + D)}{\ln\left(\frac{(H - D)}{r} + \sqrt{\frac{(H - D)^2}{r^2}}\right)}$	Pada persamaan ini, muka airtanah berada di atas permukaan tanah. Beban hidrostatik sepanjang tepi terowongan yang bergantung tahap adalah bervariasi
Li et al. (2010)	$Q = K(S + C.H)$	Pada persamaan ini, koefisien S dan C berhubungan dengan bentuk dan kedalaman terowongan
<p>Keterangan variabel:</p> <p>H_0 adalah jarak antara titik tengah terowongan dengan muka airtanah</p> <p>h adalah <i>hydraulic head</i> terhadap terowongan</p> <p>z adalah tebal overburden</p> <p>r adalah jari-jari terowongan</p> <p>K adalah konduktivitas hidrolik</p> <p>D adalah beban hidrolik diatas permukaan beban</p> <p>Q adalah debit rembesan airtanah ke dalam terowongan</p>		

5.4.7 Penyelidikan risiko rembesan airtanah pada area kars

Penilaian risiko rembesan airtanah ke dalam terowongan, terutama selama penggalian pada kars, dapat mengacu pada metode yang diperlihatkan pada Tabel 36. Pengkajian risiko rembesan airtanah ditentukan berdasarkan litologi, kondisi geologi yang tidak menguntungkan, perbedaan tinggi muka airtanah dengan lantai terowongan, kondisi topografi, kemiringan lapisan, kondisi zona kontak, rekahan di dalam dan di antara lapisan, faktor konstruksi, dan penanggulangan secara dinamis. Penilaian risiko lebih lanjut dapat menggunakan metode *normal cloud* yang telah dijelaskan lengkap dalam Wang et al. (2019).

Tabel 36 - Penilaian risiko rembesan airtanah ke dalam terowongan selama penggalian pada karst (modifikasi dari Wang et al., 2019)

Indeks pengkajian risiko rembesan air	I (Risiko sangat tinggi)	II (Risiko tinggi)	III (Risiko sedang)	IV (Risiko rendah)	Keterangan
Litologi	Solubilitas tinggi	Solubilitas sedang	Solubilitas rendah	Batuan tidak dapat larut	Ditentukan berdasarkan penilaian ahli
Kondisi geologi tidak menguntungkan	Lapisan kars berkembang kuat	Lapisan kars berkembang sedang	Lapisan kars berkembang lemah	Lapisan kars tidak berkembang	
Perbedaan tinggi muka airtanah dengan lantai terowongan (m)	>60 m	30-60 m	10-30 m	<10 m	Muka airtanah berada di atas lantai terowongan
Kondisi topografi	Morfologi negatif berskala besar	Morfologi negatif berskala sedang	Morfologi negatif berskala kecil	Tidak ada morfologi negatif	Morfologi negatif: kondisi topografi lebih rendah dari topografi rata-rata permukaan sekitar
Kemiringan lapisan (°)	25-65	10-25 dan 65-80	80-90	0-10	Karst sulit terbentuk pada perlapisan horizontal dan vertikal.
Kondisi zona kontak antara batuan mudah larut dan sulit larut	Ditentukan berdasarkan penilaian ahli				Kontak antar batuan dengan perbedaan solubilitas yang signifikan dapat bertindak sebagai zona akumulasi airtanah yang menyebabkan pembentukan sistem rongga karst.
Rekahan di dalam dan di antara lapisan	Ditentukan berdasarkan penilaian ahli				Semakin rekahan berkembang di dalam dan di antara lapisan, risiko rembesan air semakin tinggi.
Kekuatan batuan sekitar (Indeks BQ)	<250	251-350	351-450	>450	Klasifikasi massa batuan Indeks BQ digunakan dalam penilaian kekuatan batuan
Faktor konstruksi (metode ekskavasi dan perkuatan, monitoring dan pengukuran, prediksi geologi)	Sangat buruk	Buruk	Cukup Baik	Baik	
Penanggulangan secara dinamis	Ditentukan berdasarkan penilaian ahli				Semakin dinamis respon konstruksi terhadap variasi kondisi geologi dan hidrogeologi yang ditemukan, risiko rembesan air semakin rendah.

5.5 Penyelidikan kegempaan

5.5.1 Penyelidikan sesar aktif dan paleoseismik

- a. Penyelidikan sesar aktif dapat merujuk pada buku peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017 yang diterbitkan oleh PUSGEN atau publikasi-publikasi terkini mengenai sesar aktif di Indonesia atau lokasi terpilih.
- b. Jika penyelidikan paleoseismik dan sesar aktif akan dilakukan sebagai data masukan dalam penilaian bahaya seismik (*seismic hazard assessment*) lokasi konstruksi terowongan jalan, penyelidikan dapat dilakukan dengan metode geofisika dan/atau pembuatan parit uji zona sesar).
- c. Survei geofisika dalam penyelidikan paleoseismik dilakukan untuk menentukan stratigrafi dan struktur dangkal pada zona sesar (atau area likuifaksi), untuk menentukan lokasi optimum bagi *trenching* atau pengeboran, mengidentifikasi sesar pada kedalaman yang tidak bisa dicapai *trenching* (>5-6 m) atau pengeboran (umumnya 15-25 m), dan mendeteksi sesar terpendam yang tidak memiliki bukti di permukaan. Metode geofisika yang umumnya digunakan antara lain metode seismik (refraksi dan refleksi), GPR, geolistrik resistivitas, elektromagnetik, magnetik, dan gravitasi. Kedalaman penetrasi yang dibutuhkan tergantung apakah geofisika digunakan hanya untuk menentukan lokasi *trenching* (≤ 5 m), sebagai pengganti *trenching* (5-10 m), atau menentukan kehadiran sesar dalam pada skala kerak bumi (puluhan hingga ribuan meter).
- d. Tahapan dalam penyelidikan paleoseismik dengan pembuatan parit uji pada zona sesar adalah sebagai berikut (McCalpin, 2009):
 - 1) Penentuan lokasi parit uji
 - Parit uji yang memotong sesar biasanya diekskavasi untuk mengoptimalkan data untuk penyelidikan pergerakan sesar dan waktu kejadian paleoseismik. Penyelidikan pergerakan sesar paling baik dilakukan pada lokasi dengan sesar tunggal dan sempit. Di sisi lain, lokasi terbaik penyelidikan waktu kejadian paleoseismik untuk penentuan umur paleoseismik adalah depresi zona sesar lokal yang terisi dengan sedimen berukuran butir halus dan/atau organik.
 - Lokasi parit uji dipengaruhi oleh jumlah gempabumi purba yang ingin diamati. Parit uji yang memotong sesar dengan permukaan Kwarter yang sangat muda biasanya hanya menyingkap satu atau dua pergerakan gempabumi purba, sehingga parit uji akan sederhana. Di sisi lain, parit uji pada lokasi yang lebih tua seringkali menyingkap banyak jejak deformasi dari banyak gempabumi purba, sehingga proses geologinya akan sulit direkonstruksi. Jika memungkinkan,

usahakan lokasi parit uji berada pada lokasi dengan gangguan minimal pada permukaannya.

- Orientasi parit uji ditentukan dari perkiraan arah pergerakan sesar, dimana parit uji digali berarah relatif sejajar dengan arah pergerakan (tegak lurus terhadap strike bidang sesar *dip-slip*, sejajar terhadap bidang sesar *strike-slip*).

2) Ekskavasi atau re-eks kavasi parit uji

Pada beberapa kasus, re-eks kavasi parit uji yang pernah digali perlu dilakukan karena beberapa kondisi, antara lain interpretasi parit uji sebelumnya dapat dikembangkan dengan adanya data yang lebih baru, peralatan ekskavasi dapat menggali lebih dalam, dan tersedia metode pengambilan sampel dan penentuan umur yang lebih baik.

3) Pembuatan grid referensi

Grid referensi dibuat jika parit uji akan diamati dan dideskripsi dengan metode manual atau fotomosaik. Umumnya grid tersusun dari garis-garis horizontal berupa tali nilon berjarak 1 meter yang dipasang ke dinding parit uji dengan paku besar (5 mm x 10-15 cm). Setelah grid horizontal pertama dipasang, garis lain dipasang sejajar pada interval 1 meter.

4) Identifikasi kontak

Kontak-kontak yang dapat diamati dan dideskripsi pada parit uji adalah kontak satuan litologi, satuan tanah, zona pelapukan, dan fitur-fitur struktur geologi (material pengisi sesar, offset perlapisan, dll.). Fitur penting pada parit uji paleoseismik untuk mengidentifikasi sesar aktif adalah fitur deformasi batuan.

5) Pemetaan horizon tanah

Interaksi antara profil tanah dengan satuan litologi seringkali sangat penting untuk memahami sekuen pengendapan berbanding dengan *event* tektonik dan umur relatifnya. Sebagai contoh, jika lapisan tanah terpotong pada gawir sesar, maka tanah terbentuk sebelum pensesaran. Di sisi lain, jika terdapat *offset* stratigrafi tetapi lapisan tanah menerus sepanjang bidang sesar, maka kemungkinan tanah terbentuk setelah pensesaran.

6) Perekaman parit uji

Perekaman dapat dilakukan dengan beberapa metode, yaitu fotografi dinding parit uji, logging parit uji manual, logging elektronik, logging fotomosaik, dan logging fotogrametrik.

7) Penentuan umur untuk endapan Kwartir Akhir

Endapan Kwartir Akhir dapat ditentukan umurnya menggunakan metode umur korelasi, umur relatif, umur numerik, dan umur kalibrasi. Hal yang harus diperhatikan adalah sifat horizon gempabumi sebagai ketidakselarasan, dan pendekatan untuk penentuan umur ketidakselarasan. Karena ketidakselarasan mewakili waktu geologi yang 'hilang' karena erosi, terdapat kemungkinan bahwa waktu aktual gempa bumi purba berada pada interval waktu yang hilang.

- e. Secara umum, sesar dikatakan aktif jika mengalami pergerakan sekali atau lebih dalam 10.000 tahun terakhir. Sesar aktif dapat diklasifikasikan sebagai sesar aktif Holosen dan sesar aktif kondisional (USDA, 2012). Sesar aktif Holosen didefinisikan sebagai sesar yang mengalami pergerakan selama 11.000 tahun terakhir, atau memiliki bukti pergerakan selama Kala Holosen. Sesar aktif kondisional memiliki bukti pergerakan sesar selama Zaman Kwartir (<1,8 juta tahun lalu), tetapi sejarah pergerakannya tidak diketahui selama 35.000 tahun terakhir.
- f. Selain melakukan penyelidikan bahaya gempa bumi berdasarkan penyelidikan sesar aktif dan paleoseismik, penyelidikan terkait bahaya gempa juga meliputi penyelidikan bahaya likuifaksi. Metode penyelidikan likuefaksi dapat mengacu pada SNI 8460:2017.

5.5.2 Penyelidikan beban gempa

- a. Persyaratan perancangan beban gempa untuk konstruksi terowongan dijelaskan dalam SNI 8460:2017 (BSN, 2017). BSN (2017) mensyaratkan agar perancangan konstruksi terowongan terhadap beban gempa dilakukan berdasarkan beban gempa dengan probabilitas terlampaui 10% untuk umur rencana 100 tahun atau setara beban gempa dengan periode ulang 1.000 tahun.
- b. Nilai percepatan gempa pada batuan dasar (*peak ground acceleration*, PGA) di lokasi konstruksi terowongan dapat diperkirakan dari nilai PGA yang tersedia pada buku Peta Sumber dan Bahaya Gempa bumi disusun oleh Pusgen (2017).
- c. Ketika tanah yang stabil mengalami deformasi akibat gelombang gempa, konstruksi terowongan yang berada di bawah tanah akan mengalami deformasi. Perilaku konstruksi terowongan harus dievaluasi terhadap kemungkinan mengalami deformasi aksial, deformasi berbentuk kurva dan perubahan bentuk menjadi oval.
- d. Beban gempa untuk lereng portal terowongan mengikuti persyaratan gempa untuk lereng galian dan timbunan dalam BSN (2017). BSN (2017) mensyaratkan agar perancangan lereng terhadap beban gempa dilakukan berdasarkan beban gempa dengan probabilitas terlampaui 10% untuk umur rencana 50 tahun atau setara beban gempa dengan periode ulang 500 tahun. Perancangan lereng dengan metode pseudo-statik dilakukan menggunakan koefisien gempa horizontal sebesar 0,5 percepatan puncak horizontal di permukaan tanah yang ditentukan

dengan mempertimbangkan kelas situs dan faktor amplifikasi. Kelas situs ditentukan berdasarkan nilai penetrasi standar (N_{SPT}), nilai kecepatan rambat gelombang regangan geser kecil (v_s), atau nilai kuat geser niralir (s_u) diperlihatkan dalam

e. Tabel 37. Kalsifikasi Situs (AASHTO, 2012)

Tabel 37 - Klasifikasi situs (AASHTO, 2012)

Klasifikasi Situs	\bar{v}_s (m/detik)	\bar{N}_{SPT} atau $\bar{N}_{SPT_{Eh}}$	\bar{s}_u (kPa)
SA (batuan keras)	>1.500	N/A	N/A
SB (batuan dasar)	750 sampai 1.500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m dengan karakteristik sebagai berikut:		
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Indeks Plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $(w) \geq 40\%$, dan 3. Kuat geser niralir, $\bar{s}_u < 25$ kPa 		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan penyelidikan geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik seperti:		
	<ul style="list-style-type: none"> - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan, $H > 3$ m) - Lempung berplastisitas tinggi (ketebalan, $H > 7,5$ m dengan Indeks Plastisitas, $PI > 75$) - Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{s}_u < 50$ kPa 		

Keterangan: N/A = tidak dapat dipakai

Bibliografi

- Anderson, J. M., Anderson, J. M., dan Mikhail, E. M. 1998. *Surveying: Theory and Practice*. New York: McGraw-Hill Education.
- Association of Geotechnical & Geoenvironmental Specialists (Hong Kong) (AGS(HK)). 2005. *Geology for Engineering Projects*. Hong Kong: Association of Geotechnical & Geoenvironmental Specialists .
- Association Francaise Des Tunnels Et De L'Espace Souterrain. 2003. *Characterisation of Rock Masses Useful for The Design and The Construction of Underground Structures*. Association Francaise Des Tunnels Et De L'Espace Souterrain.
- Badan Pengatur Jalan Tol (BPJT). 2020a. *Konsep Naskah – Pedoman Pra Studi Kelayakan Jalan Bebas Hambatan dan Jalan Tol*.
- Badan Pengatur Jalan Tol (BPJT). 2020b. *Konsep Naskah – Pedoman Studi Kelayakan Jalan Bebas Hambatan dan Jalan Tol*.
- Badan Pengatur Jalan Tol (BPJT). 2018. *Petunjuk Pelaksanaan Penyusunan Dokumen Rencana Teknik Akhir (RTA) Jalan Tol, Buku 2, Kriteria Desain Sub Bab Geoteknik*.
- BAKOSURTANAL. 2002. *Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk Peta Geomorfologi*. Jakarta: BAKOSURTANAL.
- Bandono, dan Brahmantyo, B. 2006. Klasifikasi Bentuk Muka Bumi (Landform) untuk Pemetaan Geomorfologi pada Skala 1:25.000 dan Aplikasinya untuk Penataan Ruang. *Jurnal Geoaplika (1)2*, 71-78.
- Barton, N., R. Lien and J. Lunde. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics and Rock Engineering 6(4)*, 189-236.
- Bermana, I. 2006. Klasifikasi Geomorfologi Untuk Pemetaan Geologi Yang Dibakukan. *Bulletin of Scientific Contribution (4)2*, 161-173.
- Bieniawski, Z. T. 1989. *Engineering Rock Mass Classification A Complete Manual for Engineers and Geologist in Mining, Civil and Petroleum*. New York: John Wiley & Sons.
- Brahmantyo, B., & Bandono. 2006. Klasifikasi Bentuk Muka Bumi (Landform) untuk Pemetaan Geomorfologi pada Skala 1:25.000 dan Aplikasinya untuk. *Geoaplika Vol. 1*, 71-78.
- Dearman, W. R. 1991. *Engineering Geological Mapping 1st Edition*. Newcastle: Butterworth-Heinemann.
- Departemen Pekerjaan Umum (PU). 2005. *Pd. T-19-2005-B Pedoman Studi Kelayakan Proyek Jalan dan Jembatan*.
- Federal Highway Administration (FHWA). 2002. *Geotechnical Engineering Circular No.5-Evaluation of Soil and Rock Properties*. Washington DC: FHWA.

- Federal Highway Administration (FHWA). 1982. *Groundwater Control in Tunneling, Vol.2. Preventing Groundwater Intrusion into Completed Transportation Tunnels*. Washington DC: FHWA.
- Federal Highway Administration (FHWA). 2002. *Subsurface Investigations - Geotechnical Site Characterization - Reference Manual*. Washington DC: FHWA.
- Gustavson, M.; Kolstrup, E.; dan Seijmonsbergen, A.C . 2006. A new Symbol and GIS based detailed geomorphological mapping system: renewal of a scientific discipline for understanding landscape development. *Geomorphology* 77(1-2), 90-111.
- Hadi, F., dan Homayoon, K. 2017. New empirical model to evaluate groundwater flow into circular tunnel using multiple regression analysis. *International Journal Mining Science and Technology* 27, 415-421.
- Hanson, K.H., Kelson, K.I., Angell, M.M., dan Lettis, W.R. 1999. *NUREG/CR-5503: Techniques for Identifying Faults and Determining Their Origins*. Washington DC: Nuclear Regulatory Commission .
- Hoek, E dan Brown, E.T. 1997. Technical Note Practical Estimates of Rock Mass Strength. *International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences Vol 34, No 8*, 1165-1186.
- Hoek, E., dan Brown, E. 1980. *Underground Excavation in Rock*. London: E & FN Spon .
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., dan Corkum, B. (2002). Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Editing. *Proc. NARMS-TAC Conference Vol.1*, 267-273.
- Howard, A.D. 1967. Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol.51, pp. 2246-2259.
- Hung, J., Moneses, J., Munfah, N., dan Whisniewski, J. 2009. *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels - Civil Elements*. Washington DC: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
- International Association of Engineering Geology (IAEG). 1976. *Engineering Geological Maps: A Guide to Their Preparation*. The Unesco Press.
- International Society for Rock Mechanics (ISRM). 1981. *Rock Characterization, Testing & Monitoring*. Pergamon Press.
- International Tunnelling And Underground Space Association (ITA). 2009. *General Report on Conventional Tunnelling Method ITA Report No. 002/April 2009*. Milan: International Tunnelling And Underground Space Association (ITA).
- Japan International Cooperation Agency (JICA). 2018. *Guideline on Site Investigation for Rock Mass Classification System in Sri Lanka*. Japan International Cooperation Agency (JICA).
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE). 2018a. *Standard Specifications For Tunneling - 2006: Cut-and-Cover Tunnels*. Japan Society of Civil Engineers.

- Japan Society of Civil Engineers (JSCE). 2018b. *Standard Specifications For Tunneling - 2016: Mountain Tunnels*. Japan Society of Civil Engineers.
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE). 2018c. *Standard Specifications For Tunneling - 2016: Shield Tunnels*. Japan Society of Civil Engineers.
- Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). 2015. *Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor: 30/SE/M/2015 Tentang Pedoman Metode Perancangan Penggalian dan Sistem Perkuatan Terowongan Jalan Pada Media Campuran Tanah-Batuan*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Kolymbas, D. 2005. *Tunneling and Tunnel Mechanics: A Rotational Approach to Tunneling*. Berlin: Springer-Verlag.
- Lindstorm, M., dan Kveen, A. 2005. *Tunnel Investigation and Groundwater Control*. Oslo: Norwegian Public Roads Administration Technology Department.
- Lobeck, A. K. 1939. *Geomorphology*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Look, B. G. 2014. *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables 2nd Ed.* London: CRC Press.
- Marinos, G., Marinos, V., dan Hoek, E. 2007. The Geological Strength Index (GSI): A Characterization Tool For Assessing Engineering Properties For Rock Masses. *Underground Works Under Special Conditions* , 13-21.
- Marinos, P. dan Hoek, E. 2000. GSI: A Geological Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation. *Proceedings of the GeoEng 2000 at the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, 1422-1446.
- McCalpin, J. P. 2009. *Field techniques in paleoseismology terrestrial environments*. Cambridge: Academic Press.
- McCalpin, J. P. 2009. *Introduction to paleoseismology*. Cambridge: Academic press.
- Morisawa, M. 1985. *Rivers: form and process*. Tanpa kota: Longman.
- Norwegian Geotechnical Institute (NGI). (2015). *Using the Q-system Rock mass classification and support design*. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute.
- Norwegian Public Road Administration (NPRA). 2005. *Tunnel Investigation and Groundwater Control*. Oslo: Norwegian Public Road Administration Technology Department.
- Norwegian Tunneling Society (NTS). 2014. *Norwegian Tunneling Technology*. Oslo: Norwegian Tunneling Society.
- PUPR. 2016. SE Menteri PUPR No. 19/SE/M/2016: Pedoman Metode Perencanaan Penggalian dan Sistem Perkuatan Terowongan Jalan pada Media Campuran Tanah-Batuan (Pd 09-2016-B).
- PVMBG. 2009. *Peta Zona Kerentanan Gerakan Tanah Provinsi Riau dan Kepulauan Riau*. Bandung: Badan Geologi.

- PVMBG. 2009. *Peta Zona Kerentanan Gerakan Tanah Provinsi Sumatera Barat*. Bandung: Badan Geologi.
- Tatiya, R. R. 2005. *Civil Excavations And Tunnelling*. London: Thomas Telford Publishing.
- Tatiya, R. R. 2013. *Surface and Underground Excavations*. Boca Raton: CRC Press.
- Terzaghi, K. 1946. Rock defects and loads on tunnel supports. *Rock tunneling with steel supports*, 17-99.
- The International Union of Geological Sciences, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. 2005. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge: Cambridge University Press.
- The International Union of Geological Sciences, Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks (IUGS-SCMR). 2011. *Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge: Cambridge University Press.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). 1997. *Engineering and Design: Tunnels and Shafts in Rock CECW Manual No. 1110-2-2901*. Washington DC: U.S. Army Corps of Engineers.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). 2001. *Geotechnical Investigation Manual No. 1110-1-1804*. Washington DC: U.S. Army Corps of Engineers.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). 2007. *Engineering Design Control And Topographic Surveying No. 1110-1-1005*. Washington DC: U.S. Army Corps of Engineers.
- U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation (USBR). 1998. *Engineering Geology Field Manual*, Second Edition, Volume I. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
- U.S. Federal Highway Administration (FHWA). 2009. *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels - Civil Elements No. FHWA-NHI-10-034*. McLean: U.S. Department of Transportation Publication Federal Highway Administration (FHWA).
- U.S. National Committee in Tunneling Technology (USNCTT). 1984. *Geotechnical Site Investigation for Underground Projects Volume 1*. Washington DC: National Academy Press.
- Van Zuidam, R. 1985. *Aerial Photo-Interpretation in Terrain Analysis and Geomorphologic Mapping*. Enschede: Smits Publ.
- Van Zuidam, R.A. 1983. *Guide To Geomorphologic Aerial Photographic Interpretation And Mapping*. The Nether: ITC.