



KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM DAN PERUMAHAN RAKYAT
REPUBLIK INDONESIA

Kepada Yth.:

Para Pejabat Eselon I di Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

**SURAT EDARAN
NOMOR : 42/SE/M/2015**

TENTANG

**PEDOMAN PERENCANAAN TEKNIS TIMBUNAN MATERIAL RINGAN
MORTAR-BUSA UNTUK KONSTRUKSI JALAN**

A. Umum

Dalam rangka melaksanakan dan melengkapi Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 13/PRT/M/2011 tentang Tata Cara Pemeliharaan dan Penilikan Jalan, perlu menetapkan Pedoman perencanaan teknis timbunan material ringan mortar-busa untuk konstruksi jalan dengan Surat Edaran Menteri. Pedoman tersebut digunakan untuk perencanaan konstruksi jalan yang memanfaatkan material ringan mortar-busa sebagai material timbunan.

B. Dasar Pembentukan

1. Peraturan Pemerintah Nomor 34 Tahun 2006 tentang Jalan (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2006 Nomor 86, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 4655);
2. Peraturan Pemerintah Nomor 38 Tahun 2007 tentang Pembagian Urusan Pemerintahan antara Pemerintah, Pemerintahan Daerah Provinsi, Pemerintahan Daerah Kabupaten/Kota (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2007 Nomor 82, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 4737);
3. Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2015 tentang Organisasi Kementerian Negara (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2015 Nomor 8);
4. Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 15 Tahun 2015 tentang Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2015 Nomor 16);
5. Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 121/P Tahun 2014 tentang Pembentukan Kementerian dan Pengangkatan Menteri Kabinet Kerja Periode Tahun 2014-2019;

6. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 08/PRT/M/2010 tentang Organisasi dan Tata Kerja Kementerian Pekerjaan Umum;
7. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 07/PRT/M/2012 tentang Penyelenggaraan Penelitian dan Pengembangan di Bidang Jalan;
8. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 13/PRT/M/2011 tentang Tata Cara Pemeliharaan dan Penilikan Jalan.

C. Maksud dan Tujuan

Surat Edaran ini dimaksudkan sebagai acuan bagi Pejabat Eselon I di Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, perancang, perencana dan pelaksana dalam merencanakan timbunan material ringan mortar-busa untuk konstruksi jalan. Tujuannya agar timbunan material ringan mortar-busa sesuai dengan yang direncanakan sehingga tidak terjadi masalah stabilitas dan penurunan timbunan.

D. Ruang Lingkup

Pedoman perencanaan teknis timbunan material ringan mortar-busa untuk konstruksi jalan menetapkan ketentuan dan prosedur perencanaan teknis material ringan mortar-busa untuk konstruksi jalan, yang meliputi karakteristik material ringan mortar-busa, penyelidikan geoteknik, dan kriteria perencanaan dengan material ringan mortar-busa.

E. Penutup

Ketentuan lebih rinci mengenai pedoman ini tercantum dalam Lampiran yang merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari Surat Edaran ini.

**Ditetapkan di Jakarta
pada tanggal 18 Mei 2015**

**MENTERI PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT,**



Tembusan disampaikan kepada Yth.:
Sekretaris Jenderal, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

LAMPIRAN
SURAT EDARAN MENTERI PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT
NOMOR : 42/SE/M/2015

PEDOMAN

Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil

**Perencanaan teknis timbunan material ringan
mortar-busa untuk konstruksi jalan**



**KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT**

Daftar isi

Daftar isi	i
Prakata	iii
Pendahuluan	iv
1 Ruang lingkup	1
2 Acuan normatif	1
3 Istilah dan definisi	2
4 Ketentuan	3
4.1 Tanah lunak	3
4.2 Material ringan mortar-busa	4
4.2.1 Karakteristik	4
4.2.2 Penggunaan	4
4.3 Penyelidikan tanah dan material ringan mortar-busa	4
4.3.1 Pengumpulan data dan survei pendahuluan	4
4.3.2 Penyelidikan lapangan	5
4.3.3 Pengujian laboratorium	6
4.4 Kriteria perencanaan	9
4.4.1 Material ringan mortar-busa	9
4.4.2 Beban lalu lintas	9
4.4.3 Stabilitas	10
4.4.4 Penurunan	10
4.4.5 Gaya angkat hidrostatis (<i>hydrostatic uplift</i>)	11
5 Prosedur perencanaan	11
5.1 Bagan alir perencanaan	11
5.2 Penentuan opsi perencanaan	14
5.3 Penyelidikan tanah dan material ringan mortar-busa	14
5.4 Penentuan dimensi timbunan	14
5.5 Perhitungan tinggi kritis timbunan	14
5.6 Penentuan parameter perencanaan	14
5.7 Perhitungan daya dukung	15
5.8 Perhitungan stabilitas timbunan	17
5.8.1 Penentuan parameter tegangan total	17
5.8.2 Penentuan parameter tegangan efektif	18
5.8.3 Perangkat perhitungan stabilitas	19
5.8.4 Pemodelan elemen hingga untuk perhitungan stabilitas timbunan ringan dengan mortar-busa	19
5.9 Perhitungan penurunan timbunan	20
5.9.1 Penurunan seketika (<i>immediate settlement</i>)	21
5.9.2 Penurunan akibat konsolidasi	22
5.9.3 Perangkat untuk perhitungan penurunan	25

5.10 Perhitungan gaya angkat hidrostatik.....	25
Lampiran A (informatif) Contoh perencanaan timbunan jalan dengan material ringan mortar-busa pada jalan baru	28
Lampiran B (informatif) Bagan alir perancangan campuran material ringan mortar-busa	36
Bibliografi.....	37
Gambar 1 - Prosedur perencanaan timbunan material ringan mortar-busa untuk konstruksi jalan lama.....	12
Gambar 3 - Faktor daya dukung Terzaghi (Das, 1990).....	16
Gambar 4 - Ilustrasi penghitungan daya dukung tanah (Pd T-11-2003)	17
Gambar 5 - Tipikal model perhitungan stabilitas dua dimensi timbunan dengan material ringan (Arellano, dkk. 2010)	20
Gambar 6 - Grafik yang digunakan dalam Persamaan (6) dan (7) (Janbu dkk., 1956 dalam Holtz, dkk., 1981)	22
Gambar 7 - Faktor pengaruh akibat beban timbunan Osterberg,1957 (Holtz, dkk., 1981) ..	23
Gambar 8 - Penentuan nilai α_1 , α_2 , a dan b pada timbunan (Das,1992)	23
Gambar 9 - Variabel untuk analisis gaya angkat hidrostatik pada situasi saat air hanya menekan satu sisi timbunan (Arellano, 2010)	26
Gambar 10 - Gaya angkat timbunan ringan akibat tekanan air dari kedua sisi (BS, 2004) ...	26
Tabel 1 - Batasan kuat geser lempung lunak (Pt-T-8-2002-B)	3
Tabel 2 - Penyelidikan lapangan untuk tanah dasar lempung lunak (Pt T-09-2002-B)	5
Tabel 3 - Pengujian lapangan untuk tanah dasar lempung lunak (Pt-T-09-2002-B)	6
Tabel 4 - Pengujian di laboratorium untuk pekerjaan timbunan di atas tanah lunak (Pt T-09-2002-B).....	7
Tabel 5 - Jenis pengujian material ringan-mortar-busa untuk perencanaan	7
Tabel 6 - Kuat tekan minimum (umur 14 hari) material ringan lapis fondasi atau <i>base</i>	9
Tabel 7 - Kuat tekan minimum (umur 14 hari) material ringan lapis fondasi-bawah atau <i>subbase</i>	9
Tabel 8 - Beban lalu lintas untuk analisis stabilitas (Pt T-10-2002-B)	9
Tabel 9 - Sistem klasifikasi jalan di Indonesia (Pt T-09-2002-B).....	10
Tabel 10 - Faktor keamanan minimum untuk perhitungan stabilitas timbunan (Pd T-11-2005-B)	10
Tabel 11 - Kriteria penurunan timbunan (Pt T-10-2002-B)	10
Tabel 12 - Parameter perencanaan	15
Tabel 13 - Kuat geser, tekanan air pori dan berat isi yang relevan untuk perhitungan stabilitas pada berbagai kondisi (Dep.PU, 2004).....	18
Tabel 14 - Variasi faktor waktu terhadap derajat konsolidasi (Das, 1995)	25
Tabel A.1 - Data hasil pengujian tanah dasar lempung lunak.....	28
Tabel A.2 - Parameter tanah dasar untuk analisis stabilitas timbunan	30
Tabel A.3 - Hasil perhitungan penurunan.....	33
Tabel A.4 - Rangkuman hasil perhitungan penurunan untuk timbunan lapis pertama (H = 0,30m).....	34

Prakata

Pedoman perencanaan teknis timbunan material ringan mortar-busa untuk konstruksi jalan merupakan pedoman baru yang disusun berdasarkan penelitian dan pengembangan Pusat Litbang Jalan dan Jembatan selama kurun waktu 2006 - 2013. Pedoman ini ditujukan bagi perencana yang akan merencanakan konstruksi timbunan jalan dengan menggunakan material ringan mortar-busa. Di dalam pedoman ini juga diberikan contoh perhitungan untuk perencanaan.

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

Tata cara penulisan disusun mengikuti Pedoman Standardisasi Nasional (PSN) 08:2007 dan dibahas dalam rapat Konsensus yang diselenggarakan pada tanggal 9 September 2014 di Bandung, yang melibatkan para narasumber, pakar dan lembaga terkait.

Pendahuluan

Penyusunan pedoman ini berdasarkan hasil pelaksanaan dan pengkajian uji coba skala penuh timbunan jalan dengan material ringan mortar-busa di ruas jalan Pangkalan Lima-Kumai, Pangkalan Bun Kalimantan Tengah pada tahun 2010-2013 dalam bentuk buku Naskah Ilmiah Kajian Penanganan Tanah Lunak dengan Timbunan Jalan Mortar Busa (Pusjatan, 2012).

Pedoman ini disusun sebagai petunjuk bagi perencana dalam perencanaan teknis timbunan material ringan mortar-busa untuk konstruksi jalan. Pedoman ini tidak membahas secara rinci mengenai perancangan campuran material ringan mortar-busa. Hal mengenai perancangan campuran diatur di dalam pedoman lainnya, yaitu Perancangan Campuran Material Ringan Mortar-Busa untuk Konstruksi Jalan. Penentuan densitas dan kuat tekan rencana dalam pedoman ini merujuk pada Spesifikasi Material Ringan dengan Mortar Busa untuk Konstruksi Jalan yang dikeluarkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Penggunaan material ringan mortar-busa di dalam pedoman ini, merujuk pada kriteria-kriteria yaitu memiliki densitas kering material campuran, maksimum $0,8 \text{ gr/cm}^3$, memiliki kuat tekan minimum 600 kPa (6 kg/cm^2), memiliki *flow* atau daya alir (*flowability*) sebesar $180 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ dan dapat mengeras sendiri karena berperilaku seperti mortar beton, serta menggunakan lapis pencegah retak refleksi di atas timbunan mortar-busa, agar retakan yang terjadi di timbunan tidak akan merefleksikan ke permukaan perkerasan.

Perencanaan teknis timbunan material ringan mortar-busa untuk konstruksi jalan

1 Ruang lingkup

Pedoman ini menetapkan ketentuan dan prosedur perencanaan teknis material ringan mortar-busa untuk konstruksi jalan, yang meliputi karakteristik material ringan mortar-busa, penyelidikan geoteknik, dan kriteria perencanaan dengan material ringan mortar-busa. Kriteria perencanaan timbunan material ringan mortar-busa untuk konstruksi jalan terdiri dari perhitungan tinggi kritis, perhitungan penurunan, serta perhitungan stabilitas timbunan.

Pedoman ini hanya membahas mengenai perencanaan teknis material ringan mortar-busa untuk konstruksi jalan di atas tanah lempung lunak (tidak termasuk gambut) dan tidak membahas mengenai perencanaan material ringan mortar-busa untuk timbunan oprit jembatan.

2 Acuan normatif

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

SNI 7974:2013, *Spesifikasi air pencampur yang digunakan dalam produksi beton semen hidraulis.*

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

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

SNI 2812:2011, *Cara uji konsolidasi tanah satu dimensi.*

SNI 1971:2011, *Cara uji kadar air total agregat dengan pengeringan.*

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

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

SNI 1970:2008, *Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus.*

SNI 1973: 2008, *Cara uji berat isi, volume produksi campuran dan kadar udara beton.*

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

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

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

SNI 3402:2008, *Cara uji berat isi beton ringan struktural.*

SNI 3423:2008, *Cara uji analisis ukuran butir tanah.*

SNI 4153:2008, *Cara uji penetrasi lapangan dengan SPT.*

SNI 15-2049-2004, *Semen portland.*

SNI 15-0302-2004, *Semen portland pozzolan.*

SNI 15-7064-2004, *Semen portland komposit.*

SNI 03-4148.1-2000, *Tata cara pengambilan contoh tanah dengan tabung dinding tipis.*

SNI 03-4428-1997, *Metode pengujian agregat halus atau plastik yang mengandung bahan plastik dengan cara setara pasir.*

SNI 03-2816-1992, *Metode pengujian kotoran organik dalam pasir untuk campuran mortar atau beton.*

SNI 03-2487-1991, *Metode pengujian lapangan kekuatan geser baling pada tanah berkohesi.*

SNI 03-2455-1991 Rev 2004, *Cara uji triaksial untuk tanah dalam keadaan terkonsolidasi tidak terdrainase (CU) dan terkonsolidasi terdrainase (CD)*.

Pt T-8-2002-B, *Panduan Geoteknik 1, Timbunan jalan pada tanah lunak: proses pembentukan dan sifat-sifat dasar tanah lunak*.

Pt T-09-2002-B, *Panduan Geoteknik 2, Timbunan jalan pada tanah lunak: penyelidikan tanah lunak, perencanaan dan pekerjaan lapangan*.

Pt M-01-2002-B, *Panduan Geoteknik 3, Timbunan jalan pada tanah lunak: penyelidikan tanah lunak, pengujian laboratorium*.

Pt T-10-2002-B, *Panduan Geoteknik 4, Timbunan jalan pada tanah lunak: perencanaan dan konstruksi*.

Pt T-11-2003, *Pedoman perencanaan timbunan jalan pendekat jembatan*.

Pd. T.-11-2005-B, *Stabilisasi dangkal tanah lunak untuk konstruksi timbunan jalan (dengan semen dan cerucuk)*.

ASTM C 1611, *Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete*.

ASTM C 142, *Standard test method for clay lumps and friable particles in aggregates*.

3 Istilah dan definisi

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

3.1

busa (*foam*)

suatu bahan yang terbentuk dengan mengikat sejumlah besar gelembung gas dalam benda cair atau padat, utamanya berjenis bahan baku aktif permukaan dan protein nabati, berbentuk cairan yang dicampur dengan air dan diaduk dengan alat pengaduk (*foam generator*) sampai menghasilkan busa

3.2

densitas basah

perbandingan berat terhadap volume campuran mortar-busa dalam keadaan basah

3.3

densitas kering

perbandingan berat terhadap volume campuran mortar-busa dalam keadaan kering oven

3.4

flow

ukuran ketebalan adukan material ringan yang dinyatakan dalam sentimeter (cm), ditentukan dengan *ring*

3.5

kuat tekan mortar-busa yang disyaratkan (f_c)

kuat tekan minimum yang harus dicapai dengan benda uji berbentuk silinder dengan ukuran diameter minimum 100mm dan tinggi sebesar dua kali diameternya

3.6

kuat tekan minimum lapis fondasi (*base*)

kekuatan tekan minimum material ringan mortar-busa dengan pengujian kuat tekan bebas (*unconfined compressive test*) untuk konstruksi fondasi jalan dengan tebal minimum 30 cm

3.7

kuat tekan minimum lapis fondasi-bawah (*subbase*)

kuat tekan minimum material ringan mortar-busa dengan pengujian kuat tekan bebas untuk konstruksi timbunan atau fondasi-bawah jalan

3.8

material ringan mortar-busa

material yang dibuat dengan menambahkan air ke dalam pasir serta mencampurnya dengan bahan peringan bobot berbentuk cairan busa

3.9

tanah lunak

tanah-tanah yang jika tidak dikenali dan diselidiki secara seksama dapat menyebabkan masalah ketidakstabilan dan penurunan jangka panjang yang tidak dapat ditolerir; tanah tersebut mempunyai kuat geser yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi

3.10

tanah lempung lunak

tanah lempung yang mengandung mineral lempung dan mengandung kadar air yang tinggi, sehingga menyebabkan kuat geser yang rendah

3.11

kuat tekan bebas / *unconfined compression test (UCS)*

besarnya tegangan maksimum pada waktu pengujian sampai contoh benda uji mengalami keruntuhan

4 Ketentuan

4.1 Tanah lunak

Pt-T-8-2002-B memberikan definisi tanah lunak sebagai tanah-tanah yang jika tidak dikenali dan diselidiki secara seksama dapat menyebabkan masalah ketidakstabilan dan penurunan jangka panjang yang tidak dapat ditolerir; tanah tersebut mempunyai kuat geser yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi. Pt-T-8-2002-B membagi tanah lunak ke dalam dua tipe, yaitu lempung lunak dan gambut.

Pedoman ini hanya membahas mengenai perencanaan teknis material ringan mortar-busa untuk konstruksi jalan di atas tanah lempung lunak (tidak termasuk gambut). Pt-T-8-2002-B mendefinisikan lempung lunak sebagai tanah lempung yang mengandung mineral lempung dan mengandung kadar air yang tinggi, sehingga menyebabkan kuat geser yang rendah. Tabel 1 memperlihatkan batasan kuat geser lempung lunak dan lempung sangat lunak .

Tabel 1 - Batasan kuat geser lempung lunak (Pt-T-8-2002-B)

Konsistensi	Kuat geser (kN/m²)
Lunak	12,5 – 25
Sangat lunak	< 12,5

4.2 Material ringan mortar-busa

4.2.1 Karakteristik

Campuran material ringan yang dihasilkan sangat cair, namun melalui reaksinya dengan bahan baku busa, material ringan tersebut akan mengeras dengan nilai kuat tekan yang sama dengan material berkualitas sangat baik hingga baik.

4.2.2 Penggunaan

Penggunaan material ringan mortar-busa, merujuk pada kriteria sebagai berikut:

- a. Memiliki densitas kering material campuran, maksimum $0,8 \text{ gr/cm}^3$, sesuai dengan Spesifikasi Material Ringan dengan Mortar Busa untuk Konstruksi Jalan.
- b. Memiliki kuat tekan minimum 600 kPa (6 kg/cm^2), sesuai dengan Spesifikasi Material Ringan dengan Mortar Busa untuk Konstruksi Jalan.
- c. Memiliki *flow* atau daya alir (*flowability*) sebesar $180 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$.
- d. Material campuran mengeras sendiri karena berperilaku seperti mortar beton, yaitu material campuran tersebut dapat mengeras sesuai dengan waktu pemeraman yang ditetapkan.
- e. Menggunakan lapis pencegah retak refleksi di atas timbunan mortar-busa, agar retakan yang terjadi di timbunan tidak akan merefleksikan ke permukaan perkerasan. Jika tidak digunakan lapisan tersebut, perlu diperhatikan resiko timbulnya retak refleksi. Material lapis pencegah retak refleksi lainnya yang direkomendasikan adalah:
 - 1) *Stress Absorbed Membrane Interlayer* (SAMI), penggunaannya dapat merujuk pada Aschuri & Yamin (2011), atau
 - 2) Anyaman baja (*wire mesh*)

4.3 Penyelidikan tanah dan material ringan mortar-busa

Penyelidikan tanah meliputi pengumpulan data dan survei pendahuluan (rekonesan), penyelidikan lapangan dan pengujian laboratorium, yang bertujuan untuk mendapatkan data untuk keperluan perencanaan timbunan dengan mortar-busa di atas tanah lunak. Jenis penyelidikan tanah dan standar rujukannya diuraikan berikut ini.

4.3.1 Pengumpulan data dan survei pendahuluan

Pengumpulan data yang menyangkut studi meja (*desk study*) dan rekonesan lapangan antara lain pengumpulan data-data yang relevan (peta geologi, peta topografi dan laporan penyelidikan tanah di sekitarnya, jika ada, dari pekerjaan konstruksi yang lain, laporan-laporan pelaksanaan, laporan-laporan bencana, dll.) Pada tahap studi meja juga dilakukan interpretasi foto udara dan peninjauan lokasi. Menurut Dep.PU (2006), studi meja termasuk pengumpulan dan evaluasi informasi-informasi mengenai lokasi yang akan dibangun, antara lain:

- a. Peta geologi (skala 1:100.000) dan peta topografi (skala 1:50.000), dapat digunakan untuk memberikan indikasi awal akan adanya endapan tanah lunak;
- b. Penampang pemboran dan laporan penyelidikan lapangan di lokasi terdekat yang memiliki sifat-sifat tanah yang relatif sama;
- c. Riwayat/sejarah dan penggunaan lahan sebelumnya, melalui pengumpulan peta tata guna lahan (skala 1:250.000);
- d. Foto udara dan foto satelit, dengan skala 1:50.000.

4.3.2 Penyelidikan lapangan

Penyelidikan lapangan terdiri dari pengambilan contoh tanah dan pengujian lapangan untuk tanah dasar lempung lunak. Pengujian lapangan bertujuan mendapatkan parameter tanah untuk analisis, terutama apabila pemboran dan pengambilan contoh tanah tidak dapat memenuhi contoh tanah tak terganggu sesuai kebutuhan. Jenis penyelidikan dan pengujian lapangan serta pengambilan contoh tanah yang direkomendasikan merujuk pada Pt T-09-2002-B dan masing-masing diberikan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2 - Penyelidikan lapangan untuk tanah dasar lempung lunak (Pt T-09-2002-B)

Jenis penyelidikan	Jenis contoh yang diambil	Kelebihan	Kekurangan	Standar acuan
Pemboran mesin dengan alat bor putar (<i>rotary borings</i>)	Contoh tanah terganggu dan tak terganggu	Paling sederhana dan ekonomis untuk tanah lunak pada kedalaman yang dangkal	Tidak dapat digunakan untuk tanah lunak pada kedalaman yang dalam	SNI 2436:2008
Pemboran mesin dengan alat bor auger (<i>auger borings</i>)	Contoh tanah terganggu dan tak terganggu	Paling direkomendasikan untuk tanah lunak karena pemboran bersih dan seragam sehingga meminimalisir gangguan terhadap contoh tanah	Pada saat mencabut kembali auger dari dasar tanah dapat menimbulkan isapan pada lubang bor, sehingga dapat mengganggu lapisan tanah yang akan diambil contohnya	SNI 2436:2008
Pengambilan contoh tanah dengan tabung	Contoh tanah tak terganggu	Tanah yang telah terganggu tidak dapat masuk ke dalam piston baik setelah maupun selama proses pengambilan contoh tanah	Gesekan dengan dinding dalam tabung contoh merupakan salah satu penyebab utama gangguan pada tanah lunak	SNI 03-4148-1.2000 (Pd T-28-2000)

Tabel 3 - Pengujian lapangan untuk tanah dasar lempung lunak (Pt-T-09-2002-B)

Jenis pengujian	Informasi dan parameter perencanaan yang dihasilkan	Standar acuan	Jenis tanah yang paling sesuai
<i>Seismic</i> dan <i>resistivity</i> dengan alat geolistrik	Nilai resistiviti dan kedalaman tanah keras	SNI 2528:2012	Tidak disebutkan
Sondir atau Penetrasi Konus (CPT)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Evaluasi stratigrafi bawah permukaan menerus 2. Korelasi untuk menentukan kepadatan lapangan, sudut geser dalam pasir, kuat geser tak terdrainase lempung, kerentanan terhadap likuifaksi 	SNI 2827:2008	Pasir, lanau, lempung
Penetrasi Standar (SPT)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nilai N-SPT 2. Korelasi untuk menentukan konsistensi tanah kohesif 	SNI 4153 : 2008	
Penetrasi Konus dengan pengukuran tekanan pori (CPT _u)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Evaluasi stratigrafi bawah permukaan menerus yang lebih baik daripada CPT 2. Korelasi untuk menentukan kepadatan lapangan, sudut geser dalam pasir, kuat geser tak terdrainase lempung, kerentanan terhadap likuifaksi 	SNI 2827 : 2008	Pasir, lanau, lempung
Geser Baling Lapangan	Metode ini dibuat untuk memperoleh parameter kekuatan geser tanah lunak berkohesi yang jenuh air pada kondisi tanpa drainase	SNI 03-2487-1991	Lempung, lanau (pasir dan batuan tidak termasuk)
Permeabilitas Lapangan	Nilai kelulusan air pada setiap perlapisan tanah atau batuan dan nilai Lugeon (Lu), jenis aliran ke dalam pori lapisan tanah atau batuan	SNI 2411:2008	Pasir, lanau, lempung

4.3.3 Pengujian laboratorium

Pengujian laboratorium bertujuan untuk memperoleh sifat fisik maupun teknis material tanah dasar lempung lunak di bawah konstruksi timbunan jalan yang direncanakan. Jenis pengujian beserta SNI rujukannya merujuk pada Pt T-09-2002-B dan dikelompokkan di dalam Tabel 4.

Pengujian material ringan mortar-busa di laboratorium juga diperlukan di dalam perencanaan timbunan material ringan mortar-busa. Tabel 5 memberikan rekomendasi jenis pengujian yang perlu dilakukan untuk memeriksa kualitas mortar-busa yang digunakan.

Tabel 4 - Pengujian di laboratorium untuk pekerjaan timbunan di atas tanah lunak (Pt T-09-2002-B)

Parameter geoteknik	Jenis tanah dan jenis pengujian		Standar acuan
	Lempung terkonsolidasi normal	Lempung terkonsolidasi berlebih	
Klasifikasi tanah	- Uji batas-batas Atterberg - Analisis ukuran butir dengan hidrometer	- Uji batas-batas Atterberg - Analisis ukuran butir dengan hidrometer	SNI 1966:2008 SNI 1967:2008 SNI 3423:2008
Modulus oedometer (E_{oed}); indeks kompresi (C_c)	Uji konsolidasi	Uji konsolidasi	SNI 2812:2011
Modulus Young (E)	Uji triaksial CU, CD	Uji triaksial CU, CD	SNI 03-2455-1991 Rev 2004
Kuat geser efektif (<i>drained</i>) (c'), (ϕ)	Uji triaksial CD	Uji triaksial CD	SNI 03-2455-1991 Rev 2004
Kuat geser <i>undrained</i> (c_u)	Uji triaksial CU	Uji triaksial CU	SNI 03-2455-1991 Rev 2004
Berat isi	Uji indeks	Uji indeks	-
Koefisien konsolidasi (c_v)	Uji konsolidasi	Uji konsolidasi	SNI 2812:2011
Permeabilitas (k)	Uji konsolidasi	Uji konsolidasi	SNI 2812:2011

Tabel 5 - Jenis pengujian material ringan-mortar-busa untuk perencanaan

Kategori pengujian	Jenis pengujian	Parameter yang dihasilkan	Aplikasi	Standar acuan
Bahan pencampur				
- Pasir	Kadar air	Kadar air agregat	Pengendalian mutu pasir	SNI 1971:2011
	Gradasi	Gradasi agregat		SNI 3423:2008
	Kandungan dalam agregat	Kandungan dalam agregat		ASTM C 142 (belum diakomodasi dalam acuan normatif)
	Berat jenis dan penyerapan agregat halus	Berat jenis		SNI 1970:2008
	Agregat halus atau pasir yang mengandung bahan plastis dengan cara setara pasir	Kandungan bahan plastis dalam agregat		SNI 03-4428-1997
	Kotoran organik dalam pasir	Kadar kotoran organik		SNI 03-2816-1992

Tabel 5 - Jenis pengujian material ringan-mortar-busa untuk perencanaan (lanjutan)

Kategori pengujian	Jenis pengujian	Parameter yang dihasilkan	Aplikasi	Standar acuan
Bahan pencampur				
- Pasir	Kadar air	Kadar air agregat	Pengendalian mutu pasir	SNI 1971:2011
	Gradasi	Gradasi agregat		SNI 3423:2008
	Kandungan dalam agregat	Kandungan dalam agregat		ASTM C 142 (belum diakomodasi dalam acuan normatif)
	Berat jenis dan penyerapan agregat halus	Berat jenis		SNI 1970:2008
	Agregat halus atau pasir yang mengandung bahan plastis dengan cara setara pasir	Kandungan bahan plastis dalam agregat		SNI 03-4428-1997
	Kotoran organik dalam pasir	Kadar kotoran organik		SNI 03-2816-1992
- Air	Seluruh pengujian air - Kandungan klorida - Kandungan sulfat - Pengolahan khusus untuk air - Mutu air untuk adukan beton - Kadar keasaman dalam air	- Kadar klorida - Kadar sulfat - Mutu air - pH air	Pengendalian mutu air	SNI 7974 : 2013
- Semen Portland	Semen Portland	-	Pengendalian mutu semen	SNI 15-2049-2004
	Semen Portland komposit	-		SNI 15-7064-2004
	Semen Portland pozolan	-		SNI 15-0302-2004
Busa	Densitas busa	Densitas (γ)	Pengendalian mutu busa	SNI 1973:2008
Campuran material ringan mortar-busa	Densitas basah campuran	Densitas (γ)	Pemeriksaan target dan kriteria campuran	SNI 1973:2008
	Flow	Nilai flow		ASTM C1611
Benda uji material ringan mortar-busa	Densitas kering	Densitas (γ)	Pengendalian mutu	SNI 3402:2008
	Kuat tekan bebas (UCS)	Kuat tekan		SNI 3638:2012

4.4 Kriteria perencanaan

4.4.1 Material ringan mortar-busa

Bahan-bahan yang digunakan dalam campuran material ringan mortar-busa harus memenuhi ketentuan sebagai berikut:

- Semen, dengan spesifikasi yang merujuk pada SNI 15-2049-2004, SNI 15-7064-2004, SNI 15-0302-2004;
- Agregat, dalam hal ini pasir, harus memenuhi gradasi pasir untuk mortar-busa sesuai yang disyaratkan dalam spesifikasi teknis. Pasir harus mempunyai butiran-butiran yang keras dan awet (*durable*). Pasir harus bebas dari kotoran organik, dengan pengujian untuk menentukan adanya bahan organik dalam pasir alam yang akan digunakan sebagai bahan campuran mortar atau beton merujuk pada SNI-2816-1992;
- Busa, mengandung protein nabati atau sejenisnya yang dapat menghasilkan gelembung terpisah yang stabil sehingga dapat menghasilkan campuran material ringan yang memenuhi spesifikasi teknis;
- Air, harus sesuai dengan yang disyaratkan di dalam SNI 7974:2013.

Kuat tekan minimum material ringan mortar-busa harus merujuk pada spesifikasi teknis. sebagaimana diperlihatkan pada Tabel 6 dan Tabel 7.

Tabel 6 - Kuat tekan minimum (umur 14 hari) material ringan lapis fondasi atau *base*

Densitas kering maksimum (gr/cm ³)	Kuat tekan minimum	
	kPa	kg/cm ²
0,8	2000	20

Tabel 7 - Kuat tekan minimum (umur 14 hari) material ringan lapis fondasi-bawah atau *subbase*

Densitas kering maksimum (gr/cm ³)	Kuat tekan minimum	
	kPa	kg/cm ²
0,6	800	8

4.4.2 Beban lalu lintas

Beban lalu lintas harus ditambahkan ketika melakukan perhitungan stabilitas timbunan, dengan menggunakan angka yang ditunjukkan pada Tabel 8, dan diperhitungkan pada seluruh lebar permukaan timbunan. Pengelompokkan kelas jalan pada Tabel 8 mengacu pada sistem klasifikasi jalan di Indonesia yang diperlihatkan pada Tabel 9. Klasifikasi perencanaan jalan kelas I s.d IV pada Tabel 9 ditentukan berdasarkan besar volume Lalu-lintas Harian Rata-rata (LHR) dan fungsi jalannya.

Tabel 8 - Beban lalu lintas untuk analisis stabilitas (Pt T-10-2002-B)

Kelas Jalan	Beban Lalu Lintas (kPa)
I	15
II	12
III	12
IV	12 (direncanakan sama dengan jalan kelas III)

Tabel 9 - Sistem klasifikasi jalan di Indonesia (Pt T-09-2002-B)

Klasifikasi berdasarkan fungsi jalan	LHR		Kelas
Primer	Arteri	Seluruh lalu lintas	I
	Kolektor	≥ 10.000	I
		≤ 10.000	II
Sekunder	Arteri	≥ 20.000	I
		≤ 20.000	II
	Kolektor	≥ 6.000	II
		≤ 6.000	III
	Lokal	≥ 500	III
		≤ 500	IV

4.4.3 Stabilitas

Suatu timbunan dianggap berada pada titik keruntuhan jika faktor keamanan, $FK = 1$, serta berada pada kondisi stabil jika FK yang dimiliki lebih besar dari satu ($FK > 1$) atau dengan kata lain memiliki kekuatan yang lebih (*reserve strength*). Pd T-11-2005-B memberikan kriteria FK minimum untuk kondisi jangka pendek atau selama masa pelaksanaan timbunan yang diperlihatkan pada Tabel 10.

Tabel 10 - Faktor keamanan minimum untuk perhitungan stabilitas timbunan (Pd T-11-2005-B)

Kelas Jalan	Faktor Keamanan
I	1,4
II	1,4
III	1,3
IV	1,3

4.4.4 Penurunan

Kriteria penurunan timbunan selama masa konstruksi serta kecepatan penurunan yang disyaratkan oleh Pt T-10-2002-B dapat dilihat pada Tabel 11, dengan s adalah jumlah penurunan selama masa konstruksi dan s_{tot} adalah penurunan total yang diperkirakan. Kriteria ini berlaku untuk timbunan jalan di atas tanah dasar yang lunak.

Tabel 11 - Kriteria penurunan timbunan (Pt T-10-2002-B)

Kelas Jalan	Penurunan yang Disyaratkan selama Masa Konstruksi, s/s_{tot}	Kecepatan Penurunan setelah Konstruksi (mm/tahun)
I	$> 90\%$	< 20
II	$> 85\%$	< 25
III	$> 80\%$	< 30
IV	$> 75\%$	< 30
CATATAN	s adalah jumlah penurunan selama masa pelaksanaan s_{tot} adalah penurunan total yang diperkirakan	

4.4.5 Gaya angkat hidrostatis (*hydrostatic uplift*)

Stabilitas suatu struktur atau lapisan tanah dengan permeabilitas rendah terhadap gaya angkat harus diperiksa dengan membandingkan gaya permanen untuk menstabilkan (sebagai contoh, beban dan friksi kulit) terhadap gaya permanen yang membuat tidak stabil yaitu air dan gaya lainnya (BS, 2004).

Perencanaan timbunan harus mempertimbangkan keruntuhan akibat gaya angkat dengan prinsip gaya yang membuat tidak stabil dan gaya vertikal yang bekerja adalah kurang dari atau sama dengan gaya yang menstabilkan atau tahanan yang bekerja. Gaya vertikal sebagai contoh adalah berat struktur atau berat timbunan, sedangkan tahanan yang berkerja adalah gaya-gaya gesek dan/atau gaya ankur. Angkur dalam hal ini merupakan opsi permanen untuk menahan gaya angkat. Adapun opsi-opsi umum yang direkomendasikan oleh BS (2004) untuk menahan gaya angkat hidrostatis, adalah:

- a. Menambah berat timbunan;
- b. Mengurangi tekanan air di bawah timbunan dengan drainase;
- c. Melakukan pengankuran pada lapisan bawah timbunan.

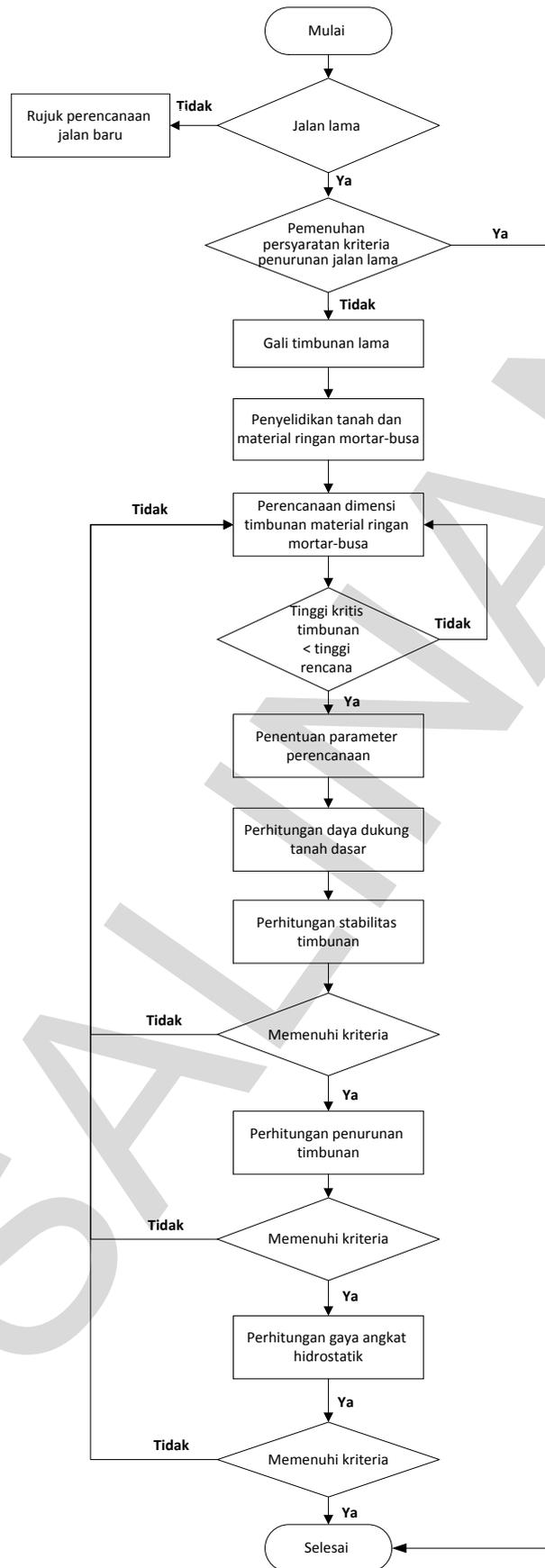
Perhitungan faktor keamanan terhadap gaya angkat hidrostatis di dalam pedoman ini merujuk pada US. Army (2003) yang memberikan nilai FK minimum terhadap gaya angkat untuk kondisi non kritis sebesar 1,3 dan kondisi kritis sebesar 1,1.

5 Prosedur perencanaan

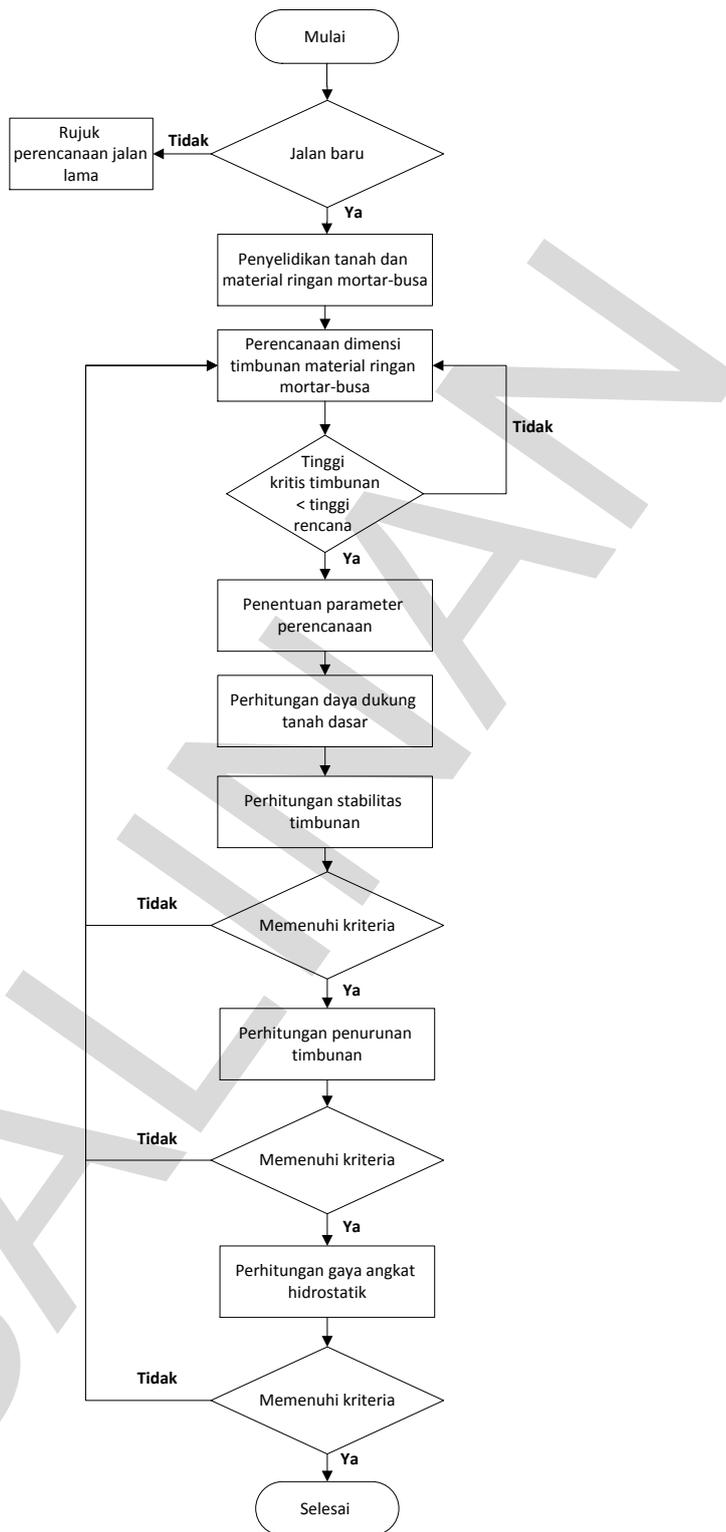
5.1 Bagan alir perencanaan

Prosedur perencanaan timbunan material ringan mortar-busa dikelompokkan menjadi dua bagan alir, yaitu bagan alir perencanaan pada konstruksi jalan lama (Gambar 2) dan bagan alir perencanaan pada konstruksi jalan baru (Gambar 3).

Perencanaan campuran material ringan mortar-busa tidak dibahas di dalam pedoman ini, namun bagan alir perencanaan campuran dapat dilihat pada Lampiran C, sedangkan prosedur lengkapnya dapat merujuk pada Pedoman Perancangan Campuran Material Ringan Mortar-Busa untuk Konstruksi Jalan.



Gambar 1 - Prosedur perencanaan timbunan material ringan mortar-busa untuk konstruksi jalan lama
12 dari 38



Gambar 2 - Prosedur perencanaan timbunan material ringan mortar-busa untuk konstruksi jalan baru

5.2 Penentuan opsi perencanaan

Tahap pertama dalam perencanaan timbunan material ringan mortar-busa adalah menentukan opsi perencanaannya, yaitu:

- Perencanaan pada jalan lama (timbunan eksisting), atau
- Perencanaan pada jalan baru.

Apabila direncanakan konstruksi timbunan di jalan lama, maka perlu dilakukan pemeriksaan penurunan timbunan eksisting terhadap kriteria penurunan pada Tabel 11. Jika tidak memenuhi persyaratan penurunan, maka perlu dilakukan penggalian timbunan eksisting.

Apabila direncanakan konstruksi timbunan jalan baru, maka tahap pertamanya adalah melakukan penyelidikan tanah di lokasi rencana konstruksi dan penyelidikan material ringan mortar-busa.

5.3 Penyelidikan tanah dan material ringan mortar-busa

Tahap penyelidikan tanah dan material ringan mortar-busa terdiri dari pengumpulan data dan studi meja, survei pendahuluan atau peninjauan lapangan, penyelidikan tanah dan penyelidikan material timbunan. Data hasil penyelidikan digunakan sebagai dasar penentuan parameter tanah dasar dan material timbunan yang dibutuhkan pada tahap perencanaan.

5.4 Penentuan dimensi timbunan

Pada tahap penentuan dimensi timbunan, opsi yang dapat dipilih adalah dimensi timbunan jalan baru atau penambahan level timbunan jalan pada konstruksi jalan lama. Dimensi timbunan rencana perlu diperiksa terhadap tinggi kritis timbunan pada tahap berikutnya.

5.5 Perhitungan tinggi kritis timbunan

Sebagai penilaian awal stabilitas timbunan, Pt T-10-2002-B memberikan rekomendasi untuk melakukan perhitungan tinggi kritis timbunan, sebagai berikut:

- hitung kuat geser tak terdrainase (c_u) rata-rata sampai kedalaman lima meter atau setebal lapisan lempung lunak bila kurang dari lima meter;
- ambil berat isi (γ) tertinggi material timbunan;
- tinggi timbunan maksimum yang aman tanpa perbaikan tanah dapat ditentukan dengan persamaan (1):

$$H_c = \frac{4c_u}{\gamma} \quad (1)$$

Keterangan:

H_c adalah tinggi kritis timbunan (m);

c_u adalah kuat geser tak terdrainase (kN/m^2);

γ adalah berat isi timbunan (kN/m^3).

Perhitungan ini tidak memperhitungkan kontribusi kuat geser dari timbunan. Apabila tinggi timbunan sudah melampaui tinggi kritisnya, maka sebagian dari timbunan tersebut harus dibongkar.

5.6 Penentuan parameter perencanaan

Tabel 12 memperlihatkan parameter perencanaan yang dibutuhkan dalam perhitungan daya dukung tanah dasar, stabilitas dan penurunan timbunan. Parameter perencanaan di dalam Tabel 12 dihasilkan dari hasil pengujian di laboratorium atau lapangan maupun korelasi antara data hasil pengujian. Parameter perhitungan gaya angkat hidrostatik tidak

disampaikan di dalam Tabel 12, karena merupakan parameter hasil perhitungan dan bukan diperoleh dari penyelidikan.

Tabel 12 - Parameter perencanaan

Parameter	Satuan	Perencanaan			Keterangan
		Daya dukung tanah dasar	Stabilitas timbunan	Penurunan timbunan	
Berat isi total (γ_b)	kN/m ³	✓	✓	✓	
Kuat geser tak terdrainase (c_u)	kN/m ²	✓	✓		
Kuat geser efektif (c')			✓		
Sudut geser efektif (ϕ)	derajat	✓	✓		
Indeks kompresi primer (C_c)	-		✓	✓	
Indeks pengembangan (C_s) – untuk <i>unloading</i>				✓	
Indeks rekompresi (C_r) – untuk <i>reloading</i>	-			✓	
Angka pori, e				✓	
Koefisien permeabilitas (k)	m/hari			✓	
Modulus Young (E)	kN/m ²			✓	
Poisson's ratio (ν)				✓	
<i>Modified swelling index</i> (λ)*				✓	
<i>Modified compression index</i> (κ)*				✓	
* Jika menggunakan perhitungan dengan metode elemen hingga, maka: $\lambda = C_c / 2,3 (1+e)$; $\kappa = 2C_r / 2,3 (1+e)$					

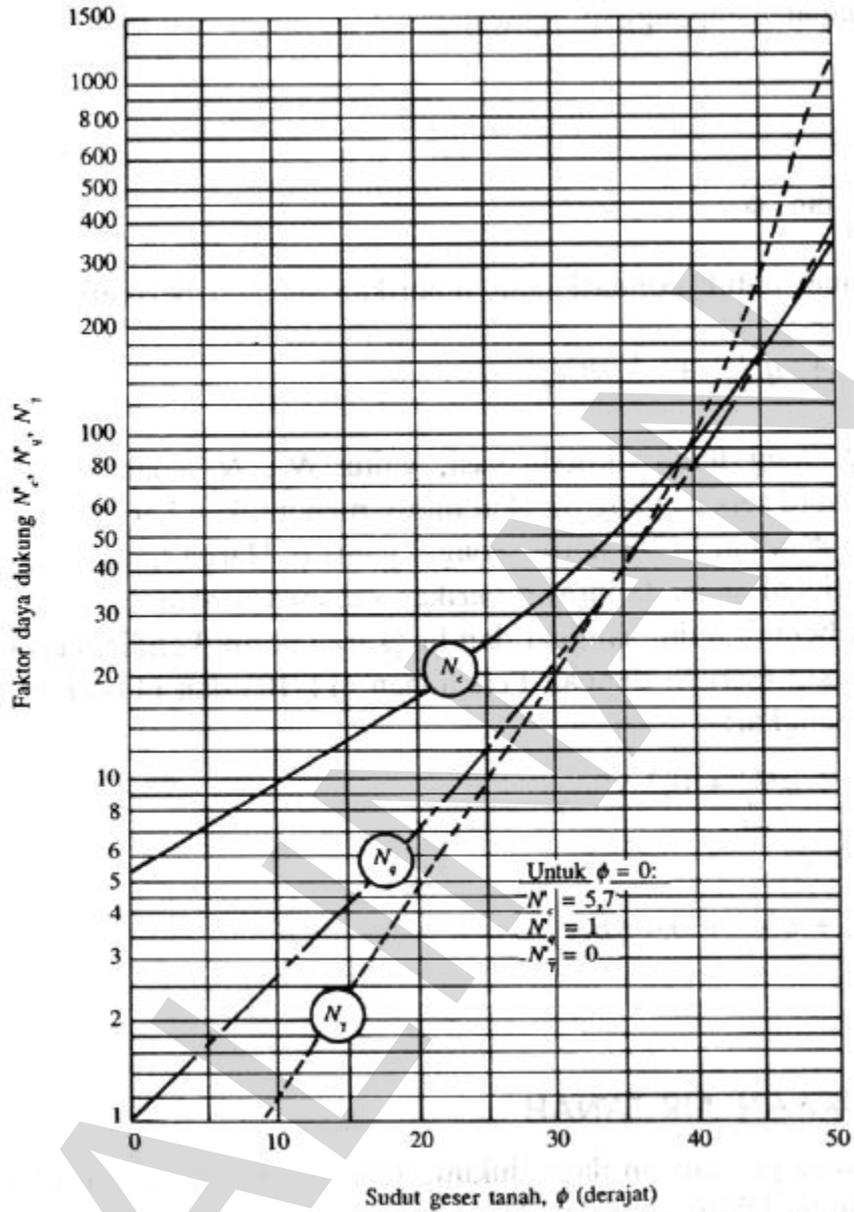
5.7 Perhitungan daya dukung

Evaluasi daya dukung tanah dasar diperlukan untuk mengetahui kemampuan tanah dasar di bawah timbunan bermaterial ringan dalam menerima beban yang bekerja (Gambar 4). Apabila terjadi keruntuhan daya dukung, maka timbunan dapat mengatasi penurunan vertikal yang dapat mempengaruhi struktur. Kapasitas daya dukung ultimit dapat mengacu ke persamaan umum Terzaghi (Das, 1990) yang diperlihatkan pada Persamaan (2).

$$q_{ult} = cN_c + \gamma D_r N_q + 0,5B_w N_\gamma \quad (2)$$

Keterangan:

- q_{ult} adalah daya dukung (kPa);
- c adalah kohesi (kPa);
- N_c, N_γ, N_q adalah faktor daya dukung Terzaghi (Gambar 3);
- γ adalah berat isi tanah (kN/m³);
- B_w adalah lebar dasar timbunan (m);
- D_r adalah kedalaman tanah yang ditinjau (m).



Gambar 3 - Faktor daya dukung Terzaghi (Das, 1990)

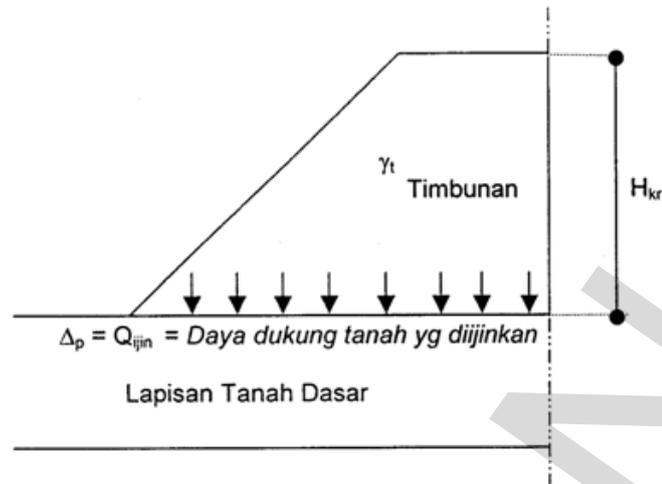
Daya dukung izin dihitung dengan Persamaan (3):

$$Q_{izin} = q_{ult}/FK \quad (3)$$

Keterangan:

Q_{izin} adalah daya dukung izin;
 q_{ult} adalah daya dukung ultimit.

Gambar 4 memperlihatkan ilustrasi perhitungan daya dukung tanah.



Gambar 4 - Ilustrasi penghitungan daya dukung tanah (Pd T-11-2003)

5.8 Perhitungan stabilitas timbunan

Perhitungan stabilitas timbunan pada intinya adalah menghitung besar faktor keamanan, FK minimum yang didefinisikan sebagai perbandingan antara kuat geser yang bekerja (s) dengan tegangan geser yang dibutuhkan untuk menjaga kesetimbangan (τ) atau bila dalam bentuk Persamaan (4) menjadi:

$$FK = \frac{s}{\tau} \quad (4)$$

Apabila kuat geser yang digunakan adalah kuat geser efektif, maka faktor keamanannya diperlihatkan pada Persamaan (5):

$$FK = \frac{c' + (\sigma - u) \tan \phi'}{\tau} \quad (5)$$

Keterangan:

- c' adalah kohesi tanah pada kondisi tegangan efektif;
- ϕ' adalah sudut geser dalam pada kondisi tegangan efektif;
- σ adalah tegangan normal pada bidang keruntuhan;
- u adalah tegangan air pori = $\sigma - u$;
- τ adalah tegangan geser untuk menjaga kesetimbangan.

Apabila kuat geser yang digunakan adalah kuat geser total, maka faktor keamanannya dihitung dengan Persamaan (6):

$$FK = \frac{c + \sigma \tan \phi}{\tau} \quad (6)$$

Keterangan:

- c adalah kohesi tanah pada kondisi tegangan total;
- ϕ adalah sudut geser dalam pada kondisi tegangan total.

5.8.1 Penentuan parameter tegangan total

Perhitungan stabilitas yang umum digunakan adalah perhitungan dengan analisis tegangan total (*Total Stress Analysis, TSA*) dan perhitungan dengan analisis tegangan efektif (*Effective Stress Analysis, ESA*). Pada perhitungan tegangan total, parameter kuat geser

material timbunan dihitung melalui pengujian tekan dengan alat triaksial pada kondisi tertentu sesuai dengan tinggi timbunannya. Stabilitas timbunan dihitung dengan hanya mempertimbangkan kuat geser tak terdrainase (*undrained*) sebelum dimulainya konstruksi, tanpa memperhitungkan kenaikan kuat geser akibat konsolidasi.

Apabila diasumsikan tanah sepenuhnya jenuh (*fully saturated*), maka kuat geser tak terdrainase yang digunakan adalah $c_u = s_u$ dan $\phi_u = 0$. Kuat geser untuk perhitungan tegangan total dapat diperoleh dari uji triaksial tak terkonsolidasi-tak terdrainase (*unconsolidated undrained, UU*), uji geser baling (*vane shear, VST*) atau sondir (CPT).

5.8.2 Penentuan parameter tegangan efektif

Kuat geser efektif yang diperlukan untuk perhitungan tegangan efektif dinyatakan dengan parameter-parameter kuat geser efektif Mohr-Coulomb, yaitu c' dan ϕ' yang didapat dari uji triaksial terkonsolidasi-terdrainase (*consolidated drained, CD*), triaksial terkonsolidasi-tak terdrainase (*consolidated undrained, CU*) dengan pengukuran tekanan air pori atau dari uji geser langsung. Nilai c' dan ϕ' dari uji triaksial CU pada prinsipnya sama dengan yang didapat dari uji triaksial CD dan geser langsung.

Perhitungan tegangan efektif memerlukan informasi tekanan air pori awal sebelum, selama dan sesudah konstruksi. Tekanan air pori awal sebelum konstruksi bisa diketahui dengan relatif mudah melalui penyelidikan lapangan. Namun, variasinya selama konstruksi sulit diprediksi dengan akurat. Mempertimbangkan hal tersebut, kondisi tak terdrainase harus dihitung dengan menggunakan tegangan total.

Kuat geser, tekanan air pori dan berat isi yang relevan untuk analisis stabilitas pada berbagai kondisi diperlihatkan pada Tabel 13 dan untuk memperoleh penjelasan lebih lengkap mengenai perhitungan tegangan total dan efektif dapat merujuk ke Dep.PU (2004).

Tabel 13 - Kuat geser, tekanan air pori dan berat isi yang relevan untuk perhitungan stabilitas pada berbagai kondisi (Dep.PU, 2004)

Jenis tanah	Parameter	Kondisi		
		Akhir konstruksi	Pembebanan beberapa tahap*)	Jangka panjang
Semua	Tekanan air eksternal	Sertakan	Sertakan	Sertakan
Semua	Berat isi	Total	Total	Total
Terdrainase (<i>drained</i>)	Kuat geser	c' dan ϕ'	c' dan ϕ'	c' dan ϕ'
Terdrainase (<i>drained</i>)	Tekanan air pori (u)	u dari analisis rembesan	u dari analisis rembesan	u dari analisis rembesan
Tak terdrainase (<i>undrained</i>)	Kuat geser	Tegangan total, c dan ϕ dari uji-lapangan, triaksial UU dan CU	Tegangan total, $\phi_u = 0$ dan c_u dari uji triaksial CU pada tekanan konsolidasi	c' dan ϕ'
Tak terdrainase (<i>undrained</i>)	Tekanan air pori	Abaikan, set $u = 0$ pada input komputer	Abaikan, set $u = 0$ pada input komputer	u dari analisis rembesan

*) Pembebanan beberapa tahap adalah suatu kondisi pembebanan ketika konsolidasi satu tahap pembebanan diikuti oleh perubahan beban dengan kondisi tak terdrainase

5.8.3 Perangkat perhitungan stabilitas

Bila data yang mencukupi sudah tersedia, maka perhitungan stabilitas harus dilakukan dengan menggunakan metode Bishop, atau metode Janbu ataupun metode lain yang lebih tepat (Pt T-10-2002-B). Apabila tersedia program komputer untuk analisis, maka dapat digunakan metode elemen hingga atau metode kesetimbangan batas.

Jika tidak ada program komputer yang tersedia untuk analisis ini, maka perhitungan dapat dilakukan secara manual menggunakan *spreadsheet*. Namun perlu diingat bahwa jika lapisan tanah dasar di bawah timbunan cukup banyak dan heterogen, direkomendasikan untuk menggunakan alat bantu hitung berupa piranti lunak. Hal ini untuk menghindari ketidaktepatan perhitungan secara manual.

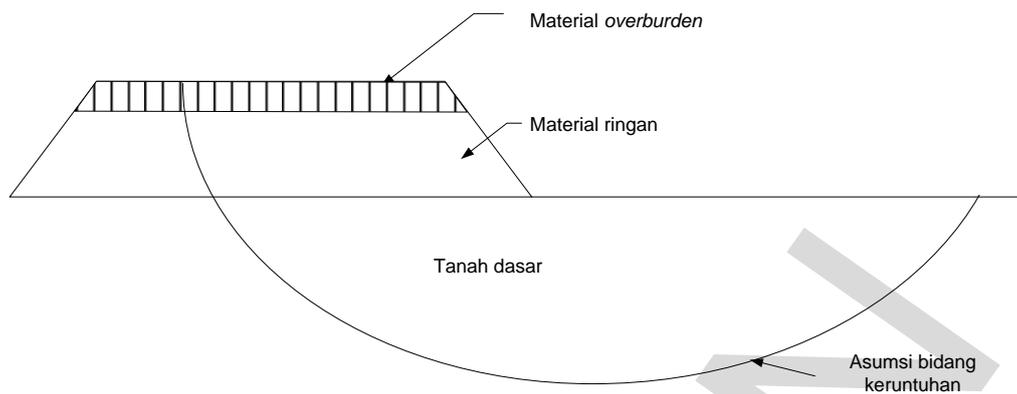
Perlu diingat pula bahwa metode perhitungan (baik menggunakan program komputer, grafik atau perhitungan manual dengan *spreadsheet*) harus dipilih berdasarkan kompleksitas timbunan dan tanah dasar yang dianalisis serta ketersediaan data yang menggambarkan kondisi lapangan. Pertimbangannya adalah sebagai berikut:

- a. Penggunaan program komputer yang tepat dan sudah terverifikasi direkomendasikan untuk analisis stabilitas, jika kondisi timbunannya kompleks dan ketersediaan data memadai serta kemungkinan terjadinya keruntuhan lereng timbunan cukup signifikan. Program komputer memberikan analisis detail yang efisien dan cepat untuk berbagai geometri timbunan dan kondisi pembebanan.
- b. Grafik kestabilan lereng timbunan, relatif sederhana untuk digunakan dan bisa dimanfaatkan untuk menganalisis kondisi jangka pendek maupun jangka panjang. Untuk menggunakan grafik kestabilan lereng, salah satunya dapat merujuk ke pedoman U.S Army (2003).
- c. Perhitungan manual dengan menggunakan *spreadsheet* dapat digunakan untuk memverifikasi hasil perhitungan dengan program komputer.
- d. Perhitungan dengan grafik juga dapat digunakan untuk memverifikasi hasil perhitungan dengan program komputer.

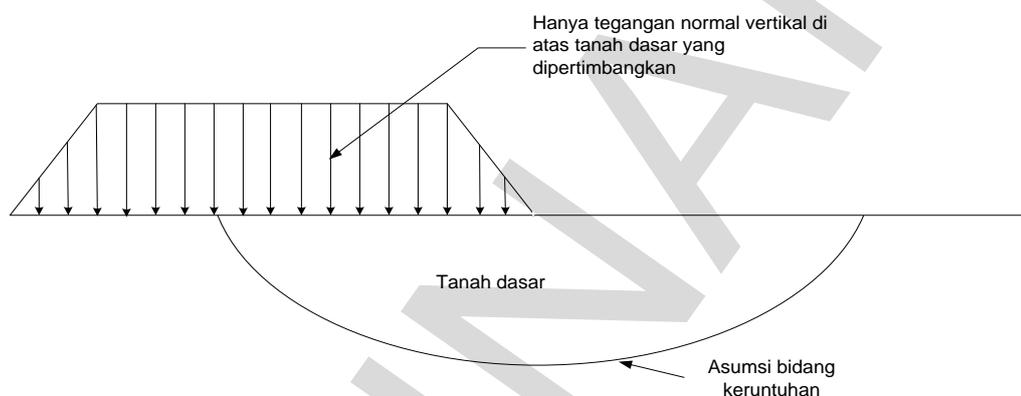
5.8.4 Pemodelan elemen hingga untuk perhitungan stabilitas timbunan ringan dengan mortar-busa

Studi penggunaan geofilm untuk timbunan menyatakan sejumlah ketidakpastian dalam memodelkan kuat geser blok *Expanded Polystyrene* (EPS) dengan menggunakan metode kesetimbangan batas dua dimensi (Arellano, dkk. 2010). Ketidakpastian terjadi saat bidang keruntuhan yang terjadi menembus massa blok timbunan material ringan sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 6a.

Satu pendekatan yang bisa memperkecil ketidakpastian tersebut adalah dengan memodelkan massa timbunan sebagai beban tambahan (*surcharge load*) dan mengaplikasikannya di atas permukaan tanah dasar (lihat Gambar 6b). Beban tambahan tersebut harus mewakili berat massa timbunan mortar-busa, material *overburden* (jika ada) dan beban tambahan lainnya.



(a) Bidang keruntuhan terjadi di dalam blok material ringan



(b) Bidang keruntuhan terjadi pada tanah dasar di bawah timbunan dengan material ringan

Gambar 5 - Tipikal model perhitungan stabilitas dua dimensi timbunan dengan material ringan (Arellano, dkk. 2010)

Model beban tambahan ini sudah dipraktekkan di Jepang sebagai model untuk perhitungan stabilitas timbunan ringan dengan blok EPS di atas tanah lunak (Arellano, dkk. 2010). Beban tambahan vertikal tersebut tampaknya merupakan model yang sesuai untuk timbunan ringan di atas tanah lunak, dengan pertimbangan utamanya adalah ketidakstabilan timbunan akibat tanah dasar lunak, dan bukan akibat blok EPS. Pendekatan serupa akan digunakan untuk memodelkan stabilitas timbunan dengan material ringan mortar-busa pada pedoman ini.

5.9 Perhitungan penurunan timbunan

Penurunan total timbunan merupakan penjumlahan dari deformasi vertikal yang timbul dari penurunan seketika atau penurunan elastik massa timbunan atau tanah dasar, konsolidasi primer dan konsolidasi sekunder tanah dasar. Penurunan total dihitung dengan Persamaan (7).

$$S_{tot} = S_i + S_p + S_s \quad (7)$$

Keterangan:

- S_{tot} adalah penurunan total;
- S_i adalah penurunan seketika atau elastik tanah dasar;
- S_p adalah penurunan akibat konsolidasi primer (akhir dari penurunan primer tanah dasar);
- S_s adalah penurunan akibat konsolidasi sekunder (konsolidasi sekunder tanah dasar).

Pada tanah-tanah anorganik penurunan konsolidasi sekunder umumnya kecil sehingga bisa diabaikan.

5.9.1 Penurunan seketika (*immediate settlement*)

Untuk menghitung dengan pendekatan penurunan timbunan di setiap titik pada dasar timbunan, maka dapat digunakan metode Janbu dkk. (1956) di dalam Holtz, dkk. (1981). Dalam perhitungan, beban timbunan yang berbentuk trapesium dianggap sebagai beban terbagi rata (beban terbagi rata berbentuk segiempat). Lebar beban timbunan yang tidak terbagi rata dianggap sebagai lebar fondasi fleksibel yang lebarnya sama dengan lebar timbunan bagian atas ditambah setengah dari jarak horisontal dari lebar dasar lereng timbunan.

Janbu, Bjerrum, dan Kjaernsli (1956) di dalam Holtz, dkk. (1981) mengusulkan cara menghitung penurunan seketika rata-rata untuk beban terbagi rata fleksibel berbentuk bujursangkar dan lingkaran sebagaimana yang diperlihatkan pada ilustrasi di Gambar 6 serta persamaan (8) dan (9), dengan E yang bervariasi dan rasio Poisson $\mu = 0,5$, sebagai berikut:

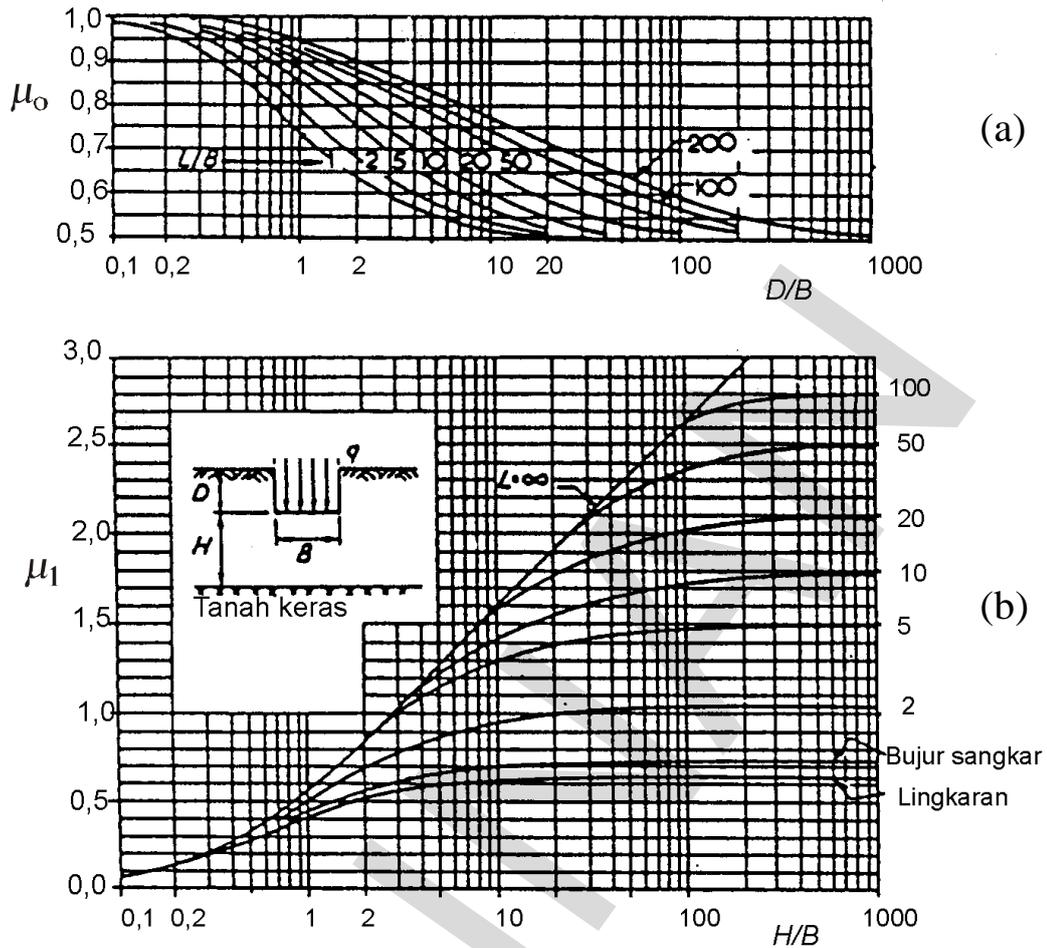
$$S_i = \mu_1 \times \mu_0 \times \frac{q_n \times B}{E} \text{ (hanya untuk } \mu = 0,5) \quad (8)$$

Bila timbunan terletak di permukaan tanah asli, maka $\mu_0 = 1$, sehingga:

$$S_i = \mu_1 \times \frac{q_n \times B}{E} \text{ (hanya untuk } \mu = 0,5) \quad (9)$$

Keterangan:

- S_i adalah penurunan seketika rata-rata (m);
- μ_0 adalah faktor koreksi untuk kedalaman fondasi D_f (Gambar 6);
- μ_1 adalah faktor koreksi untuk lapisan tanah tebal terbatas H (Gambar 6);
- B adalah lebar beban terbagi rata untuk luasan empat persegi panjang atau diameter lingkaran pada beban lingkaran (m);
- q_n adalah tambahan tegangan netto (kN/m²);
- E adalah modulus elastisitas (kN/m²).



Gambar 6 - Grafik yang digunakan dalam Persamaan (6) dan (7) (Janbu dkk., 1956 dalam Holtz, dkk., 1981)

Grafik pada Gambar 6 dapat digunakan untuk nilai modulus E yang bervariasi dengan kedalamannya, yaitu dengan mengganti sistem tanah berlapis sebagai suatu lapisan-lapisan *fiktif* yang terletak pada lapisan yang keras. Perhitungan besarnya penurunan seketika dilakukan dengan membagi tanah ke dalam beberapa lapisan yang terbatas. Jika tegangan pada tiap lapisan dapat dihitung, maka akan dapat diperoleh penurunan seketika totalnya.

5.9.2 Penurunan akibat konsolidasi

A. Distribusi tegangan di bawah timbunan

Tambahan tegangan vertikal ($\Delta\sigma_z$) akibat beban trapesium dapat dihitung dengan menggunakan diagram yang diusulkan oleh Osterberg (1957) di dalam Holtz, dkk.(1981) pada Gambar 7 atau dengan menggunakan Persamaan (10), (11) dan (12):

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi} \times \left\{ \frac{a+b}{a} \right\} \times (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{b}{a} \times \alpha_2 \quad (10)$$

atau

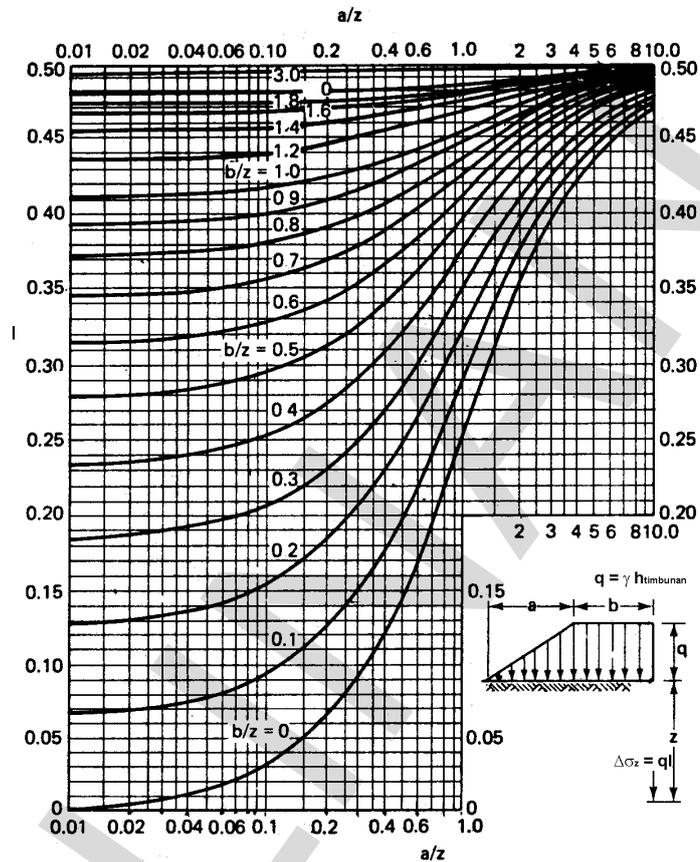
$$\Delta\sigma_z = q \times I \quad (11)$$

dengan,

$$I = \frac{1}{\pi} \times \left(\left\{ \frac{a+b}{a} \right\} \times (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{b}{a} \times \alpha_2 \right) \quad (12)$$

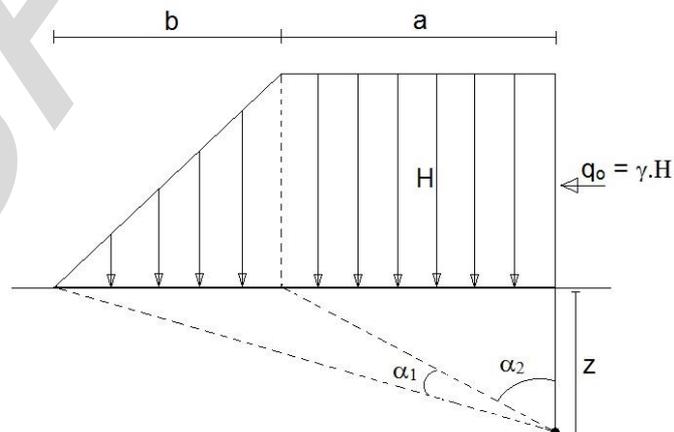
Keterangan:

q adalah tinggi sisi vertikal beban trapesium (h) x berat volume timbunan (γ timbunan).



Gambar 7 - Faktor pengaruh akibat beban timbunan Osterberg,1957 (Holtz, dkk., 1981)

Nilai α_1 , α_2 , a dan b dapat ditentukan dengan mengacu kepada ilustrasi timbunan pada Gambar 8.



Gambar 8 - Penentuan nilai α_1 , α_2 , a dan b pada timbunan (Das,1992)

B. Penurunan konsolidasi total

Penurunan konsolidasi total pada pasal ini sudah merupakan penjumlahan dari penurunan akibat konsolidasi primer, S_p dan penurunan akibat konsolidasi sekunder, S_s . Untuk menghitung penurunan konsolidasi total, S_c dengan memperhatikan grafik hubungan e -log p , dapat digunakan cara sebagai berikut:

Penurunan akibat konsolidasi total dinyatakan oleh Persamaan (13):

$$S_c = \frac{\Delta e}{1 + e_o} \times H \quad (13)$$

dengan S_c adalah penurunan konsolidasi total ($S_p + S_s$)

Untuk lempung terkonsolidasi normal (*normally consolidated*, NC), digunakan Persamaan (14):

$$\Delta e = C_c \times \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'} \quad (14)$$

Untuk lempung terkonsolidasi berlebihan (*over consolidated*, OC), harus dipertimbangkan pada dua kondisi, yaitu yang dinyatakan dengan Persamaan (15) dan Persamaan (16):

Jika $p_1' < p_c'$

$$\Delta e = C_r \times \log \frac{p_1'}{p_o'} = C_r \times \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'} \quad (15)$$

dengan $p_1' = p_o' + \Delta p$

Jika $p_o' < p_c' < p_1'$

$$\Delta e = C_r \times \log \frac{p_c'}{p_o'} + C_c \times \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_c'} \quad (16)$$

Keterangan:

- p_o' adalah tekanan efektif rata-rata;
- Δp adalah penambahan tekanan;
- p_c' adalah tekanan prakonsolidasi;
- C_c adalah indeks kompresi;
- C_r adalah indeks pengembangan (rekompresi).

C. Kecepatan konsolidasi

Penurunan konsolidasi dari waktu ke waktu diprediksi dengan menggunakan teori konsolidasi satu dimensi dari Terzaghi (1943) di dalam Holtz, dkk. (1981), yaitu saat terjadinya disipasi tekanan air pori, aliran air hanya ke arah vertikal. Konsolidasi pada waktu, t tertentu (S_t) dihitung dengan menggunakan Persamaan (17):

$$S_t = U \times S_c \quad (17)$$

dengan U adalah derajat konsolidasi yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang disarankan oleh Casagrande (1938) dan Taylor (1948) di dalam Holtz, dkk. (1981), yaitu pada Persamaan (18) dan Persamaan (19).

$$\text{Untuk } U < 60 \% : T_v = (\pi/4) \times U^2 \quad (18)$$

$$\text{Untuk } U > 60 \% : T_v = -0,933 \times \log (1-U) - 0,085 \quad (19)$$

Faktor waktu diperoleh dari Tabel 14 atau dihitung dengan Persamaan (20).

$$T_v = \frac{C_v \times t}{H_t^2} \quad (20)$$

Keterangan:

H_t adalah $\frac{1}{2}$ tebal lapisan kompresibel bila drainase dua arah (*two-way drainage*);
 H_t adalah tebal lapisan kompresibel bila drainase satu arah (*one-way drainage*).

Di lapangan, kondisi pengeluaran air pada saat konsolidasi dapat berupa drainase satu arah atau dua arah tergantung pada kondisi lapisan.

Tabel 14 - Variasi faktor waktu terhadap derajat konsolidasi (Das, 1995)

Derajat konsolidasi, U (%)	Faktor waktu, T_v
0	0
10	0,008
20	0,0031
30	0,071
40	0,126
50	0,197
60	0,287
70	0,403
80	0,567
90	0,848
100	∞

CATATAN U tetap untuk seluruh kedalaman lapisan

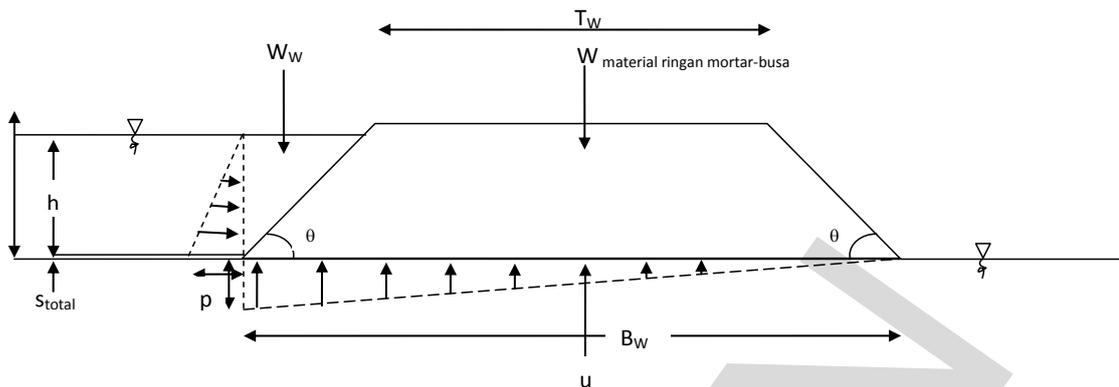
5.9.3 Perangkat untuk perhitungan penurunan

Perhitungan penurunan dilakukan dengan menggunakan metode-metode di atas dengan memanfaatkan *spreadsheet* perhitungan atau program komputer. Apabila tersedia program komputer untuk analisis, maka dapat digunakan metode beda hingga (*finite difference method*, FDM) dan metode elemen hingga.

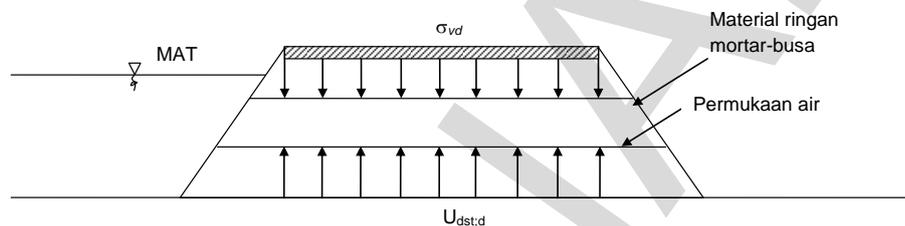
5.10 Perhitungan gaya angkat hidrostatis

Stabilitas struktur di atas lapisan tanah dasar dengan permeabilitas rendah harus mempertimbangkan gaya angkat (*uplift*) akibat tekanan hidrostatis dengan membandingkan upaya stabilisasi permanen (sebagai contoh, berat dan tahanan geser) terhadap gaya permanen yang bekerja, seperti air, tanah atau sumber lainnya.

Mortar-busa yang digunakan sebagai material ringan untuk timbunan memiliki berat isi yang rendah sehingga berpotensi untuk mengalami pengangkatan ke atas. Dengan demikian perlu mempertimbangkan stabilitas eksternal pada lapis antarmuka (*interface*) antara bagian bawah timbunan dengan tanah dasar. Gambar 9 memperlihatkan variabel-variabel untuk analisis gaya angkat ke atas pada situasi saat air hanya menekan satu sisi timbunan, sedangkan Gambar 10 memperlihatkan situasi saat air menekan kedua sisi timbunan saat banjir.



Gambar 9 - Variabel untuk analisis gaya angkat hidrostatis pada situasi saat air hanya menekan satu sisi timbunan (Arellano, 2010)



Keterangan:

σ_{vd} adalah beban yang bekerja;
 $U_{dst;d}$ adalah gaya angkat pada dasar timbunan.

Gambar 10 - Gaya angkat timbunan ringan akibat tekanan air dari kedua sisi (BS, 2004)

Distribusi tekanan hidrosatik di bawah timbunan tidak selamanya berbentuk segitiga seperti pada contoh di Gambar 9 tapi bervariasi tergantung kondisi di lapangan. Distribusi tekanan hidrostatis pada Gambar 9 juga belum memperhitungkan rembesan. Jika tekanan air berasal dari kedua sisi timbunan dan tingginya sama, maka distribusi tekanan hidrostatis di bawah timbunan akan berbentuk segiempat, bukan segitiga.

Faktor keamanan terhadap gaya angkat hidrostatis dapat dihitung melalui Persamaan (21):

$$FK = \frac{\sum N}{\sum U} \tag{21}$$

Keterangan:

$\sum N$ adalah jumlah gaya normal = $W_{mortar-busa} + W_w$;
 $\sum U$ adalah jumlah gaya angkat, U , pada dasar timbunan;
 $W_{mortar-busa}$ adalah berat timbunan mortar-busa;
 W_w adalah berat air yang menjadi komponen vertikal di atas timbunan.

Penurunan jangka panjang memberikan pengaruh besar terhadap faktor keamanan terhadap gaya angkat hidrostatis, karena itu perlu dimasukkan ke dalam perhitungan gaya angkat, U . Tekanan air P , diperoleh dari akumulasi tinggi vertikal air pada akhir konstruksi ditambah besar penurunan total yang diperkirakan, $h+S_{tot}$ serta hasil dari distribusi tekanan di sisi timbunan, dengan besaran yang dinyatakan dengan Persamaan (22) dan Persamaan (23):

$$\frac{1}{2} [\gamma_w \cdot B_w \cdot (h + S_{tot})] \tag{22}$$

sehingga Persamaan (21) menjadi Persamaan (23):

$$FK = \frac{W_{mortar\ busa} + W_W + O_{REQ}}{\frac{1}{2} \cdot \gamma_W \cdot (h + S_{tot}) \cdot B_W} \quad (23)$$

Keterangan:

O_{REQ} adalah gaya *overburden* tambahan yang dibutuhkan di atas timbunan mortar-busa untuk mencapai target faktor keamanan terhadap gaya angkat hidrostatis seluruh timbunan;

γ_W adalah berat isi air;

S_{tot} adalah perkiraan penurunan total;

B_W adalah lebar dasar timbunan.

Apabila tidak memenuhi persyaratan faktor keamanan terhadap gaya angkat hidrostatis, maka pertimbangkan mengubah dimensi timbunan atau melakukan perencanaan kebutuhan kekuatan tambahan untuk timbunan, yang tidak dibahas di dalam pedoman ini.

Lampiran A (informatif)

Contoh perencanaan timbunan jalan dengan material ringan mortar-busa pada jalan baru

Contoh kasus:

Direncanakan timbunan jalan baru yang dibangun di atas tanah dasar lempung lunak dengan data timbunan rencana sebagai berikut:

- Tinggi timbunan, $H = 1,1$ m
- Panjang timbunan, $P = 400$ m
- Lebar timbunan, $L = 7$ m
- Material timbunan adalah **mortar-busa** dengan densitas kering rencana sebesar $0,6 \text{ gr/cm}^3$ (untuk kuat tekan 800 kPa) dan $0,8 \text{ gr/cm}^3$ (untuk kuat tekan 2000 kPa)
- Parameter kekuatan timbunan mortar-busa yang dimiliki adalah parameter tegangan total, yaitu $c_u = 60$ kPa dan $\phi = 45^\circ$ (untuk kuat tekan 800 kPa) dan $c_u = 60$ kPa dan $\phi = 40^\circ$ (untuk kuat tekan 2000 kPa).

Hasil penyelidikan dan pengujian tanah dasar lempung lunak di bawah timbunan jalan rencana memberikan informasi data kompresibilitas dan kuat geser yang diperlihatkan pada Tabel A.1:

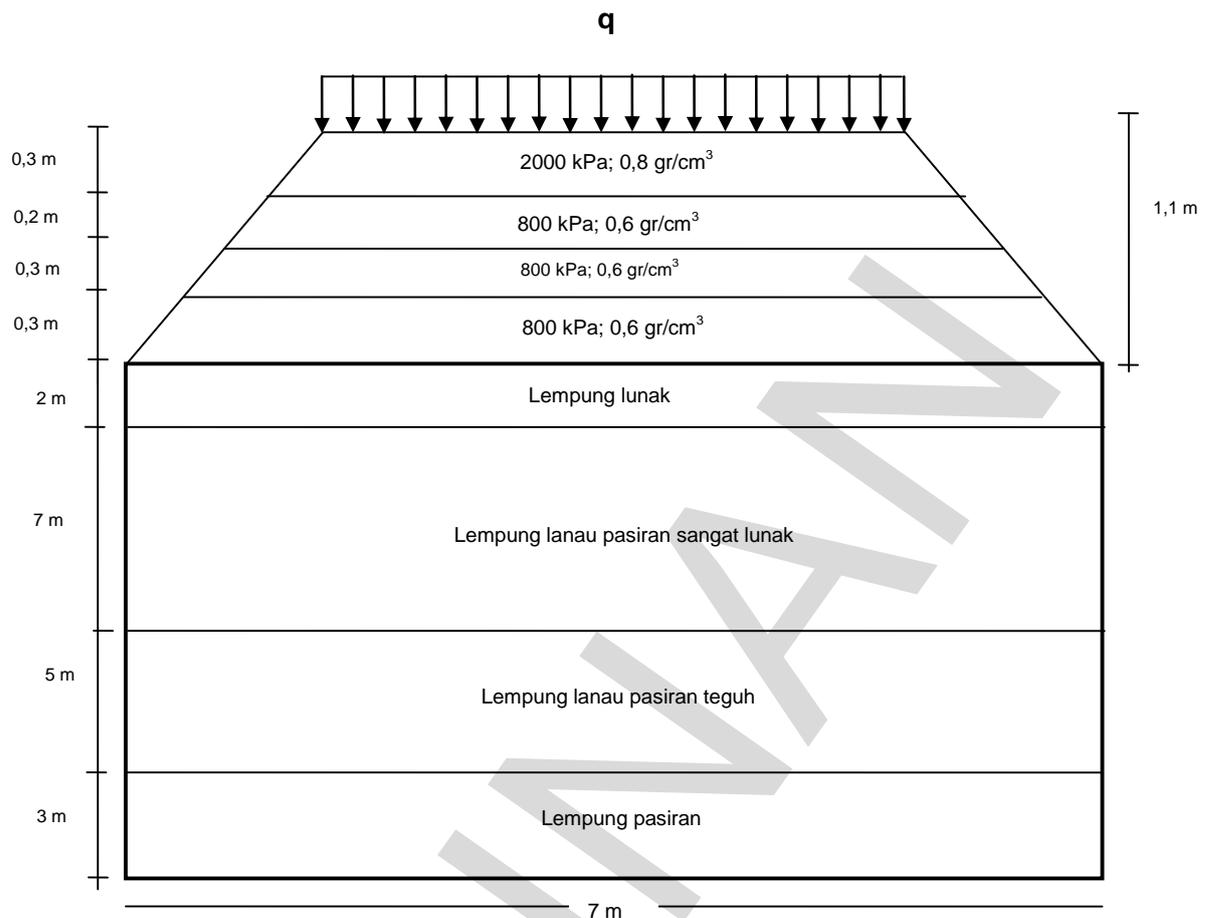
Tabel A.1 - Data hasil pengujian tanah dasar lempung lunak

Jenis tanah dasar di bawah timbunan	Ketebalan (m)	C_c	C_s	e_o	C_v (m ² /tahun)	γ (kN/m ³)	C_u (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)
Lempung lunak	2	0,16	0,06	0,7	13,91	19	10	12	17,5
Lempung lanau pasir sangat lunak	7	1,02	0,014	2,49	13,12	14,3	12	5	16,74
Lempung lanau pasir teguh	5	0,2	0,02	0,87	8,43	18,5	30	16	17,4
Lempung pasir	3	0,16	0,02	0,8	11,71	19	45	3	15,81

Dengan merujuk pada tahapan perencanaan di dalam laporan ini (pasal 5), lakukan perhitungan dan pemeriksaan kriteria yang disyaratkan, untuk:

- 1) tinggi kritis timbunan rencana;
- 2) daya dukung tanah dasar;
- 3) stabilitas timbunan;
- 4) penurunan total timbunan;
- 5) pengaruh gaya angkat hidrostatik.

Gambar A.1 memperlihatkan contoh potongan melintang timbunan material ringan mortar-busa untuk konstruksi jalan.



Gambar A.1 - Contoh potongan melintang timbunan jalan dengan material ringan mortar-busa

Penyelesaian:

- 1) Langkah pertama adalah menghitung tinggi kritis timbunan di atas tanah lunak**
 Persamaan yang digunakan, merujuk ke Persamaan (1) adalah sebagai berikut:

$$H_c = \frac{4c_u}{\gamma}$$

Keterangan:

γ timbunan, diambil nilai rata-ratanya sebesar 7 kN/m^3 ;

c_u adalah $(10+12)/2 = 11 \text{ kN/m}^2$.

Tinggi timbunan, H , direncanakan adalah $1,1 \text{ m}$.

sehingga diperoleh:

$$H_c = (4 \times 11)/7 = 6,28 \text{ m} > 1,1 \text{ m}$$

Tinggi timbunan kritis lebih besar daripada tinggi timbunan rencana (memenuhi syarat).

- 2) Langkah kedua adalah menghitung daya dukung tanah dasar**

Daya dukung tanah dasar dihitung dengan menggunakan Persamaan (2).

Lapisan tanah yang ditinjau adalah lapis lempung lunak dan sangat lunak di bawah timbunan.

Parameter c , ϕ , dan γ diperoleh dari hasil interpolasi pada lapisan tanah yang ditinjau. Dari hasil interpolasi, diperoleh:

$c = 11,55 \text{ kPa}$; $\phi = 16,91 \sim 17$; dan $\gamma = 25,34 \text{ kN/m}^3$ (sudah mempertimbangkan kondisi muka air tanah) dengan menggunakan Gambar 4, diperoleh $N_c = 12,34$; $N_q = 4,77$; $N_\gamma = 3,53$ sehingga:

$$q_{ult} = cN_c + \gamma D_f N_q + 0,5 B_w N_\gamma$$

$$q_{ult} = 11,55 \times 12,34 + (15,34 - 9,81) \times 9 \times 4,77 + 0,5 \times 7 \times 3,53$$

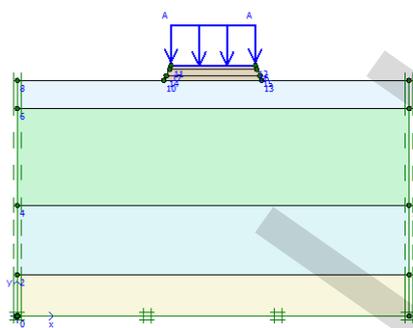
$$q_{ult} = 813,43 \text{ kPa}$$

3) Langkah ketiga adalah menghitung stabilitas timbunan

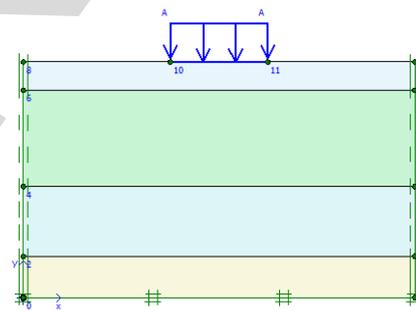
Mempertimbangkan kompleksnya geometri timbunan dan tanah dasar di bawahnya, perhitungan stabilitas timbunan di dalam contoh perhitungan ini menggunakan program komputer yang berbasis metode elemen hingga.

Tanah dasar di bawah timbunan dimodelkan dengan model material *soft-soil*. Perhitungan yang dilakukan adalah untuk kondisi jangka pendek dengan analisis tegangan total dan parameter kuat geser tak terdrainase (*undrained*). Dengan merujuk pada 5.8.4 untuk pemodelan timbunan dengan material ringan di atas tanah dasar lunak, maka parameter kuat geser timbunan tidak dipergunakan di dalam perhitungan. Pada perhitungan ini, beban yang bekerja diasumsikan adalah beban lalu lintas untuk jalan kelas I sebesar 15 kPa, ditambah berat timbunan (yang dikonversikan menjadi beban merata).

Geometri model timbunan jalan rencana dengan material ringan mortar-busa diperlihatkan pada Gambar A.2. Parameter tanah dasar diperlihatkan pada Tabel A.2, sedangkan bidang keruntuhan timbunan dari hasil analisis diperlihatkan pada Gambar A.3.



(a) Model timbunan biasa



(b) Model timbunan mortar-busa (berat timbunan dikonversikan menjadi beban merata)

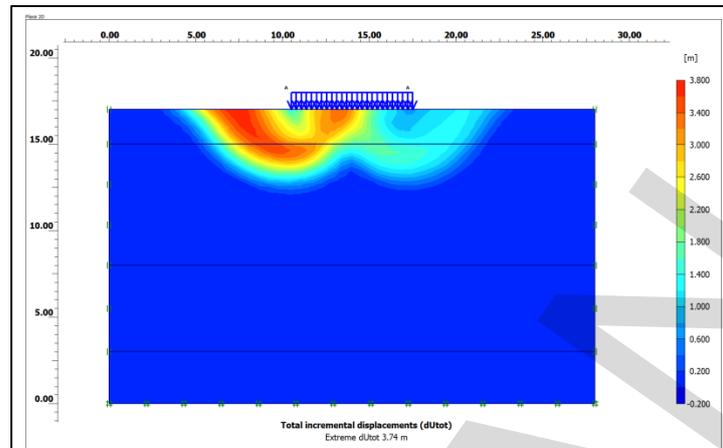
Gambar A.2 - Geometri model timbunan jalan rencana untuk perhitungan stabilitas

Tabel A.2 - Parameter tanah dasar untuk analisis stabilitas timbunan

No.	Jenis material tanah dasar	Tipe	γ_{unsat}	γ_{sat}	k_x	k_y	λ^*	κ^*	c_{ref}	ϕ
			[kN/m ³]	[kN/m ³]	[m/day]	[m/day]	[-]	[-]	[kN/m ²]	[°]
1	timbunan lama	UnDrained	18	19	6,56E-05	6,56E-05	0,046377	0,034783	12	17,5
3	lempung lanau pasir sangat lunak	UnDrained	13,3	14,3	0,00061	0,00061	0,295652	0,008116	5	16,74
2	lempung lanau pasir teguh	UnDrained	17,5	18,5	3,93E-05	3,93E-05	0,057971	0,011594	16	17,4
4	lempung pasir	UnDrained	18	19	8,42E-07	8,42E-07	0,046377	0,011594	3	15,81

Dari hasil perhitungan stabilitas timbunan dengan metode elemen hingga, diperoleh faktor keamanan jangka pendek (perhitungan tegangan total) sebesar 2,88 sehingga memenuhi kriteria

faktor keamanan minimum yang disyaratkan, yaitu 1,30 untuk jalan kelas I (Pt T-10-2002-B). Bidang keruntuhan dari hasil perhitungan diperlihatkan pada Gambar A.3.



Gambar A.3 - Bidang keruntuhan timbunan dari hasil perhitungan stabilitas

4) Langkah keempat adalah menghitung penurunan total yang terjadi

Pada contoh ini, penurunan seketika (S_i) diabaikan.

Pada contoh ini, penurunan total yang dihitung adalah akibat penimbunan lapis pertama dengan tinggi timbunan, $H = 0,30$ m, kuat tekan mortar-busa = 800 kPa, dan γ mortar-busa = $0,6 \text{ gr/cm}^3$.

Titik tinjau penurunan adalah pada lapisan lempung lunak setebal 2 m di bawah timbunan.

Ditinjau dari $z = 1$ m tanah dasar lapis ke-1 (lempung lunak), maka peningkatan tekanan efektif di bawah timbunan dihitung dengan persamaan berikut:

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{\pi} \times \left(\left\{ \frac{a+b}{a} \right\} \times (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{b}{a} \times \alpha_2 \right) = \Delta\sigma_z = q \times I, \text{ dengan}$$

$$I = \frac{1}{\pi} \times \left(\left\{ \frac{a+b}{a} \right\} \times (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{b}{a} \times \alpha_2 \right)$$

H = tinggi timbunan = 0,30 m

γ = berat isi timbunan = $0,6 \text{ gr/cm}^3$

$q = \gamma \times H$

$\alpha_2 = \tan^{-1}\left(\frac{b}{z}\right)$

α_1 (radians) = $\tan^{-1}\left(\frac{a+b}{z}\right) - \left[\tan^{-1} - \left(\frac{b}{z}\right)\right]$, dengan z adalah kedalaman lapisan yang ditinjau.

Posisi a dan b juga α_1 dan α_2 diperlihatkan pada sketsa pada Gambar 8.

Berdasarkan Gambar 8, diperoleh untuk lapisan 0,30 m pertama timbunan: $b = 3,0$ m, $a = 0,13$ m, dan diperoleh:

- $\alpha_1 = 0,007$
- $\alpha_2 = 1,405$
- q timbunan = $6 \times 0,3 = 1,80 \text{ kN/m}^2$
- $I = \frac{1}{\pi} \times \left(\left\{ \frac{a+b}{a} \right\} \times (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{b}{a} \times \alpha_2 \right)$
- $I = \frac{1}{\pi} \times \left(\left\{ \frac{0,13+3,0}{0,13} \right\} \times (0,007 + 1,405) - \frac{3,0}{0,13} \times 1,405 \right) = 0,499$
- $\Delta\sigma_z = \Delta P = \text{peningkatan tekanan efektif} = I \times 2q = 0,499 \times 2 \times 1,80 \text{ kN/m}^2 = 1,797 \text{ kN/m}^3$

Untuk perhitungan penurunan konsolidasi, diperlukan perhitungan tekanan prakonsolidasi (P_c'), dengan tekanan *overburden* (P_0) adalah:

$$P_o' = \text{tekanan efektif mula-mula} = (z/2) \times (\gamma - 10) = (1/2) \times (19 - 10) = 4,5 \text{ kPa}$$

$$P_c' = P_o' \times \text{OCR, untuk lempung terkonsolidasi normal, OCR} = 1, \text{ sehingga:}$$

$$P_c' = 4,5 \times 1 = 4,5 \text{ kPa}$$

$$P_i' = P_o' + \Delta P = 4,5 + 1,797 = 6,297 \text{ kPa}$$

Selanjutnya adalah menghitung penambahan angka pori untuk lempung terkonsolidasi normal, yaitu:

$$\Delta e = C_c \times \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'}$$

dengan C_c lapisan lempung lunak = 0,16

$$\Delta e = 0,16 \times \log \frac{4,5 + 1,797}{4,5} = 0,023$$

Dengan demikian, penurunan akibat konsolidasi total pada lapisan lempung lunak pada titik tinjau yaitu 1 m di bawah timbunan mortar-busa, adalah:

$$S_c = \frac{\Delta e}{1 + e_o} \times H$$

$$S_c = \frac{0,023}{1 + 0,7} \times 1 = 0,0137 \text{ m}$$

Hasil perhitungan penurunan selengkapnya untuk lapisan-lapisan tanah lainnya di bawah timbunan dirangkum pada Tabel A.4.

Untuk menghitung penurunan total timbunan setinggi 1,1 m, dilakukan langkah perhitungan yang sama dengan di atas dengan meninjau setiap lapis tanah dasar di bawah timbunan.

Perhitungan kecepatan konsolidasi

Dengan merujuk pada Persamaan (17), (18), (19) dan (20), maka dapat dilakukan perhitungan faktor waktu dihitung dengan persamaan berikut.

$$T_v = \frac{C_v \times t}{H_t^2}$$

t = waktu penurunan,

H_t = 17 m (drainase satu arah)

$$\sum \left(\frac{h}{\sqrt{C_v}} \right) = (0,536 + 1,931 + 1,722 + 0,876) = 5,067$$

$$C_v = \text{kumulatif } C_v \text{ lapisan tanah dasar} = \frac{\sum H}{\sum \left(\frac{h}{\sqrt{C_v}} \right)} = \frac{(17)^2}{(5,067)^2} = 11,25$$

Dengan T_v yang diperoleh dari Tabel 14, maka:

$$t_{50} = \frac{0,197 \times 17^2}{11,25} = 5,1 \text{ tahun} ; t_{90} = \frac{0,848 \times 17^2}{11,25} = 21,8 \text{ tahun}$$

Dengan persamaan 18 dan 19, maka:

$$T_v = (\pi/4) \times U(50\%)^2 ; U(50\%) = 50,13\%$$

$$T_v = -0,933 \times \log (1 - U(90\%)) - 0,085 ; U(90\%) = 89,97\%$$

S_{tot} (S_c) yang terjadi adalah sebesar 0,260 m atau 260 mm, sehingga:

$$S_t(50\%) = U(50\%) \times S_c = 50,13\% \times 0,260 = 0,130 \text{ m atau } 130 \text{ mm}$$

$$S_t(90\%) = U(90\%) \times S_c = 89,87\% \times 0,260 = 0,233 \text{ m atau } 233 \text{ mm}$$

Tabel A.3 adalah hasil dari seluruh perhitungan penurunan sampai dengan tinggi timbunan mencapai 1,1 m.

Tabel A.3 - Hasil perhitungan penurunan

Tinggi timbunan (m)	Penurunan total (m)	Penurunan 50% (m)	Penurunan 90% (m)	Sisa tinggi timbunan (m)
0.3	0.06	0.03	0.05	0.24
0.8	0.15	0.07	0.13	0.62
1.1	0.26	0.13	0.23	0.81

Jika merujuk pada kriteria penurunan pada Tabel 11, maka besar penurunan yang terjadi selama masa konstruksi (>90%) yaitu 0,23 m (230 mm) selama 21,8 tahun atau diperkirakan sebesar:

$$\frac{230}{21,8} = 10,55 \text{ mm/tahun} < 20 \text{ mm/tahun (memenuhi persyaratan)}$$

Dengan demikian penurunan total yang terjadi masih memenuhi kriteria penurunan timbunan di atas tanah lunak.

Tabel A.4 - Rangkuman hasil perhitungan penurunan untuk timbunan lapis pertama (H = 0,30m)

No.	Jenis tanah	Ketebalan (m)	Ketebalan kumulatif (m)	z (m)	γ (kN/m ³)	Pó	OCR	P'c	$\alpha 2$	$\alpha 1$	I	$\Delta P = \Delta \sigma z$	P 1	Cc	Cs	e0	Δe	S (m)
1	Lempung lunak	6	7	8	19	4,5	1	4,5	1,405648	0,007059	0,499109	1,796793	6,296793	0,16	0,06	0,7	0,023345	0,01373
2	Lempung lunak	12	2	1,5	19	13,5	1	13,5	1,107149	0,017542	0,480844	1,731039	15,23104	0,16	0,06	0,7	0,008383	0,00493
						15		16										
3	Lempung sangat lunak	1	3	2,5	14,3	17,8	1	17,8	0,876058	0,021767	0,438219	1,577587	19,37759	1,02	0,014	2,49	0,037617	0,01078
4	Lempung sangat lunak	1	4	3,5	14,3	22,1	1	22,1	0,708626	0,022032	0,386863	1,392706	23,49271	1,02	0,014	2,49	0,027072	0,00776
5	Lempung sangat lunak	1	5	4,5	14,3	26,4	1	26,4	0,588003	0,020687	0,338617	1,219021	27,61902	1,02	0,014	2,49	0,019996	0,00573
6	Lempung sangat lunak	1	6	5,5	14,3	30,7	1	30,7	0,499347	0,018909	0,297382	1,070574	31,77057	1,02	0,014	2,49	0,015184	0,00435
7	Lempung sangat lunak	1	7	6,5	14,3	35	1	35	0,432408	0,017156	0,263243	0,947674	35,94767	1,02	0,014	2,49	0,011835	0,00339
8	Lempung sangat lunak	1	8	7,5	14,3	39,3	1	39,3	0,380506	0,015575	0,235146	0,846526	40,14653	1,02	0,014	2,49	0,009441	0,00271
9	Lempung sangat lunak	1	9	8,5	14,3	43,6	1	43,6	0,339293	0,014193	0,211911	0,76288	44,36288	1,02	0,014	2,49	0,007684	0,00220
10	Lempung lunak pasiran teguh	1	10	9,5	18,5	52,1	1	52,1	0,305879	0,012998	0,192525	0,693091	52,79309	0,2	0,02	0,87	0,001148	0,00061
11	Lempung lunak pasiran teguh	1	11	10,5	18,5	60,6	1	60,6	0,2783	0,011965	0,176185	0,634265	61,23426	0,2	0,02	0,87	0,000904	0,00048
12	Lempung lunak pasiran teguh	1	12	11,5	18,5	69,1	1	69,1	0,255182	0,01107	0,162269	0,58417	69,68417	0,2	0,02	0,87	0,000731	0,00039
13	Lempung lunak pasiran teguh	1	13	12,5	18,5	77,6	1	77,6	0,235545	0,010289	0,150304	0,541095	78,1411	0,2	0,02	0,87	0,000604	0,00032
14	Lempung lunak pasiran teguh	1	14	13,5	18,5	86,1	1	86,1	0,218669	0,009605	0,139923	0,503722	86,60372	0,2	0,02	0,87	0,000507	0,00027
15	Lempung pasiran	1	15	14,5	19	95,1	1	95,1	0,204018	0,009001	0,130841	0,471026	95,57103	0,16	0,02	0,8	0,000343	0,00019
16	Lempung pasiran	1	16	15,5	19	104,1	1	104,1	0,191184	0,008466	0,122836	0,442209	104,5422	0,16	0,02	0,8	0,000295	0,00016
17	Lempung pasiran	1	17	16,5	19	113,1	1	113,1	0,179853	0,007988	0,115732	0,416635	113,5166	0,16	0,02	0,8	0,000256	0,00014
			17															0,05816

5) Langkah kelima adalah menghitung stabilitas terhadap gaya angkat hidrostatis

Dengan merujuk pada 4.4.5, dilakukan perhitungan faktor keamanan terhadap gaya angkat hidrostatis, sebagai berikut:

$$W_{\text{mortar-busa}} \text{ (per meter lari)} = \text{Volume timbunan} \times \gamma_{\text{mortar-busa}} = [(6+7)/2 \times 1,1] \times 1 \times [(6+8)/2]$$

$$W_{\text{mortar-busa}} \text{ (per meter lari)} = 50,05 \text{ kN}$$

W_w diasumsikan hanya menekan satu sisi timbunan, dengan distribusi beban seperti Gambar 9 dan tinggi air diasumsikan 0,5 m.

$$W_w \text{ (per meter')} = \frac{1}{2} \times (a \times H_w) \times 1 \text{ m} \times \gamma_w = \frac{1}{2} \times (0,5 \times (0,5+0,29)) \times 1 \times 9,81 = 1,98 \text{ kN/m}$$

O_{REQ} dalam contoh perhitungan ini diasumsikan sama dengan nol

$$B_w = 7 \text{ m}$$

$$S_{tot} \text{ dari Langkah Ketiga} = 0,26 \text{ m}$$

Dengan demikian, dapat dihitung:

$$FK = \frac{W_{\text{mortar busa}} + W_w + O_{REQ}}{\frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot (h + S_{tot}) \cdot B_w} = \frac{50,05 + 1,98 + 0}{\frac{1}{2} \cdot 9,81 \cdot ((0,5 + 0,29) + 0,26) \cdot 7} = 1,44$$

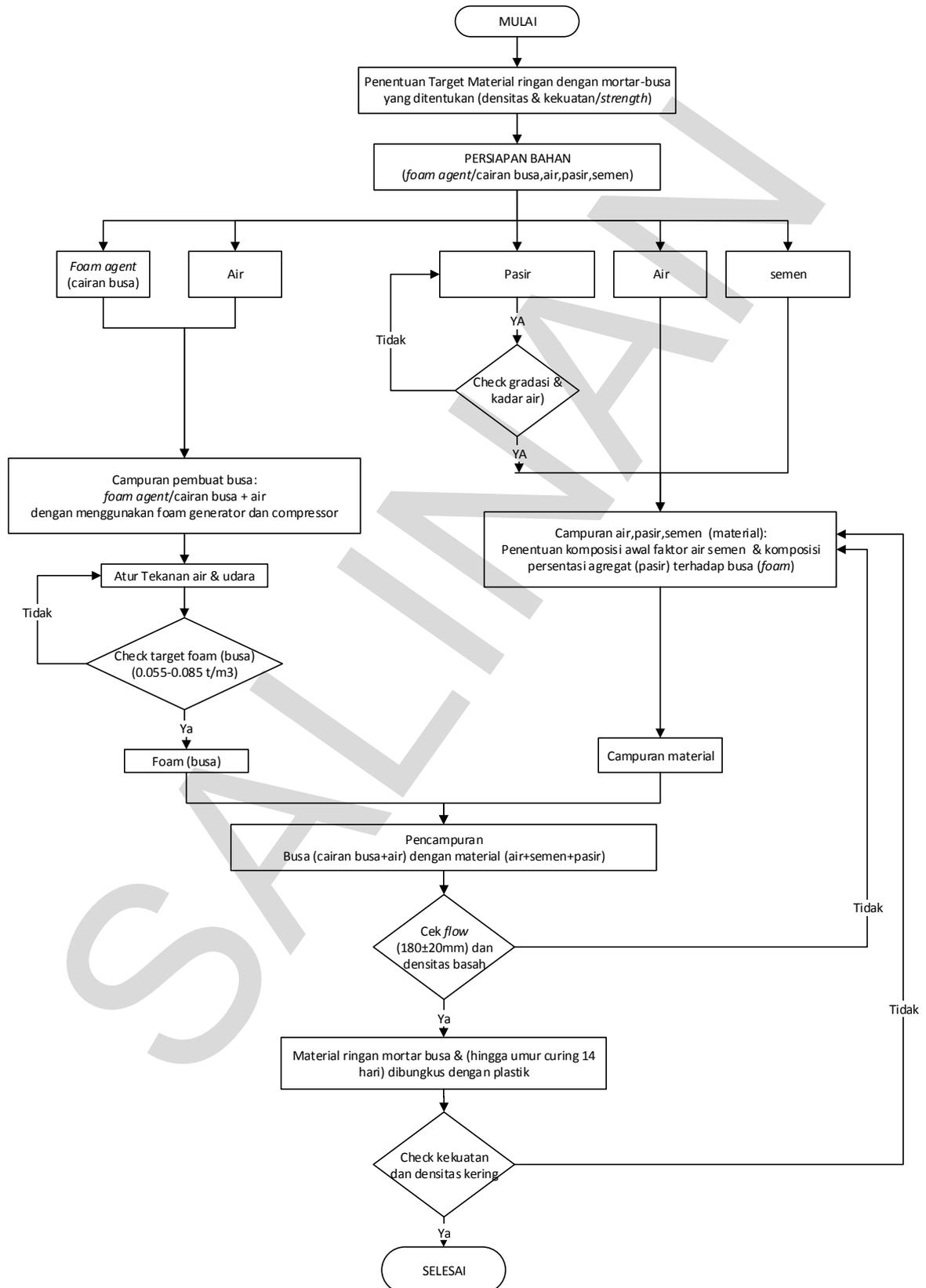
Jika menggunakan kriteria dari US. Army (2003) untuk kondisi kritis, yaitu FK minimum = 1,1, maka:

FK hasil perhitungan = 1,44 > 1,1 (memenuhi persyaratan)

Apabila hasil perhitungan menunjukkan nilai FK yang tidak memenuhi persyaratan dan dilakukan penambahan berat timbunan sebesar O_{REQ} , maka perlu dilakukan kembali perhitungan stabilitas, perhitungan penurunan dan perhitungan stabilitas gempa akibat penambahan beban timbunan.

Lampiran B (informatif)

Bagan alir perancangan campuran material ringan mortar-busa



Bibliografi

- Arellano, D. *Preliminary Design Procedure for EPS-Block Geofilm Lightweight Fill in Levees Overlying Soft Ground*. 27th Annual Association of State Dam Safety Officials Conference. Washington. 2010.
- Aschuri, I., Yamin, R.A. *The Use of Stress Absorbed Membrane Interlayer (SAMI) to Reduce Reflection Crack on Road Pavement*. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 8. 2011.
- BS. *Eurocode 7: Geotechnical Design - Part 1 General Rules*. BS EN 1997-1:2004. The British Standard. 2004.
- BSN. SNI 1726:2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Badan Standardisasi Nasional (BSN). 2012.
- CROW. *Light-Weight Materials in Road Construction (Lichte Ophoogmaterialen In De Wegenbouw)* version 8. Januari 2013.
- Das, Braja.M. *Principles of Foundation Engineering*. PWS- Kent Publishing Company Boston. 1990.
- Das. *Prinsip-Prinsip Mekanika Tanah, Braja M. Das, Alih Bahasa Indrsurya B. Moctar*. 1995.
- DBM. *Standar Perencanaan Geometrik untuk Jalan Perkotaan*. Direktorat Jenderal Bina Marga, Direktorat Pembinaan Jalan Kota. Maret. 1982.
- Dep.PU. *Pedoman Perencanaan Konstruksi Jalan di Atas Gambut dengan Metode Prapembebanan. Pd T-06-2004-B*. Departemen Pekerjaan Umum. 2004.
- Depkimpraswil. *Pedoman Perencanaan Timbunan Jalan Pendekat Jembatan. Pd T-11-2003-B*. Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. 2003.
- Dep.PU. ISBN: 979-95959-1-6. *Panduan Geoteknik Jalan. Edisi II*. Japan International Cooperation Agency dan Departemen Pekerjaan Umum. 2006.
- Holtz, R.D, Kovacks, W.D. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice Hall. 1981.
- Kemen. PU. *Spesifikasi Material Ringan dengan Mortar Busa untuk Konstruksi Jalan*. Kementerian Pekerjaan Umum. 2011.
- Kemen. PU. R3 *Pedoman Perancangan Campuran Material Ringan Mortar-Busa untuk Konstruksi Jalan*. Kementerian Pekerjaan Umum. 2014.
- Ohio EPA. Chapter 7 *Hydrostatic Uplift Analysis*. http://www.epa.state.oh.us/dsiwm/document/guidance/gd_660.pdf. 2005.
- Pt-T-8-2002-B. *Panduan Geoteknik 1 - Proses Pembentukan dan Sifat-Sifat Dasar Tanah Lunak. Edisi Pertama Bahasa Indonesia*. Puslitbang Prasarana Transportasi. Bandung. Juli, 2002.
- Pt-T-09-2002-B. *Panduan Geoteknik 2 - Penyelidikan Tanah Lunak, Desain dan Pekerjaan Lapangan. Edisi Pertama Bahasa Indonesia*. Puslitbang Prasarana Transportasi. Bandung. Juli, 2002.
- Pt-M-01-2002-B. *Panduan Geoteknik 3 - Penyelidikan Tanah Lunak, Pengujian Laboratorium. Edisi Pertama Bahasa Indonesia*. Puslitbang Prasarana Transportasi. Bandung. Juli, 2002.
- Pt-T-10-2002-B. *Panduan Geoteknik 4- Desain dan Konstruksi. Edisi Pertama Bahasa Indonesia*. Puslitbang Prasarana Transportasi. Bandung. Juli, 2002.
- Tomlinson. M.J. *Foundation Design and Construction*. 7th ed. Pearson Education. 569 p. ISBN 0130-31180-4. 2001.

TRB. *Seismic Design and Performance of Bridges*. TRB Publications. 2009.

U.S Army. Engineering and Design. *Slope Stability. Engineer Manual EM1110-2-1902*.

Department of the Army, U.S Army Corps of Engineers. Washington D.C. 2003.

**Ditetapkan di Jakarta
pada tanggal 18 Mei 2015**

**MENTERI PEKERJAAN UMUM
DAN PERUMAHAN RAKYAT,**



M. Basuki Hadimuljono

M. BASUKI HADIMULJONO

SALINAN

SALINAN