

PEDOMAN

Pd T-06-2004-B

Konstruksi dan Bangunan

**Perencanaan konstruksi timbunan jalan
di atas gambut dengan metode prapembebanan**



DEPARTEMEN PERMUKIMAN DAN PRASARANA WILAYAH

Daftar isi

Daftar isi	i-ii
Daftar gambar	iii
Daftar tabel	iii
Prakata	iv
1 Ruang lingkup	1
2 Acuan normatif	1
3 Istilah dan definisi	2
3.1 gambut	2
3.2 gambut berserat atau <i>fibrous</i>	2
3.3 gambut amorf atau <i>amorphous</i>	2
3.4 prapembebanan (<i>preloading</i>)	2
3.5 penurunan primer	2
3.6 penurunan sekunder	2
3.7 beban tambahan (<i>surcharge</i>)	3
3.8 rasio beban tambahan	3
3.9 pemantauan (<i>monitoring</i>)	3
3.10 indeks kompresi	3
3.11 indeks rekompresi	3
3.12 tegangan <i>overburden</i>	3
3.13 tegangan prakonsolidasi	3
3.14 koefisien kompresi sekunder	3
4 Prinsip-prinsip	3
5 Analisis	4
5.1 Analisis stabilitas	4
5.1.1 Kuat geser untuk analisis stabilitas	4
5.1.1.1 Analisis tegangan total (TSA)	4
5.1.1.2 Analisis tegangan efektif (ESA)	6
5.1.1.3 Kenaikan kuat geser	6
5.1.2 Metode kesetimbangan batas	7
5.1.3 Metode elemen hingga (<i>finite element method, FEM</i>)	7
5.1.4 Faktor keamanan	9
5.2 Analisis penurunan	9
5.2.1 Metode konvensional	9
5.2.1.1 Penurunan awal	9
5.2.1.2 Penurunan konsolidasi primer	10
5.2.1.3 Kompresi sekunder	12
5.2.1.4 Metode Den Haan	13
5.2.1.5 Laju penurunan konsolidasi	13

5.2.2	Metode numerik	14
5.2.2.1	Metode beda hingga (FDM)	14
5.2.2.2	Metode elemen hingga (FEM)	14
6	Desain	15
6.1	Pemberian beban tambahan untuk memperkecil penurunan konsolidasi primer	16
6.2	Pemberian beban tambahan untuk memperkecil penurunan sekunder selama masa layan	17
6.3	Parameter-parameter desain	20
6.4	Pertimbangan-pertimbangan desain	20
7	Monitoring	20
7.1	Pendahuluan	20
7.2	Instrumentasi	21
7.3	Interpretasi hasil-hasil monitoring	23
8	Contoh perhitungan	23
	Lampiran A Sifat-sifat Umum Gambut (informatif)	25
A.1	Pendahuluan	25
A.2	Klasifikasi geoteknik gambut	25
A.3	Perilaku rekayasa	25
A.4	Lokasi gambut di Indonesia	26
	Lampiran B Contoh Perhitungan (informatif)	29
B.1	Perhitungan penurunan dan stabilitas pada tahap 1	29
B.2	Perhitungan penurunan dan stabilitas pada tahap 2	31
B.3	Komentar	35
	Lampiran C Daftar nama dan lembaga (informatif)	37
	Bibliografi	38

Daftar gambar

Gambar 1	Interpretasi data uji triaksial UU	5
Gambar 2	Bidang keruntuhan timbunan di atas tanah lunak: (a) lingkaran dan (b) translasi (komposit)	7
Gambar 3	Koefisien-koefisien f_1 dan f_2	10
Gambar 4	Grafik faktor pengaruh akibat beban timbunan	11
Gambar 5	Nilai-nilai indeks kompresi dan kadar air alami	12
Gambar 6	Contoh jaring (<i>mesh</i>) timbunan suatu analisis FEM	15
Gambar 7	Pemberian beban tambahan untuk meminimalkan penurunan primer selama masa layan	16
Gambar 8	Diagram untuk memperkirakan beban tambahan yang diperlukan untuk meminimalkan penurunan primer selama masa layan	17
Gambar 9	Pengurangan laju kompresi sekunder akibat pemberian beban tambahan	18
Gambar 10	Kompensasi konsolidasi sekunder dengan pemberian beban tambahan sementara	19
Gambar 11	Lokasi minimum penempatan instrumen untuk timbunan	22
Gambar 12	Perkiraan penurunan akhir berdasarkan metoda Asaoka (1978)	24
Gambar A.1	Sebaran gambut dan lempung lunak di Indonesia	27
Gambar B.1	Geometri timbunan dan stratifikasi tanah	28
Gambar B.2	Geometri timbunan dan stratifikasi tanah tahap 2	32
Gambar B.3	Geometri timbunan pada masa layan	36

Daftar tabel

Tabel 1	Kuat geser, tekanan air pori dan berat isi yang relevan untuk analisis stabilitas pada berbagai kondisi	6
Tabel 2	Parameter-parameter geoteknik yang diperlukan serta uji-uji yang berkaitan dengannya	21
Tabel A.1	Tipe tanah berdasarkan kadar organik	25
Tabel A.2	Klasifikasi gambut berdasarkan skala von Post (Karlsson dan Hansbo, 1981)	25
Tabel B.1	Parameter-parameter geoteknik	29

Prakata

Pedoman Konstruksi Jalan di Atas Gambut dengan Metode Prapembebanan dipersiapkan oleh Panitia Teknik Standarisasi Bidang Konstruksi dan Bangunan, melalui Gugus Kerja Bidang Geoteknik Jalan pada Sub Panitia Teknik Standardisasi Bidang Prasarana Transportasi. Pedoman ini diprakarsai oleh Pusat Litbang Prasarana Transportasi, Badan Litbang Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. Konsep pedoman ini didasarkan pada hasil litbang terutama dari hasil timbunan percobaan di Berengbengkel, Kalimantan Tengah. Maksud dari pembuatan pedoman ini adalah memberikan panduan kepada perencana di dalam mendesain timbunan badan jalan yang akan dibangun di atas gambut dengan metode prapembebanan.

Pedoman ini disusun mengikuti Pedoman BSN No. 8 tahun 2000 dan dibahas melalui forum konsesus sesuai ketentuan Pedoman BSN No. 9 tahun 2000. Penyebutan produk atau piranti lunak dalam pedoman ini bukan merupakan suatu anjuran atau pengakuan.

Perencanaan konstruksi timbunan jalan di atas gambut dengan metode prapembebanan

1 Ruang lingkup

Pedoman ini dimaksudkan sebagai penuntun bagi praktisi di dalam mendesain timbunan jalan di atas tanah gambut dengan metode prapembebanan. Berbagai teknik analisis stabilitas dan penurunan timbunan yang umum digunakan oleh perencana diuraikan terlebih dahulu. Kemudian, kriteria desain penimbunan dan evaluasi performa timbunan dengan pemantauan (*monitoring*) secara praktis dibahas. Suatu contoh perhitungan untuk memperjelas penerapan metode-metode perhitungan juga diberikan sebagai lampiran.

Pedoman ini lebih menghususkan kepada aspek-aspek geoteknik dalam proses desain timbunan jalan secara keseluruhan.

2 Acuan normatif

SNI 03-1964-1990, *Metode pengujian berat jenis tanah*

SNI 03-1965-1990, *Metode pengujian kadar air tanah*

SNI 03-1966-1990, *Metode pengujian batas plastis*

SNI 03-1967-1990, *Metode pengujian batas cair dengan alat casagrande*

SNI 03-2455-1991, *Metode pengujian triaksial A.*

SNI 03-2812-1992, *Metode pengujian konsolidasi tanah satu dimensi*

SNI 03-3442-1994, *Tata cara pemasangan pisometer pipa terbuka casagrande*

SNI 03-3443-1994, *Tata cara pemantauan tekanan air pori dengan pisometer pipa terbuka casagrande*

SNI 03-3452-1994, *Tata cara pemasangan pisometer pneumatik*

SNI 03-3431-1994, *Tata cara pemantauan gerakan horizontal dengan alat inklinometer*

SNI 03-3404-1994, *Metode pemasangan inklinometer*

SNI 03-3455-1994, *Tata cara pemantauan gerakan vertikal tanah dengan menggunakan instrumen magnetis*

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

ASTM D 4531-86, *Standard test methods for bulk density of peat and peat products*

Pd M-12-1998-03, *Metode pengujian kadar air, kadar abu dan bahan organik dari tanah gambut dan tanah organik lainnya*

Pd M-13-1998-03, *Metode pengujian untuk penentuan kadar serat dari contoh gambut dengan cara kering di laboratorium*

Pd M-13-1997-03, *Metode pengujian pH bahan gambut dengan alat pH meter*

Pd M-14-1997-04, *Metode pengukuran tebal endapan gambut*

Pd M-22-1996-03, *Metode pengujian triaksial untuk tanah kohesif dalam keadaan tanpa konsolidasi dan drainase*

Pt T-08-2002-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, desain 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: desain dan konstruksi.*

3 Istilah dan definisi

3.1

gambut

suatu jenis tanah lunak yang pembentuk utamanya terdiri dari sisa-sisa tumbuhan yang membusuk

3.2

gambut berserat atau *fibrous*

gambut yang memiliki derajat pembusukan rendah, struktur berserat, struktur tumbuhan terlihat jelas, terutama lumut keputih-putihan

3.3

gambut amorf atau *amorphous*

gambut yang memiliki derajat pembusukan tinggi, struktur tumbuhan tidak terlihat serta konsistensi seperti bubur

3.4

prapembebanan (*preloading*)

suatu metode konstruksi perbaikan tanah berupa penempatan timbunan pada lokasi yang akan distabilisasi dengan berat sekurang-kurangnya sama dengan berat struktur di masa yang akan datang (beban permanen) dan akan dibuang pada saat konsolidasi yang diinginkan telah tercapai

3.5

penurunan primer

penurunan akibat proses berkurangnya volume tanah jenuh yang memiliki permeabilitas yang kecil akibat drainase sebagian air pori yang berlangsung sampai tekanan air pori eksekutif yang terbentuk akibat kenaikan tegangan total terdisipasi sempurna

3.6

penurunan sekunder

penurunan yang berlangsung setelah penurunan primer selesai dan pada tanah tidak terjadi lagi perubahan tegangan efektif (konstan)

3.7**beban tambahan (*surcharge*)**

beban timbunan tambahan di luar berat struktur di masa yang akan datang (beban permanen) yang bersifat sementara dan berfungsi untuk meminimalkan penurunan selama masa layan

3.8**rasio beban tambahan**

rasio antara beban tambahan terhadap beban permanen

3.9**pemantauan (*monitoring*)**

pemantauan perilaku massa tanah yang dinyatakan dalam bentuk antara lain penurunan, tekanan air pori dan deformasi lateral akibat gangguan yang terjadi padanya dengan menggunakan alat-alat instrumentasi seperti pelat penurunan, pisometer dan inklinometer

3.10**indeks kompresi**

gradien kurva angka pori terhadap logaritmik tegangan dari uji oedometer pada daerah kompresi

3.11**indeks rekompresi**

gradien kurva angka pori terhadap logaritmik tegangan dari uji oedometer pada daerah rekompresi

3.12**tegangan *overburden***

tegangan yang dialami suatu massa tanah pada kedalaman tertentu akibat berat massa tanah di atasnya (*overburden*)

3.13**tegangan prakonsolidasi**

Tegangan *overburden* maksimum yang dialami suatu massa tanah pada masa lampau yang biasanya ditandai oleh transisi atau 'patahan' pada kurva angka pori terhadap logaritmik tegangan dari uji oedometer

3.14**koefisien kompresi sekunder**

gradien bagian yang lurus dari kurva pembacaan dial terhadap logaritmik waktu dari uji oedometer yang terjadi setelah konsolidasi primer selesai

4 Prinsip-prinsip

Penurunan pada gambut selama masa layan dapat dikurangi dengan prapembebanan (*preloading*). Prinsipnya sederhana: timbunan yang ditempatkan pada lokasi yang direncanakan harus memiliki berat yang lebih besar dari berat struktur rencana. Sebagian timbunan dibuang pada saat derajat konsolidasi yang diinginkan telah tercapai.

Laju konsolidasi umumnya diukur dengan pemantauan penurunan dan/atau pengukuran tekanan air pori di lapangan. Berbeda dengan lempung yang proses konsolidasinya membutuhkan waktu yang lama, terutama jika ketebalan lapisan lempungnya besar, penggunaan prapembebanan pada gambut yang permeabilitasnya tinggi menguntungkan karena waktu yang dibutuhkan singkat. Penambahan kuat geser (*gain in strength*) akibat konsolidasi umumnya besar karena sudut geser gambut yang tinggi. Penurunan akibat konsolidasi sekunder selama masa layan yang dominan pada tanah gambut juga dapat dikurangi dengan beban tambahan (*surchage*).

5 Analisis

5.1 Analisis stabilitas

Analisis stabilitas timbunan terdiri dari metode kesetimbangan batas (*limit equilibrium method*) dan metode elemen hingga (*finite element method*). Kedua metode tersebut dapat dilaksanakan dengan bantuan program komputer yang telah divalidasi terhadap solusi-solusi yang diakui oleh akademisi. Analisis harus dilakukan di bawah supervisi ahli geoteknik yang telah berpengalaman yang bisa menentukan metode-metode dan parameter-parameter yang paling representatif untuk analisis dan keterbatasan peranti lunak (*software*) yang dipakai.

Untuk keperluan analisis stabilitas, informasi-informasi yang diperlukan meliputi:

- a) topografi saat ini;
- b) geometri timbunan dan struktur;
- c) beban eksternal (contohnya lalu lintas);
- d) stratigrafi tanah;
- e) muka air terendah dan tertinggi;
- f) sifat-sifat timbunan;
- g) profil kuat geser tanah;
- h) distribusi dan besar tekanan air pori.

5.1.1 Kuat geser untuk analisis stabilitas

Analisis stabilitas berdasarkan perilaku tanah bisa dilakukan dengan berbagai cara:

- a) analisis tegangan total (*total stress analysis*, TSA);
- b) analisis tegangan efektif (*effective stress analysis*, ESA);
- c) analisis kuat geser takteralirkan (*undrained strength analysis*, USA).

Untuk timbunan yang melibatkan pembebanan satu tahap ataupun beberapa tahap di mana pembebanan menimbulkan kenaikan tegangan pada tanah, kondisi jangka pendek merupakan kondisi paling kritis. Hal ini disebabkan pola pembebanan seperti ini akan menimbulkan kenaikan tekanan air pori dan disipasi tekanan air pori terhadap waktu setelah pembebanan usai. Proses yang disebutkan terakhir menyebabkan tegangan efektif dan kuat geser akan bertambah (*gain in strength*).

Teknik analisis kuat geser takteralirkan (USA) tidak akan dibahas di sini, karena selain jarang digunakan, analisis ini membutuhkan pengujian kuat geser dengan konsolidasi anisotropik yang jarang diterapkan pada laboratorium-laboratorium mekanika tanah pada umumnya. Pembaca yang tertarik dengan teknik ini bisa merujuk ke tulisan Ladd (1991).

5.1.1.1 Analisis tegangan total (TSA)

Stabilitas timbunan dihitung dengan hanya mempertimbangkan kuat geser *undrained* sebelum dimulainya konstruksi tanpa memperhitungkan kenaikan kuat geser akibat konsolidasi. Pada suatu analisis tegangan total, kuat geser yang tersedia τ_f pada suatu potensi bidang keruntuhan adalah:

$$\tau_f = c_u + \sigma_n \tan \phi_u \quad (1)$$

di mana c_u dan ϕ_u mendefinisikan selubung keruntuhan tegangan total Mohr-Coulomb. Apabila diasumsikan tanah sepenuhnya jenuh (*fully saturated*), kuat geser undrained c_u yang digunakan adalah $c_u = s_u$ dan $\phi_u = 0$. Kuat geser untuk TSA bisa didapat dari uji triaksial *unconsolidated undrained* (UU), geser baling (*vane shear*, VST) atau sondir (CPT).

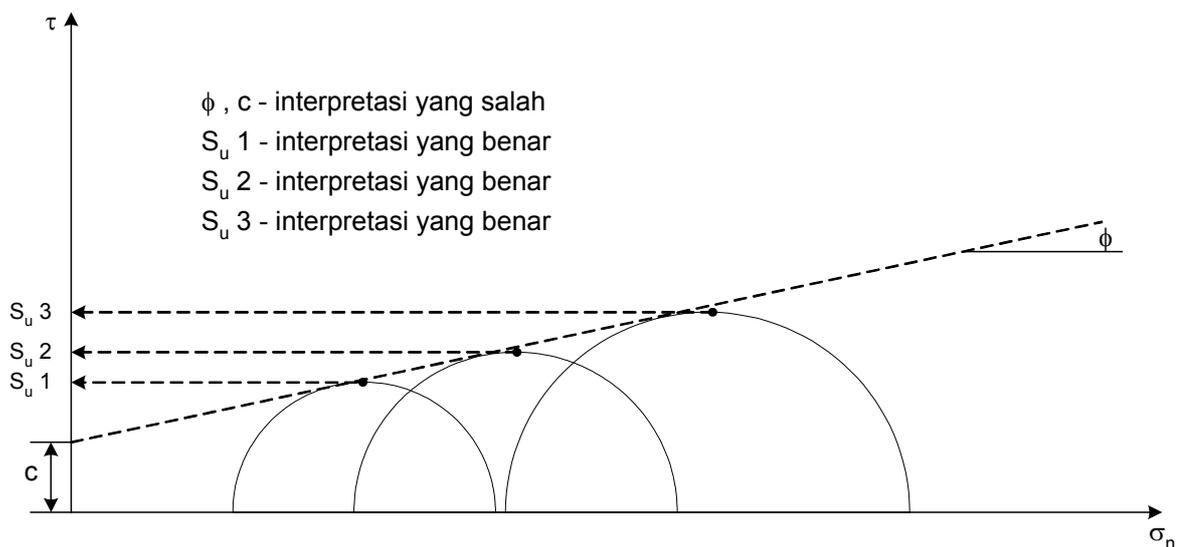
Uji triaksial UU harus diinterpretasi dengan konsep $\phi = 0$. Sebagai contoh, pada Gambar 1 diperlihatkan kuat geser *undrained* s_u yang berbeda untuk masing-masing spesimen akibat gangguan sampel atau faktor-faktor lainnya. Namun, kebanyakan laboratorium mekanika tanah menyajikan parameter kuat geser *undrained* sebagai interpolasi atau *best-fit* selubung keruntuhan dari masing-masing lingkaran Mohr. **Interpretasi seperti ini adalah tidak tepat**; untuk masing-masing pengujian, kuat geser *undrained* (jari-jari dari masing-masing lingkaran Mohr) harus dievaluasi (lihat Gambar 1). Teknik sederhana yang direkomendasikan untuk digunakan adalah dengan merata-ratakan kuat geser *undrained* untuk keseluruhan n buah lingkaran Mohr:

$$s_u = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)_i}{n} \quad (2)$$

Apabila kuat geser *undrained* didapat dari uji geser baling lapangan (FVST), nilai yang diperoleh dari hasil uji tersebut harus dikoreksi sebelum digunakan pada analisis stabilitas timbunan. Faktor koreksi ini dinyatakan sebagai μ dan merupakan fungsi dari indeks plastisitas PI:

$$\mu \approx 2,5(PI)^{-0,3} \leq 1,1 \quad (3)$$

dengan PI dinyatakan dalam persen. Berdasarkan penelitian terhadap bidang keruntuhan selama pengujian geser baling, faktor koreksi untuk gambut adalah $\mu = 0,5-0,55$.



Gambar 1 Interpretasi data uji triaksial UU

Salah satu isu yang paling penting berkaitan dengan TSA untuk gambut berserat (*fibrous*) adalah permeabilitas gambut jenis ini relatif tinggi sehingga drainase yang signifikan bisa terjadi selama konstruksi. Sebagai dasar untuk mengestimasi derajat drainase selama konstruksi atau pembebanan adalah faktor waktu T yang dinyatakan sebagai :

$$T = \frac{c_v t}{H^2} \quad (4)$$

dengan pengertian

c_v adalah koefisien konsolidasi ($m^2/hari$)
 t adalah waktu pembebanan atau konstruksi (hari)
 H adalah panjang jalur drainase (meter)

Apabila nilai T melebihi 3,0 maka material fondasi dianggap sebagai *drained* sehingga teknik analisis ESA yang dipakai. Sebaliknya, jika nilai T lebih kecil dari 0,01, material diasumsikan sebagai *undrained* sehingga teknik analisis TSA yang digunakan. Selanjutnya bila nilai T berada di antara kedua batasan tersebut, kedua kemungkinan teknik analisis harus dipertimbangkan. Jika data yang diperlukan untuk menghitung T tidak tersedia, untuk kasus yang melibatkan laju pembebanan yang normal, material yang memiliki permeabilitas lebih besar dari 10^{-4} cm/s dianggap *drained* dan untuk yang lebih kecil 10^{-7} cm/s *undrained*.

5.1.1.2 Analisis tegangan efektif (ESA)

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

Analisis tegangan efektif (ESA) 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 *undrained* harus dianalisis dengan menggunakan tegangan total (TSA).

Tabel berikut merangkum parameter-parameter yang relevan untuk suatu analisis stabilitas.

Tabel 1 Kuat geser, tekanan air pori dan berat isi yang relevan untuk analisis stabilitas pada berbagai kondisi

Jenis tanah	Parameter	Kondisi		
		Akhir konstruksi	Pembebanan beberapa tahap*	Jangka panjang
Semua	Tekanan air eksternal	Sertakan	Sertakan	Sertakan
Semua	Berat isi	Total	Total	Total
Drained	Kuat geser	c' dan ϕ'	c' dan ϕ'	c' dan ϕ'
Drained	Tekanan air pori	u dari analisis <i>seepage</i>	u dari analisis <i>seepage</i>	u dari analisis <i>seepage</i>
Undrained	Kuat geser	Tegangan total, c dan ϕ dari uji-uji in situ, triaksial UU dan CU	Tegangan total, $\phi_v = 0$ dan c_u dari uji triaksial CU pada tekanan konsolidasi	c' dan ϕ'
Undrained	Tekanan air pori	Abaikan, set $u = 0$ pada input komputer	Abaikan, set $u = 0$ pada input komputer	u dari analisis <i>seepage</i>

*Pembebanan beberapa tahap adalah suatu kondisi pembebanan di mana konsolidasi pada satu tahap pembebanan diikuti oleh perubahan beban dengan kondisi *undrained*.

5.1.1.3 Kenaikan kuat geser

Kenaikan kuat geser *undrained* Δc_u akibat proses konsolidasi dapat diestimasi secara sederhana dari parameter-parameter efektif hasil uji triaksial CU:

$$\Delta c_u = U \cdot \tan \phi' \cdot \Delta \sigma_v \quad (5)$$

dengan pengertian:

U adalah derajat konsolidasi (dalam desimal)

ϕ' adalah sudut geser dalam efektif ($^{\circ}$)

$\Delta\sigma_v$ adalah kenaikan tegangan (kN/m^2)

5.1.2 Metode kesetimbangan batas

Metode ini mengasumsikan keruntuhan terjadi sebagai suatu blok timbunan dan tanah yang bergerak akibat aksi dari berat sendiri dan gaya-gaya luar. Pada stratigrafi tanah, masing-masing lapisan memiliki kuat geser dan berat isi tersendiri. Faktor keamanan dinyatakan sebagai:

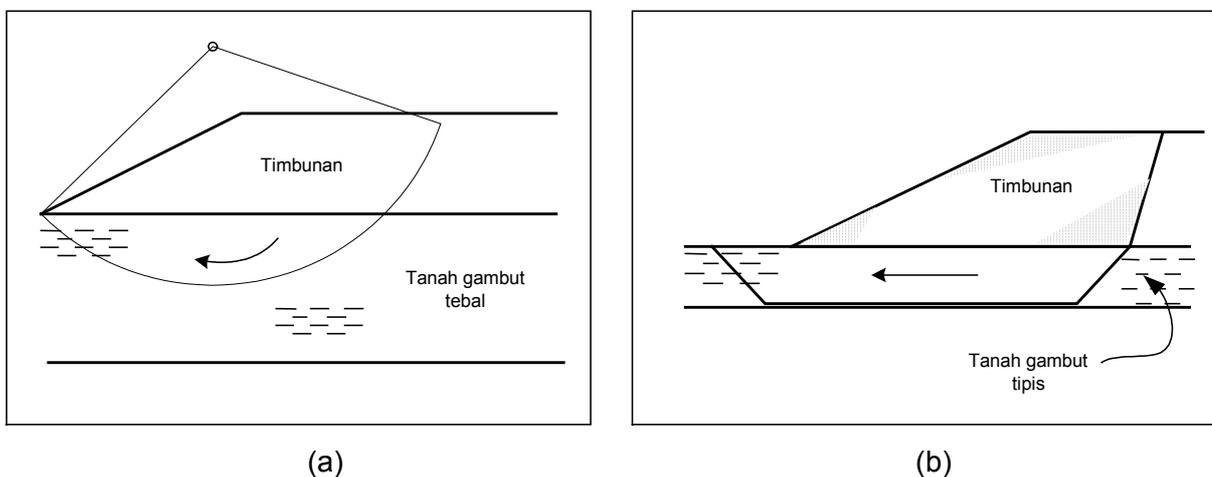
$$F = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (6)$$

dengan pengertian:

τ_f adalah kuat geser yang ada sepanjang bidang geser (kN/m^2)

τ adalah tegangan geser kesetimbangan sepanjang bidang geser yang sama (kN/m^2)

Sejumlah kemungkinan bidang keruntuhan dihitung pada suatu analisis kesetimbangan batas. Bidang keruntuhan bisa berupa lingkaran atau bukan lingkaran. Bidang keruntuhan yang berupa lingkaran kemungkinan tidak akan memberikan faktor keamanan yang terendah terutama pada kasus-kasus timbunan yang berada di atas lapisan tanah yang memiliki kuat geser yang rendah (contoh: gambut dan lempung lunak) dan ketebalan yang tipis di mana keruntuhan translasi lebih mungkin terjadi. Kedua tipe keruntuhan harus dievaluasi pada kasus seperti ini (Gambar 2).



Gambar 2 Bidang keruntuhan timbunan di atas tanah lunak: (a) lingkaran dan (b) translasi (komposit)

Prosedur perhitungan yang kemudian diterapkan adalah dengan membagi massa yang bergerak ke dalam beberapa irisan vertikal yang imajiner dengan lebar tertentu atau biasa disebut sebagai metode irisan (*method of slices*). Beberapa metode irisan yang paling umum digunakan adalah metode lingkaran Swedia (Fellenius), metode Bishop yang disederhanakan, metode Janbu yang umum dan sederhana, metode Spencer dan metode Morgenstern-Price. Kedua metode yang disebutkan terakhir tergolong metode yang lebih teliti (*more rigorous method*).

Metode lingkaran Swedia tidak dianjurkan untuk digunakan pada analisis ESA karena gaya-gaya antaririsan tidak diperhitungkan sehingga hasil perhitungan bisa menghasilkan galat (*error*) sampai mencapai 60%. Selain metode lingkaran Swedia, metode-metode analisis stabilitas yang disebutkan di atas memberikan faktor keamanan yang kecil perbedaannya satu dengan lainnya untuk kasus timbunan di atas tanah lunak (termasuk gambut). Pada kebanyakan kasus, metode Bishop yang disederhanakan dianjurkan untuk dipakai karena galat yang terjadi akibat diabaikannya sebagian gaya antaririsan adalah sebesar 10% pada sisi yang aman sehingga faktor keamanan yang dihitung konservatif.

Timbunan yang memiliki potensi bidang keruntuhan translasi (komposit) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2(b) tidak dapat dianalisis dengan metode Bishop. Metode Janbu, Morgenstern-Price dan Spencer dapat menganalisis bidang keruntuhan sembarang bentuk sehingga metoda tersebut dapat digunakan untuk keruntuhan jenis ini. Metode Spencer disarankan untuk dipakai pada keruntuhan jenis ini karena tidak memerlukan suatu asumsi fungsi matematis untuk menggambarkan arah resultan gaya-gaya antaririsan.

Grafik stabilitas lereng, antara lain Taylor (1948), Cousin (1978) dan Janbu (1968), dapat digunakan untuk analisis stabilitas timbunan dengan beberapa batasan. Batasan yang utama adalah grafik-grafik tersebut dikembangkan untuk kasus-kasus yang sederhana sehingga penyederhanaan yang signifikan diperlukan agar bisa dipakai untuk analisis stabilitas kasus yang kompleks. Prosedur yang disarankan adalah melakukan analisis awal (*preliminary analysis*) menggunakan grafik dan analisis akhir menggunakan program komputer. Program-program komputer komersial yang menerapkan metode kesetimbangan batas untuk analisis stabilitas antara lain XSTABL, SLOPE/W dan MSTAB.

5.1.3 Metode elemen hingga (*finite element method, FEM*)

Metode elemen hingga (*finite element method, FEM*) tergolong metode numerik yang memiliki kemampuan yang lebih baik dibandingkan metode konvensional dalam hal perhitungan tegangan dan pergerakan massa tanah. Metode ini secara umum mampu memodelkan berbagai kondisi yang kompleks dengan baik, seperti perilaku tegangan-regangan nonlinear, kondisi-kondisi nonhomogen dan perubahan geometri selama konstruksi timbunan. Kelebihan metode ini dibandingkan metode *limit equilibrium* dalam hal perhitungan stabilitas lereng adalah:

- a) tidak diperlukan adanya asumsi terhadap lokasi dan bentuk bidang gelincir. Keruntuhan akan terjadi pada zona di mana kuat geser tanah tidak sanggup lagi menahan gaya geser yang bekerja;
- b) karena tidak menggunakan irisan-irisan (*slices*) pada massa tanah yang mengalami longsor maka simplifikasi terhadap gaya-gaya sisi irisan tidak diperlukan. Metode FEM juga mempertahankan kesetimbangan global sampai keruntuhan terjadi;
- c) metode FEM dapat menggabungkan analisis deformasi pada berbagai tahapan dengan analisis stabilitas sehingga faktor keamanan pada suatu tahapan dapat diketahui serta perhitungan menjadi lebih cepat dan efisien;
- d) keruntuhan progresif (*progressive failure*) sampai dengan dan termasuk keruntuhan geser keseluruhan dapat terilustrasi pada metode FEM. Dengan membuat kontur regangan geser pada sistem yang analisis maka bidang gelincir dapat diketahui.
- e) faktor urutan konstruksi, dapat disertakan sehingga metoda FEM ini lebih realistis.

Perhitungan faktor keamanan dengan metode elemen hingga untuk analisis stabilitas menggunakan prosedur *phi-c reduction*. Dengan cara tersebut parameter kuat geser ϕ dan c tanah dikurangi secara menerus sehingga keruntuhan pada struktur terjadi. Faktor keamanan dihitung dengan persamaan berikut:

$$FS = \frac{\tan \varphi_{input}}{\tan \varphi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} \quad (7)$$

Pendekatan ini mirip dengan metode perhitungan faktor keamanan menggunakan analisis *slip-circle* (contohnya metode Bishop). Program-program komputer komersial yang telah menerapkan FEM untuk analisis stabilitas antara lain PLAXIS dan SAGE-CRISP.

5.1.4 Faktor keamanan

Penentuan faktor keamanan (*factor of safety*) tergantung kepada metode analisis, derajat ketidakpastian desain dan parameter-parameter input untuk analisis serta konsekuensi kegagalan dalam hal kehilangan jiwa dan ekonomi. Jika ketidakpastian dan konsekuensi kegagalan kedua-duanya kecil, faktor keamanan sekitar 1,3 atau bahkan lebih kecil dapat dipakai. Sebaliknya, faktor keamanan yang lebih besar harus digunakan bila ketidakpastian dan konsekuensi kegagalan bertambah. Nilai faktor keamanan tipikal yang dapat diterima adalah 1,3 untuk kondisi akhir konstruksi dan pembebanan beberapa tahap serta 1,5 untuk kondisi jangka panjang. Desain dengan faktor keamanan yang lebih kecil dari itu meningkatkan kemungkinan pergerakan tanah vertikal dan lateral serta resiko kegagalan.

5.2 Analisis penurunan

Penurunan tanah di bawah timbunan terjadi selama dan sesudah penimbunan. Penurunan yang terjadi setelah konstruksi perkerasan jalan selesai menjadi perhatian utama karena penurunan yang berlebihan selama periode ini dapat merusak struktur perkerasan. Dalam analisis stabilitas, tinggi timbunan yang diasumsikan dalam perhitungan harus mempertimbangkan penurunan yang terjadi selama konstruksi.

Jika metode konvensional digunakan, prediksi konsolidasi satu dimensi harus disertai dengan estimasi pergerakan plastis awal yang terjadi selama tahap pembebanan awal disebabkan oleh deformasi geser dan lateral pada tanah dasar. Penurunan total S_t diestimasi sebagai penjumlahan penurunan awal S_i dan penurunan jangka panjang S_f yang terdiri dari konsolidasi primer S_c dan kompresi sekunder S_s :

$$S = S_i + S_f = S_i + (S_c + S_s) \quad (8)$$

Untuk tanah organik dan gambut, penurunan awal dan kompresi sekunder tanah dasar timbunan memainkan peranan penting dalam proses penurunan. Metode perhitungan yang lebih lanjut bisa menggunakan metode elemen hingga (FEM) dan teori elasto-plastis dengan implementasi model reologi tertentu.

Pada pengujian konsolidasi (oedometer atau Rowe sel) yang berlangsung dalam jangka waktu yang lama, kadang-kadang ditemui perubahan gradien pada kurva logaritmik waktu-penurunan pada fasa kompresi sekunder. Fenomena ini disebut sebagai kompresi tersier. Di lain pihak, hal ini tidak dijumpai pada beberapa penelitian dan, terutama, observasi di lapangan. Sampai kontroversi ini terpecahkan dan menunggu penelitian lebih lanjut, perhitungan kompresi tersier **diabaikan**.

5.2.1 Metode konvensional

5.2.1.1 Penurunan awal

Penurunan yang terjadi pada timbunan selama konstruksi pada umumnya terutama berkaitan dengan kondisi *undrained*. Perhitungan S_i dengan demikian berdasarkan pada teori elastisitas dengan rasio Poisson $\nu_u = 0,5$ dan suatu modulus elastisitas *undrained* E_u :

$$S_i = \frac{I_v q B}{E_u} \quad (9)$$

dengan pengertian

I_v adalah faktor pengaruh yang tergantung pada geometri permasalahan
 q adalah tegangan yang bekerja tanah dasar (kN/m^2)

B adalah lebar daerah yang terbebani (m)
 E_u adalah modulus elastisitas *undrained* (kN/m²)

Faktor I_v bisa dihitung dengan menggunakan solusi analitis teori elastis untuk penurunan di pojok beban strip merata:

$$I_v = (1 - \nu^2)f_1 + (1 - \nu - 2\nu^2)f_2 \quad (10)$$

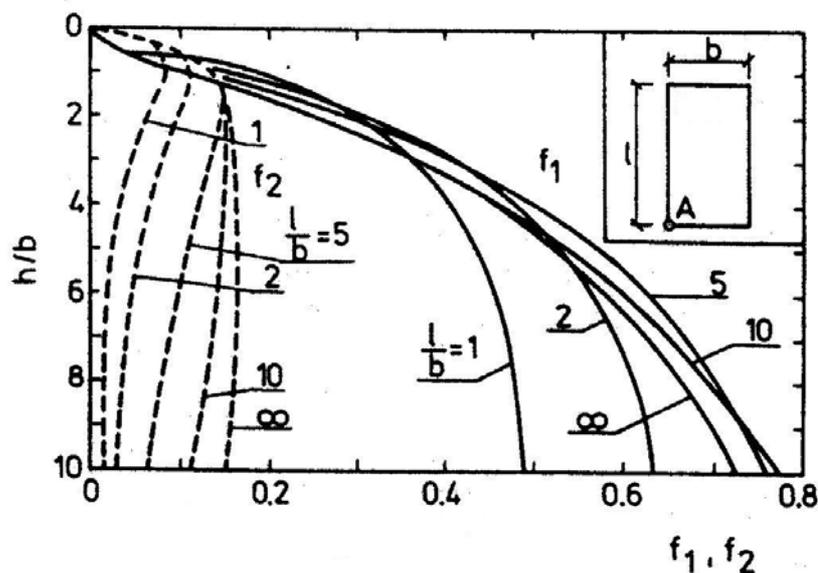
Koefisien-koefisien f_1 dan f_2 merujuk kepada Gambar 3 di bawah ini. Untuk kasus pembebanan *undrained*, persamaan (10) tereduksi menjadi:

$$I_v = \frac{3}{4}f_1 \quad (11)$$

Untuk perhitungan penurunan awal pada garis tengah (*centerline*) timbunan yang simetris, Persamaan (9) harus dikalikan empat.

E_u bisa didapat dari uji-uji laboratorium atau korelasi-korelasi empiris dengan kuat geser *undrained*. Modulus elastisitas *undrained* untuk tanah-tanah terkonsolidasi normal (*normally consolidated*) bisa dihitung dari hubungan empiris:

$$E_u = \frac{215c_u \ln F}{I_p} \quad (12)$$



Gambar 3 Koefisien-koefisien f_1 dan f_2

dengan pengertian:

c_u adalah kuat geser *undrained* (kN/m²)
 F adalah faktor keamanan terhadap keruntuhan geser (analisis stabilitas)
 I_p adalah indeks plastisitas (dalam desimal)

Variasi tanah yang terdiri dari n lapis tanah dengan ketebalan masing-masing h_i bisa didekati dengan nilai rata-rata harmonik E_u :

$$\overline{E_u} = \frac{E_{u1}h_1 + E_{u2}h_2 + \dots + E_{un}h_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n} \quad (13)$$

5.2.1.2 Penurunan konsolidasi primer

Konsolidasi primer terjadi akibat keluarnya air pori dari tanah menyusul terjadi kenaikan tegangan total. Penurunan konsolidasi primer satu dimensi S_c dinyatakan sebagai Persamaan (14) untuk tanah terkonsolidasi normal dan Persamaan (15) untuk tanah terkonsolidasi lebih:

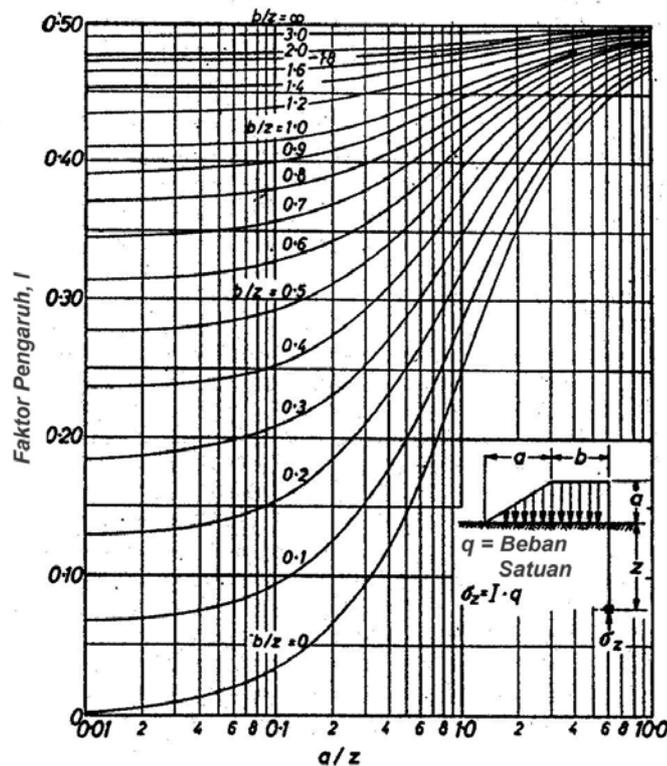
$$S_c = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_c}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_{v0}} \right] H_i \quad (14)$$

$$S_c = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_r}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} + \frac{C_c}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_p} \right] H_i \quad (15)$$

dengan pengertian:

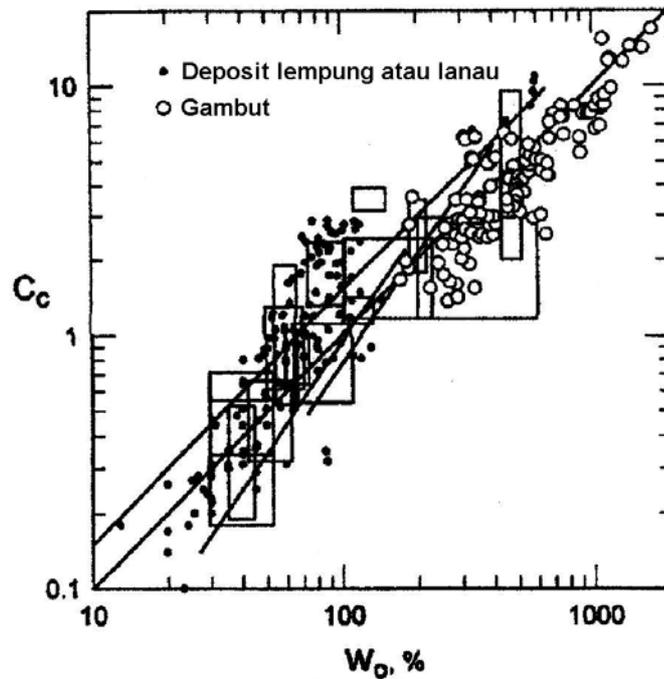
- σ'_{v0} adalah tegangan efektif vertikal awal (kN/m^2)
- σ'_p adalah tegangan prakonsolidasi (kN/m^2)
- $\Delta\sigma_v$ adalah kenaikan tegangan vertikal efektif akibat beban timbunan (kN/m^2)
- C_c adalah indeks kompresi
- C_r adalah indeks rekompresi
- e_0 adalah angka pori
- H_i adalah tebal lapisan tanah i dari total n (m)

Nilai $\Delta\sigma_v$ dihitung menggunakan teori elastisitas yang bisa dirujuk pada Gambar 4. Dari gambar tersebut diperoleh faktor pengaruh I yang merupakan fungsi dari a/z , b/z . Kenaikan tegangan vertikal kemudian dapat dihitung dengan mengalikan faktor pengaruh dengan beban timbunan q . Prinsip superposisi dapat diterapkan untuk menghitung tegangan akibat beban berbagai bentuk timbunan pada sembarang titik pada tanah dasar. Tegangan yang ditunjukkan oleh grafik merupakan untuk timbunan dengan panjang tak terhingga (*infinite extent*).



Gambar 4 Grafik faktor pengaruh akibat beban timbunan

Gambut dan tanah organik memiliki angka pori yang besar ($e_0 > 1$) sehingga indeks kompresi yang didapat dari uji oedometer besar. Gambar 5 berikut dapat digunakan untuk mengestimasi nilai-nilai C_c untuk lempung, lanau atau gambut dari kadar air alami w_n .



Gambar 5 Nilai-nilai indeks kompresi dan kadar air alami

5.2.1.3 Kompresi sekunder

Hubungan yang diperlukan untuk perhitungan penurunan sekunder adalah:

$$S_s = \frac{C_\alpha H}{1 + e_p} \log \frac{t}{t_p} \quad (16)$$

dengan pengertian:

- C_α adalah koefisien konsolidasi sekunder
- t_p adalah lama konsolidasi primer (hari)
- t adalah umur dari masa layan timbunan (hari)
- e_p adalah angka pori pada saat akhir konsolidasi primer

Koefisien konsolidasi sekunder didapat dari uji oedometer atau korelasi. Korelasi antara C_c dan C_α untuk tanah lempung dan lanau organik adalah:

$$\frac{C_\alpha}{C_c} = 0,05 \pm 0,01 \quad (17)$$

dan untuk gambut berkisar:

$$\frac{C_\alpha}{C_c} = 0,06 \pm 0,01 \quad (18)$$

5.2.1.4 Metode Den Haan

Metode ini berlaku sebagai alternatif perhitungan kompresi pada lapisan tanah gambut terkonsolidasi normal. Untuk gambut terkonsolidasi lebih, metode ini hanya berlaku jika tegangan yang bekerja akibat beban timbunan melewati tekanan prekonsolidasi. Kompresi ultimit pada lapisan tanah gambut dapat dihitung sebagai:

$$\frac{\Delta h_e}{h} = \frac{w_i - w}{w_i + 37,1 + 0,362 \cdot N} \quad (19)$$

dengan pengertian:

- w_i adalah kadar air awal (%)
- w adalah kadar air setelah pembebanan (%)
- Δh_e adalah kompresi ultimit pada lapisan gambut (m)
- h adalah tebal lapisan gambut (m)
- N adalah kehilangan pijar akibat pemanasan pada suhu 550°C selama 5 jam (%)

Nilai kadar air setelah pembebanan w (%) adalah:

$$\frac{w}{N} = 26,7 \cdot \left[\frac{\sigma'}{\sigma_e'} \right]^{-0,437} \quad (20)$$

dengan pengertian:

- σ' adalah tegangan efektif pada gambut (kN/m²)
- σ_e' adalah tegangan efektif satuan ($\sigma_e' = 1$ kN/m²) (kN/m²)

5.2.1.5 Laju penurunan konsolidasi

Untuk konsolidasi satu dimensi dengan arah drainase vertikal, derajat konsolidasi U_v adalah fungsi dari faktor waktu T_v :

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2} \quad (21)$$

dengan pengertian:

- c_v adalah koefisien konsolidasi (m²/hari)
- t adalah waktu (lamanya) proses konsolidasi (hari)
- H adalah panjang jalur drainase (m)

Meskipun c_v bisa diperoleh langsung dari uji-uji laboratorium (misalnya oedometer), prosedur yang direkomendasikan adalah menghitung c_v dari hubungan:

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (22)$$

dengan pengertian:

- k adalah koefisien permeabilitas (m/hari)
- m_v adalah koefisien perubahan volume (m²/kN)
- γ_w adalah berat isi air (kN/m³)

Nilai k dan m_v pada Persamaan (22) diperoleh dari masing-masing uji permeabilitas lapangan dan uji oedometer pada level tegangan efektif yang sama dengan beban timbunan.

Penurunan S_t pada waktu t berdasarkan teori konsolidasi satu dimensi dihitung sebagai:

$$S_t = US_c \quad (23)$$

dengan pengertian:

U adalah derajat konsolidasi (dalam desimal)

S_c adalah penurunan konsolidasi total (m)

Derajat konsolidasi dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan-persamaan:

$$U = \sqrt{\frac{4T_v}{\pi}} \quad \text{untuk } T_v < 0,2 \quad (24)$$

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{1}{4}\pi^2 T_v\right) \quad \text{untuk } T_v \geq 0,2 \quad (25)$$

5.2.2 Metode numerik

Metode numerik yang umum digunakan untuk analisis penurunan adalah metode beda hingga (*finite difference method*, FDM) dan metode elemen hingga (*finite element method*, FEM).

5.2.2.1 Metode beda hingga (FDM)

Metode beda hingga pada intinya mengganti persamaan diferensial pengatur perubahan tegangan akibat disipasi tekanan air pori eksese terhadap waktu dan kondisi-kondisi batas dengan persamaan-persamaan beda hingga. Berbagai buku yang berkaitan dengan metode numerik membahas metode ini secara detail. Penggunaan metode ini semakin berkurang seiring dengan berkembangnya metode elemen hingga (FEM) yang akan dibahas pada bagian berikut. Mempertimbangkan hal tersebut, metode ini tidak akan dibahas di sini. Program komputer untuk perhitungan penurunan akibat konsolidasi yang menggunakan FDM sebagai metode solusi adalah, antara lain, CONSOL.

5.2.2.2 Metode elemen hingga (FEM)

Metode elemen hingga jauh lebih akurat dibandingkan metode konvensional dan FDM yang telah dibahas sebelumnya. Teori-teori yang berkaitan dengan metode elemen hingga tidak akan dibahas di sini. Pembaca yang tertarik bisa merujuk ke berbagai literatur yang berkaitan dengan FEM. Pada suatu analisis FEM, daerah yang akan dianalisis dibagi menjadi beberapa elemen yang tersambungkan pada titik-titik nodal (lihat Gambar 6). Metode ini memungkinkan perhitungan kondisi tegangan secara lengkap pada masing-masing elemen serta deformasi arah horizontal dan vertikal pada titik-titik nodal pada setiap tahapan analisis. Perilaku-perilaku yang berkaitan dengan penurunan yang didapat dari suatu analisis FEM adalah:

- a) keruntuhan lokal pada timbunan dan tanah fondasi;
- b) tekanan air pori yang timbul akibat pembebanan *undrained*;
- c) penurunan dan deformasi lateral;
- d) gaya-gaya dalam struktur (apabila ada elemen struktur).

Suatu analisis FEM yang baik harus mempertimbangkan hal-hal berikut:

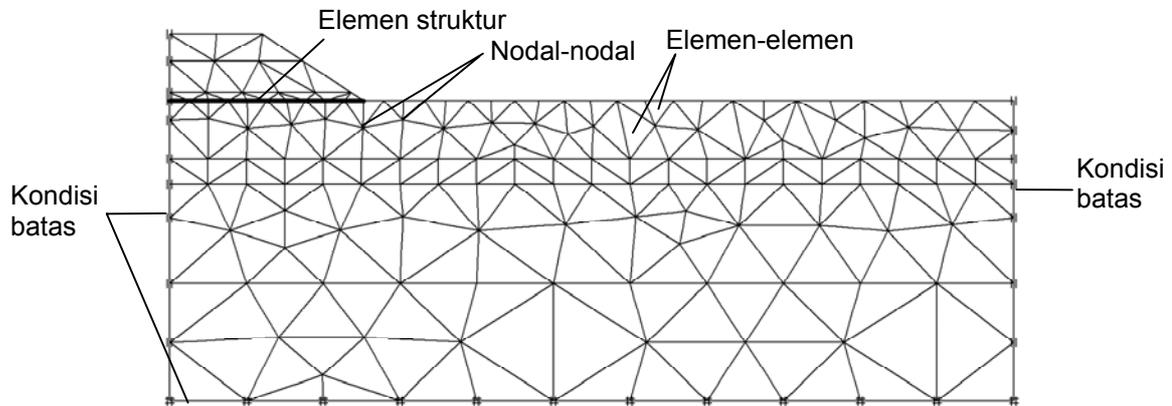
a) *Pemodelan perilaku material.*

Perilaku tanah lunak adalah nonlinear dan inelastik. Sebagai konsekuensinya, model-model yang digunakan harus dapat mensimulasikan perilaku tersebut. Model-model yang umum diterapkan untuk analisis tanah lunak antara lain *cam clay* dan *soft soil creep*. Model yang disebutkan terakhir dapat memodelkan rangkakan (*creep*) yang sangat dominan pada tanah gambut. Kedua model tersebut telah diterapkan pada berbagai program komputer FEM contohnya SAGE-CRISP dan PLAXIS;

b) *Kondisi tegangan-regangan material.*

Penentuan parameter-parameter tegangan-regangan yang sesuai sangat penting dalam

suatu analisis FEM. Parameter-parameter tersebut harus didapat dari uji lapangan atau laboratorium dengan tingkat gangguan yang rendah dan disertai dengan korelasi-korelasi parameter;



Gambar 6 Contoh jaring (mesh) timbunan suatu analisis FEM

c) *Jaring (mesh) elemen hingga.*

Jaring harus menggambarkan geometri timbunan (lihat Gambar 6), baik geometri permukaan eksternal dan distribusi material di timbunan dan pondasi. Selanjutnya, jaring harus dapat menggambarkan konfigurasi penimbunan yang dilaksanakan sebagai bagian konstruksi. Jaring juga harus meliputi luar daerah yang menjadi perhatian sampai suatu kondisi batas ditemui (contohnya lapisan batuan/tanah keras (*bedrock*)) atau sampai suatu jarak tertentu yang dianggap cukup sehingga hasil perhitungan tegangan atau deformasi pada daerah yang menjadi perhatian tidak terganggu olehnya;

d) *Urutan konstruksi.*

Urutan konstruksi penting untuk dimodelkan pada suatu analisis timbunan karena geometri akan berubah akibat penimbunan. Langkah-langkah konstruksi harus dimodelkan dalam urutan yang sama dengan yang dilaksanakan di lapangan;

e) *Kalibrasi keseluruhan model.*

Model suatu analisis FEM bisa dikalibrasi dengan hasil-hasil pengukuran instrumen (contohnya *settlement plate*, inklinometer dan pisometer) di lapangan. Dari hal ini, perencana dapat menilai tingkat akurasi pemodelan yang dilakukannya.

Suatu analisis geoteknik dengan metode elemen hingga menuntut pengetahuan yang memadai dalam hal berbagai aspek rekayasa geoteknik terutama pemahaman perilaku tanah dan batuan. Pengetahuan mengenai mekanika dan teknik-teknik numerik yang merupakan dasar metode elemen hingga juga perlu dikuasai. Seorang ahli geoteknik yang dilengkapi dengan pengetahuan-pengetahuan tersebut akan efisien dalam menerapkan FEM dalam analisis geoteknik dan kecenderungan untuk melakukan kesalahan-kesalahan berkaitan dengan pemakaian FEM semakin kecil.

6 Desain

Segera setelah desain geometri timbunan selesai dibuat maka analisis stabilitas dilaksanakan untuk mengetahui mekanisme keruntuhan yang mungkin dan mendapatkan faktor keamanan timbunan. Evaluasi terhadap desain timbunan memberikan dua kemungkinan tipe konstruksi:

- a) pembebanan satu tahap (*single-stage loading*), apabila kuat geser awal tanah sanggup memikul beban timbunan maksimum;

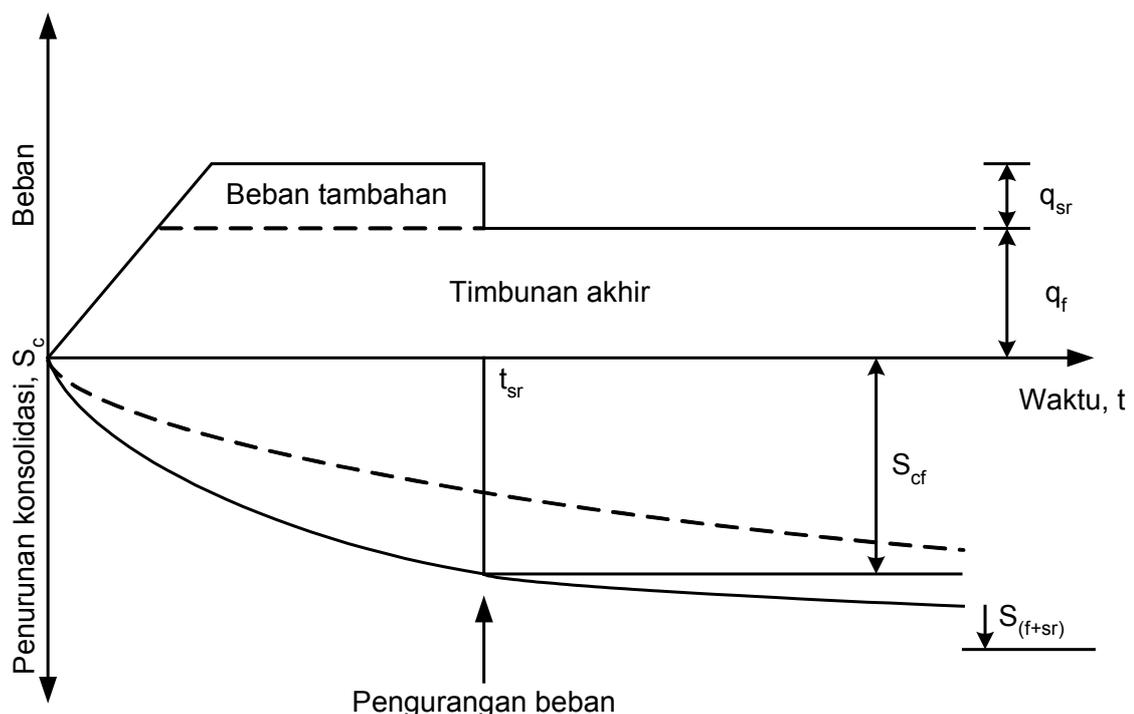
- b) pembebanan beberapa tahap (*multi-stage loading*), yang membutuhkan evaluasi kenaikan kuat geser pada suatu tahap pembebanan agar desain laju pembebanan (penimbunan) aman.

Pemberian beban tambahan diasumsikan mengurangi penurunan setelah konstruksi akibat konsolidasi primer dan kompresi sekunder.

6.1 Pemberian beban tambahan untuk memperkecil penurunan konsolidasi primer

Pemberian beban tambahan dilakukan berdasarkan diagram skematis yang diberikan dalam Gambar 7. Garis putus-putus menggambarkan prediksi penurunan konsolidasi S_c untuk tinggi akhir timbunan (beban q_f), yang memiliki penurunan akhir konsolidasi sama dengan S_{cf} . Garis solid menunjukkan S_c versus waktu selama dan sesudah pemberian beban tambahan (beban q_{sr}). Penurunan akhir konsolidasi untuk timbunan dengan beban tambahan $S_{c(f+sr)}$ juga ditunjukkan pada gambar. Saat garis solid (penurunan dengan beban tambahan) mencapai angka penurunan akhir timbunan S_{cf} , ini adalah waktu untuk beban tambahan t_{sr} . Pada saat ini lapisan yang konsolidasi akan mencapai tingkat rata-rata konsolidasi:

$$U_p = \frac{S_{cf}}{S_{c(f+sr)}} \quad (26)$$



Gambar 7 Pemberian beban tambahan untuk meminimalkan penurunan primer selama masa layan

Meskipun demikian, beban tambahan yang didesain untuk memperoleh penurunan S_c yang sama dengan nilai S_{cf} yang diprediksi (lihat Gambar 7), harus memenuhi persyaratan tambahan. Untuk memperkecil penurunan konsolidasi primer lanjutan yang terjadi setelah penguangan beban tambahan, beban tambahan harus tetap di tempat sampai tegangan yang terjadi selama pembebanan tambahan σ'_{vs} lebih besar dari tegangan akhir σ'_{vf} di seluruh lapisan tanah lunak. Derajat konsolidasi pada titik tengah lapisan yang kompresibel pada saat penguangan beban tambahan dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$U_{(f+sr)} = \frac{\log\left(1 + \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vo}}\right)}{\log\left(1 + \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vo}} + \frac{\sigma'_{vs}}{\sigma'_{vo}}\right)} \quad (27)$$

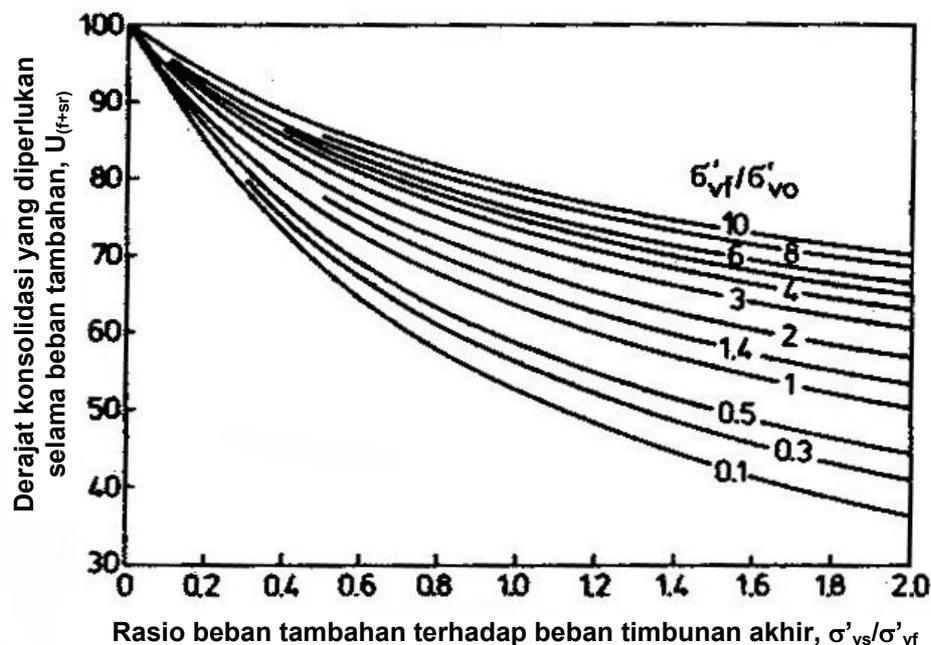
dengan pengertian:

σ'_{vs} adalah tegangan efektif vertikal pada kondisi beban permanen dengan beban tambahan setelah disipasi tekanan air pori eksese (kN/m^2)

σ'_{vo} adalah tegangan efektif vertikal awal (kN/m^2)

σ'_{vf} adalah tegangan efektif vertikal akhir pada kondisi beban permanen (kN/m^2)

Penyelesaian untuk formula di atas, yaitu nilai $U_{(f+sr)}$, diberikan pada Gambar 8. Melalui nilai ini waktu pemindahan beban tambahan dapat diketahui. Persyaratan ini akan menghasilkan suatu desain yang konservatif di mana penurunan prapembebanan yang sebenarnya terjadi akan lebih besar daripada yang didesain S_{cf} .



Gambar 8 Diagram untuk memperkirakan beban tambahan yang diperlukan untuk meminimalkan penurunan primer selama masa layan

6.2 Pemberian beban tambahan untuk memperkecil penurunan sekunder selama masa layan

Hal ini terutama sekali penting bagi timbunan di atas tanah organik. Efek kompresi sekunder dapat menghasilkan penurunan yang signifikan selama umur ekonomis timbunan. Sebagai perkiraan awal pengurangan yang terjadi pada penurunan sekunder akibat beban tambahan, untuk tanah terkonsolidasi normal, diagram yang diberikan pada Gambar 9 dapat digunakan.

Untuk siklus pertama kompresi sekunder, rasio beban tambahan yang dapat diandalkan didapat saat garis "reduksi maksimum" digunakan. Waktu pada saat beban tambahan dibuang t_{sr} harus berdekatan dengan nilai t_p , yaitu $t_{sr}/t_p \geq 1$.

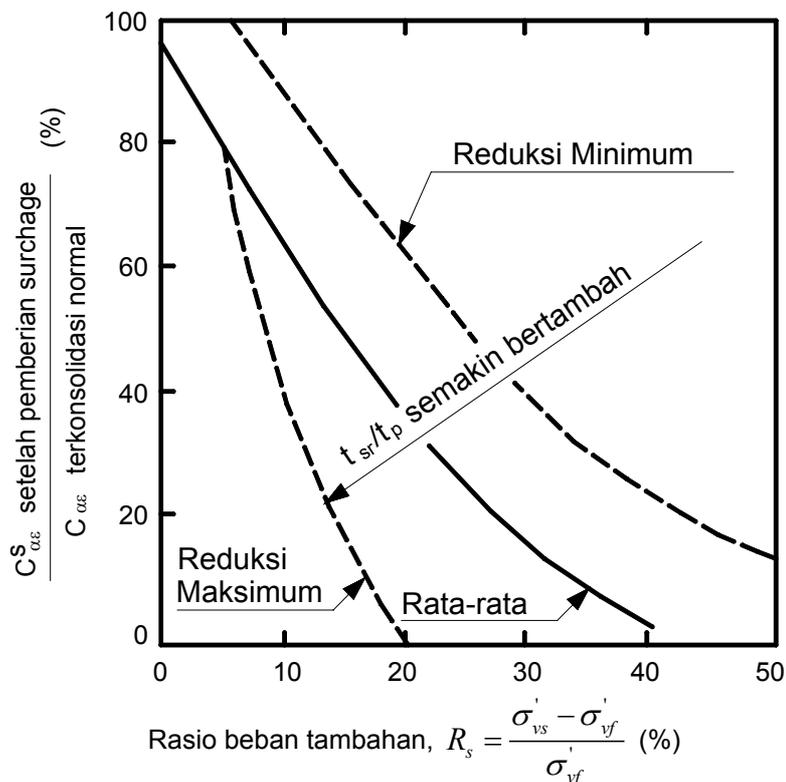
Gambaran umum desain beban tambahan untuk kompensasi sebagian kompresi sekunder diberikan pada Gambar 10. Derajat konsolidasi yang dibutuhkan pada kondisi pembebanan

tambahan untuk menghasilkan konsolidasi primer ditambah jumlah kompresi sekunder yang diinginkan dapat dinyatakan oleh formula sebagai berikut:

$$U_{(f+sr)} = U_p \left(1 + \frac{C_{\alpha}}{\varepsilon} \log \frac{t_{sc}}{t_p} \right)$$

dengan pengertian:

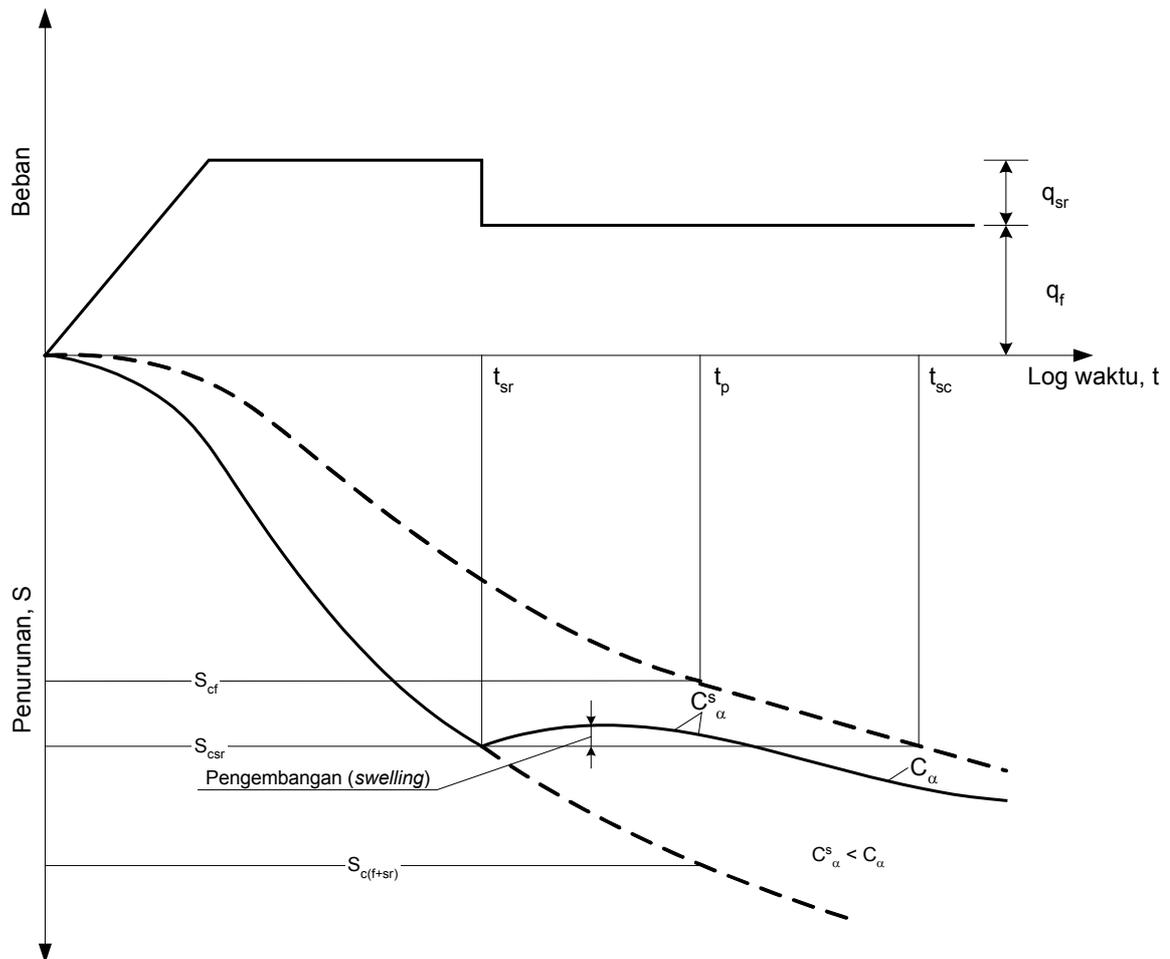
- U_p adalah derajat konsolidasi yang dibutuhkan pada kondisi pembebanan tambahan untuk menghasilkan penurunan yang sama dengan konsolidasi primer (%);
 C_{α} adalah koefisien kompresi sekunder;
 ε adalah regangan pada pertengahan lapisan yang kompresibel, yang disebabkan oleh konsolidasi primer pada kondisi pembebanan tetap;
 t_{sc} adalah waktu yang ditentukan oleh umur produktif timbunan atau oleh jumlah kompresi sekunder yang diijinkan (hari);
 t_p adalah waktu yang berkaitan dengan konsolidasi primer pada kondisi beban tetap (hari).



Keterangan gambar:

- σ'_{vs} tegangan efektif vertikal setelah disipasi tekanan air pori eksese pada kondisi pembebanan dengan beban tambahan (kN/m^2);
 σ'_{vf} tegangan efektif vertikal akhir pada kondisi pembebanan pembebanan setelah disipasi tekanan air pori (kN/m^2);
 $C_{\alpha\epsilon}$ koefisien kompresi sekunder modifikasi
 t_p waktu pada akhir konsolidasi primer (hari)
 t_{sr} waktu pada saat beban tambahan dikurangi (hari)
 R_s rasio beban tambahan (%)

Gambar 9 Pengurangan laju kompresi sekunder akibat pemberian beban tambahan



Gambar 10 Kompensasi konsolidasi sekunder dengan pemberian beban tambahan sementara

Nilai beban tambahan yang dibutuhkan dapat diperkirakan, dengan asumsi bahwa penurunan S_{csr} pada saat pengurangan beban tambahan t_{sr} adalah:

$$S_{csr} = U_{(f+sr)} \cdot S_{c(f+sr)} \quad (28)$$

dengan pengertian:

$S_{c(f+sr)}$ adalah penurunan konsolidasi total pada kondisi beban tetap ditambah beban tambahan (m)

Pada saat pemindahan beban tambahan biasanya terjadi pengembangan (*swelling*), yang tergantung pada besarnya pengurangan beban (*unloading*) yang mungkin diikuti oleh penurunan yang lambat yang diakibatkan oleh kompresi sekunder dalam kondisi terkonsolidasi berlebih (C_{α}^s), dan setelah itu oleh kompresi sekunder dalam kondisi terkonsolidasi normal. Nilai swelling dan lajunya dapat dihitung berdasarkan teori Terzaghi dari formula:

$$S_{sw} = C_{sE} H \log \frac{\sigma'_{v(f+sr)}}{\sigma'_{vf}} \quad (29)$$

dengan pengertian:

C_{sE} adalah indeks swelling modifikasi, $C_s/(1+e_0)$;
 C_s adalah indeks swelling;

H adalah ketebalan lapisan kompresibel (m);
 $\sigma'_{v(f+sr)}$ adalah tegangan efektif pada kondisi beban tetap dan beban tambahan (kN/m^2);
 σ'_{vf} adalah tegangan efektif akhir pada kondisi beban tetap (kN/m^2).

Sebagai dasar observasi jangka panjang terhadap penurunan yang terjadi pada timbunan jalan di atas tanah gambut, waktu swelling kira-kira sama dengan durasi beban tambahan.

6.3 Parameter-parameter desain

Penerapan teknik prapembebanan yang efektif membutuhkan evaluasi yang detail terhadap kondisi tegangan, kuat geser, kompresibilitas dan karakteristik konsolidasi pada fondasi subsoil serta lokasi batas drainase yang akurat. Parameter-parameter geoteknik yang diperlukan serta uji-uji laboratorium yang berkaitan dengannya diperlihatkan pada Tabel 2 berikut. Parameter-parameter tersebut diperoleh setelah melalui pengujian laboratorium yang metode pengujiannya harus mengikuti standar-standar SNI atau standar-standar asing (contoh: ASTM, British Standard atau Eurocode) dengan pengawasan dari seorang ahli geoteknik (*geotechnical engineer*). Deviasi dari standar-standar yang ada harus didasarkan atas persetujuan ahli geoteknik dengan alasan-alasan yang jelas dan dinyatakan dalam laporan faktual.

Pengujian lapangan juga bisa digunakan untuk mengidentifikasi parameter-parameter kuat geser dan kompresibilitas gambut namun hal ini tidak dianjurkan. Pengalaman dari berbagai pengujian lapangan pada tanah gambut di Indonesia (terutama Berengbengel, Kalimantan Tengah) memperlihatkan bahwa terdapat kesulitan dalam mengkorelasikan parameter-parameter geoteknik dengan pembacaan langsung dari alat-alat uji lapangan (contoh: uji geser baling lapangan, sondir, dan piezocone (CPTu)). Korelasi-korelasi yang ada kebanyakan diperoleh dari pengujian terhadap gambut-gambut di daerah subtropis (*temperate*) sehingga akurasi terhadap gambut-gambut di Indonesia perlu penelitian lebih lanjut. Pemakaian korelasi-korelasi tersebut hanya diperkenankan apabila telah dikalibrasi dengan parameter-parameter yang didapat dari pengujian laboratorium.

Suatu timbunan percobaan (*trial embankment*) yang sengaja diruntuhkan dapat dilaksanakan, apabila terdapat dana yang mencukupi, untuk memvalidasi parameter-parameter kuat geser tanah. Analisis balik (*back-analysis*) seperti ini membutuhkan data parameter-parameter tanah yang didapat dari penyelidikan tanah dan pengetahuan mengenai muka air tanah dan tekanan air pori.

6.4 Pertimbangan-pertimbangan desain

Persyaratan utama yang dibutuhkan apabila teknik prapembebanan akan digunakan adalah adanya penyelidikan tanah, uji laboratorium dan analisis desain yang terperinci serta inspeksi lapangan yang baik. Desain prapembebanan harus dipertimbangkan sebagai desain awal dan keputusan untuk membuang beban tambahan harus berdasarkan pada pemantauan instrumen di lapangan.

7 Monitoring

7.1 Pendahuluan

Pemantauan (monitoring) perilaku timbunan pada kasus penambahan beban (*surcharging*) dapat membantu dalam menentukan kapan waktu pengurangan beban tambahan dapat dilaksanakan. Bantuan yang didapat dari monitoring dapat tercapai melalui pengukuran yang akurat instrumen-instrumen di lapangan. Komponen yang terpenting dari pengujian lapangan sebagai alat monitoring, apabila kondisi keuangan proyek memungkinkan, adalah evaluasi kenaikan kuat geser, yang ditentukan oleh antara lain uji geser baling lapangan (*field vane shear test*), flat dilatometer atau uji piezocone. Untuk gambut berserat kuat geser dari hasil

uji geser baling lapangan dianggap tidak akurat karena sulitnya menentukan tegangan puncak (*peak stress*). Pengambilan contoh untuk pengujian kuat geser di laboratorium diperlukan untuk gambut jenis ini.

Tabel 2 Parameter-parameter geoteknik yang diperlukan serta uji-uji yang berkaitan dengannya

Jenis pengujian	Parameter-parameter	Standar-standar yang digunakan
Berat Isi Tanah	γ	SNI 03-3637-1994
Berat Isi Gambut	γ	ASTM D 4531-86
Berat Jenis	G_s	SNI 03-1964-1990
Kadar Air Tanah	w_n	SNI 03-1965-1990
Kadar Air Gambut	w_n	Pd M-12-1998-03
Batas-batas Atterberg	PL	SNI 03-1966-1990
	LL	SNI 03-1967-1990
Oedometer	$\sigma_p', C_c, C_r, C_{\alpha}, c_v, k, OCR$	SNI 03-2812-1992
Triaksial UU	s_u	Pd M-22-1996-03
Triaksial CU	c', ϕ', E	SNI 03-2455-1991

Keterangan tabel:

- γ berat isi (kN/m^3);
- G_s berat jenis;
- w_n kadar air (%);
- LL batas cair (%);
- PL batas plastis (%);
- σ_p' tegangan prakonsolidasi (kN/m^2);
- C_c indeks kompresi;
- C_r indeks rekompresi;
- C_{α} koefisien konsolidasi sekunder;
- c_v koefisien konsolidasi (m^2/det);
- k koefisien permeabilitas (mm/det);
- OCR rasio konsolidasi lebih;
- E modulus elastisitas (kN/m^2);
- s_u kuat geser undrained dan pertambahannya selama konsolidasi (kN/m^2);
- c', ϕ' parameter-parameter kuat geser efektif ($\text{kN/m}^2, ^\circ$).

Pemantauan perilaku timbunan memungkinkan dilakukannya evaluasi terhadap asumsi-asumsi desain. Untuk alasan ini, maka pemantauan dapat dianggap sebagai proses lanjutan desain yang penting. Selama masa konstruksi, pembacaan pisometer dan settlement plate harus dilakukan setiap hari.

7.2 Instrumentasi

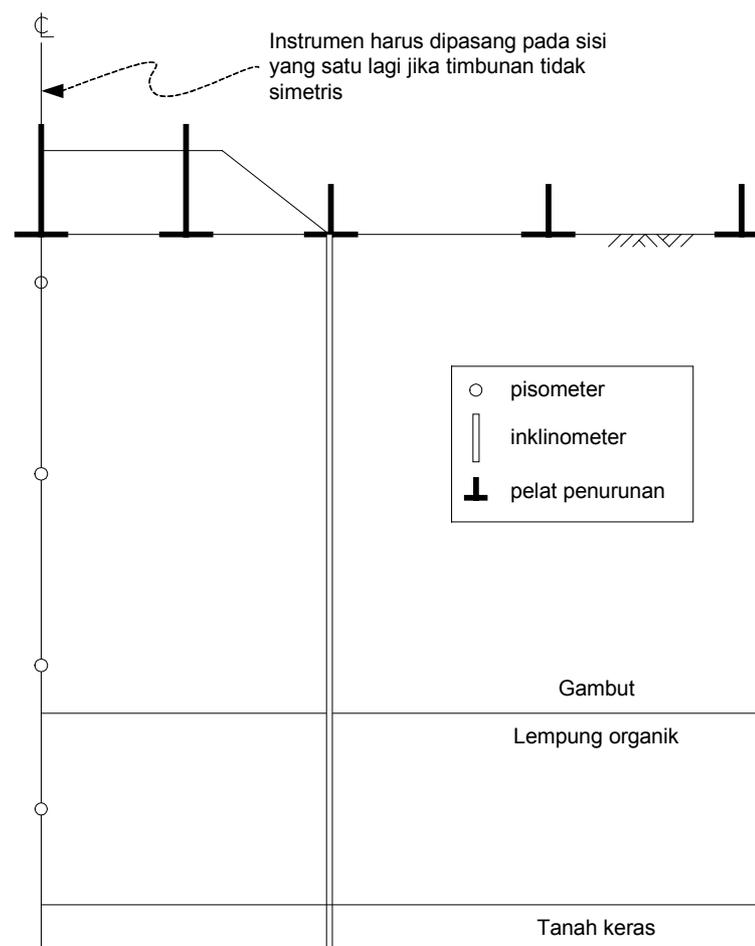
Pemilihan instrumen-instrumen di lapangan dan pengaturannya pada tanah dasar timbunan didasarkan atas persyaratan bahwa data hasil pengamatan harus memungkinkan dilakukannya verifikasi terhadap analisis desain dan, jika dibutuhkan, koreksi terhadap desain konstruksi.

Untuk menyediakan data hasil pengamatan yang dibutuhkan melalui pengawasan konstruksi pada timbunan bertingkat, digunakan berbagai jenis instrumen antara lain: pisometer pipa

terbuka (SNI 03-3442-1994), pisometer pneumatik (SNI 03-3452-1994), pelat penurunan dan inklinometer (SNI 03-3431-1994). Pengaturan instrumen pada tanah dasar suatu timbunan uji minimum mengikuti Gambar 11. Metode elemen hingga (lihat bagian 5.2.2.2) juga dapat diterapkan untuk merencanakan lokasi pemasangan instrumen dengan melihat pada hasil analisis lokasi-lokasi di mana pengaruh penimbunan berupa deformasi atau tegangan dominan.

Penempatan setidaknya satu pisometer pada tiap stratum di luar kaki timbunan diperlukan sehingga memungkinkan pengukuran variasi tekanan air pori selama konstruksi. Jika kenaikan tekanan air pori yang signifikan teramati, kuat geser yang digunakan dalam perhitungan stabilitas harus dikoreksi. Pisometer-pisometer tersebut harus dipasang pada daerah yang tidak terpengaruh oleh beban timbunan untuk memungkinkan diperolehnya tekanan air pori kondisi tanah asli sebagai kontrol.

Untuk mengikuti perubahan profil timbunan, instrumen yang paling sesuai adalah selang pengukur penurunan (*hose settlement gauge*) yang dipasang horizontal; untuk tujuan yang sama dapat digunakan pula pelat penurunan. Jarak di antara penampang melintang dengan peralatan pemantauan tergantung pada variasi kondisi tanah di sepanjang rute timbunan. Secara umum, sebuah penampang melintang yang dipasang instrumen secara lengkap harus didapati pada tiap bagian timbunan dengan kondisi tanah fondasi yang serupa. Penempatan alat pengukur penurunan dengan interval 100 m di sepanjang rute timbunan direkomendasikan apabila kondisi keuangan proyek mengijinkan.



Gambar 11 Lokasi minimum penempatan instrumen untuk timbunan

7.3 Interpretasi hasil-hasil monitoring

Keberhasilan penerapan teknik konstruksi timbunan bertingkat (*staging construction*) tergantung pada pengawasan terhadap perilaku fondasi tanah. Data hasil pengamatan memungkinkan adanya keputusan yang berkaitan dengan kemajuan konstruksi dan, jika diperlukan, perubahan pada penampang melintang timbunan, misalnya penambahan berm sementara.

Interpretasi hasil pengamatan memiliki dua sasaran utama:

- untuk mengevaluasi perilaku konsolidasi;
- untuk menilai stabilitas fondasi.

Untuk mencapai sasaran ini, digunakan dua teknik utama analisis:

- perkiraan langsung, misalnya peningkatan laju rata-rata penurunan dan deformasi horizontal memberikan indikasi akan terjadinya kegagalan atau pengukuran tekanan air pori yang menyediakan data untuk memperkirakan tegangan vertikal pada suatu waktu yang dibutuhkan untuk analisis stabilitas;
- verifikasi parameter desain, misalnya perkiraan koefisien konsolidasi horisontal yang dihitung kembali dari data pisometer dan penurunan.

Metode konstruksi Asaoka (1978) merupakan metode observasi yang paling populer karena selain dapat memprediksi penurunan akhir juga dapat memungkinkan diperolehnya parameter-parameter konsolidasi. Langkah-langkah yang diambil adalah berikut ini:

- dari kurva waktu terhadap penurunan dipilih titik penurunan $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$, sedemikian rupa sehingga ρ_n adalah penurunan pada waktu t_n dan interval waktu adalah konstan $\Delta t = t_n - t_{n-1}$;
- plot titik-titik tersebut (ρ_n, ρ_{n-1});
- titik-titik tersebut akan membentuk garis lurus sehingga:

$$\rho_n = \rho_0 + \beta \rho_{n-1} \quad (30)$$

- penurunan akhir, ρ_f , dinyatakan sebagai:

$$\rho_f = \frac{\rho_0}{1 - \beta} \quad (31)$$

- penurunan pada waktu t , ρ_t , dapat dihitung dari:

$$\rho_t = \rho_f (1 - \exp(-(\ln \frac{\beta}{\Delta t})t)) \quad (32)$$

- konstanta β merupakan gradien kemiringan dari kurva garis lurus di atas dan nilainya bisa dipergunakan untuk mendapatkan koefisien konsolidasi vertikal:

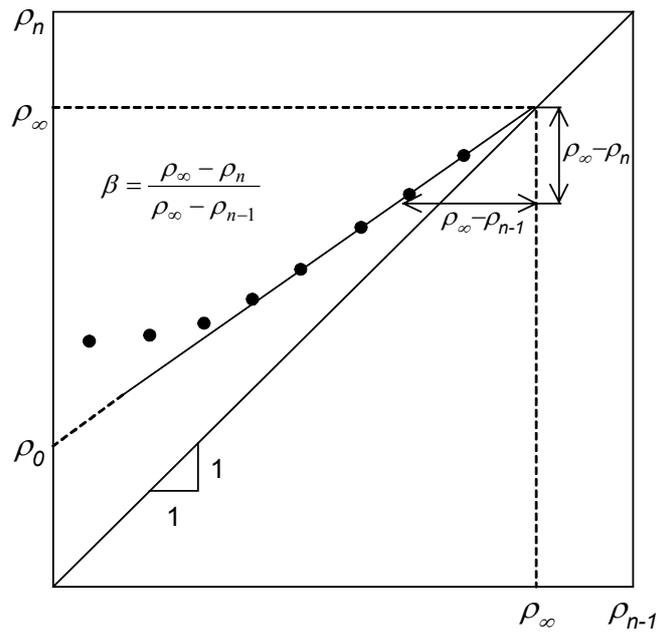
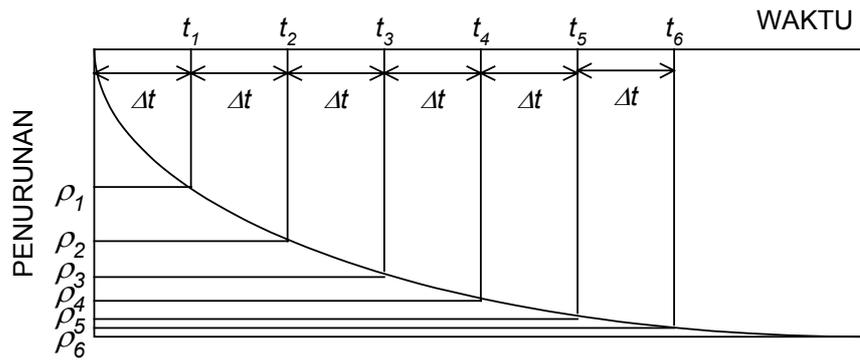
$$c_v = -\frac{4H^2 \ln \beta}{\pi^2 \Delta t} \quad (33)$$

di mana H adalah jarak drainase vertikal terjauh.

Gambar 12 memperlihatkan langkah-langkah konstruksi Asaoka secara grafis.

8 Contoh Perhitungan

Pada Lampiran B, penerapan berbagai teknik perhitungan dan desain yang dijabarkan pada pedoman ini diperlihatkan dalam suatu contoh perhitungan.



Gambar 12 Perkiraan penurunan akhir berdasarkan metoda Asaoka (1978)

Lampiran A

(informatif)

Sifat-sifat Umum Gambut

A.1 Pendahuluan

Gambut terutama terdiri dari serat tetumbuhan dalam berbagai tingkat dekomposisi. Gambut memiliki warna coklat tua hingga hitam, beraroma khas tetumbuhan yang membusuk, mempunyai konsistensi yang berongga tanpa memperlihatkan plastisitas yang kentara dan tekstur berserat (*fibrous*) hingga amorf. Di sekitar daerah gambut biasanya terdapat tanah organik dengan nilai kadar organik yang cukup tinggi.

A.2 Klasifikasi geoteknik gambut

Dalam rekayasa geoteknik, klasifikasi tanah lunak jika dibedakan berdasarkan kadar organiknya, dapat digolongkan sebagai berikut:

Tabel A.1 Tipe tanah berdasarkan kadar organik

Jenis Tanah	Kadar Organik (%)
Lempung	<25
Lempung Organik	25-75
Gambut	>75

Berdasarkan klasifikasi di atas maka suatu tanah digolongkan sebagai gambut apabila nilai kadar organiknya di atas 75%. Pada sistem USCS (*Unified Soil Classification System*), tanah kelompok 'Sangat Organik' (terutama bahan organik berwarna gelap dan bau organik) diberi simbol PT dan Nama Grup 'Gambut'.

Von Post (1924) merekomendasikan suatu metode klasifikasi dan pembagian gambut berdasarkan pengamatan visual terhadap struktur dan konsistensi gambut serta uji peremasan. Untuk keperluan rekayasa, pembagian tipe-tipe gambut berdasarkan skala von Post dibagi kedalam tiga tipe (lihat Tabel A.2).

Tabel A.2 Klasifikasi gambut berdasarkan skala von Post (Karlsson dan Hansbo, 1981)

Penamaan	Grup	Deskripsi
Gambut berserat	H1-H4	Derajat pembusukan rendah. Struktur berserat. Struktur tumbuhan terlihat jelas, terutama lumut keputih-putihan.
Gambut psedo-berserat	H5-H7	Derajat pembusukan <i>intermediate</i> . Struktur tumbuhan dapat dikenali.
Gambut amorf	H8-H10	Derajat pembusukan tinggi. Struktur tumbuhan tidak terlihat. Konsistensi seperti bubur.

A.3 Perilaku rekayasa

Gambut umumnya memiliki sifat kompresibilitas yang tinggi dan kuat geser *undrained* yang rendah. Seperti halnya kebanyakan tanah organik, gambut memiliki perilaku rangkak (*creep*) yang signifikan. Permeabilitas gambut relatif tinggi dengan nilai koefisien permeabilitas arah

horizontal lebih besar dari arah vertikal. Serat dan sisa-sisa tetumbuhan biasanya memiliki orientasi horizontal sehingga material ini bersifat anisotropis.

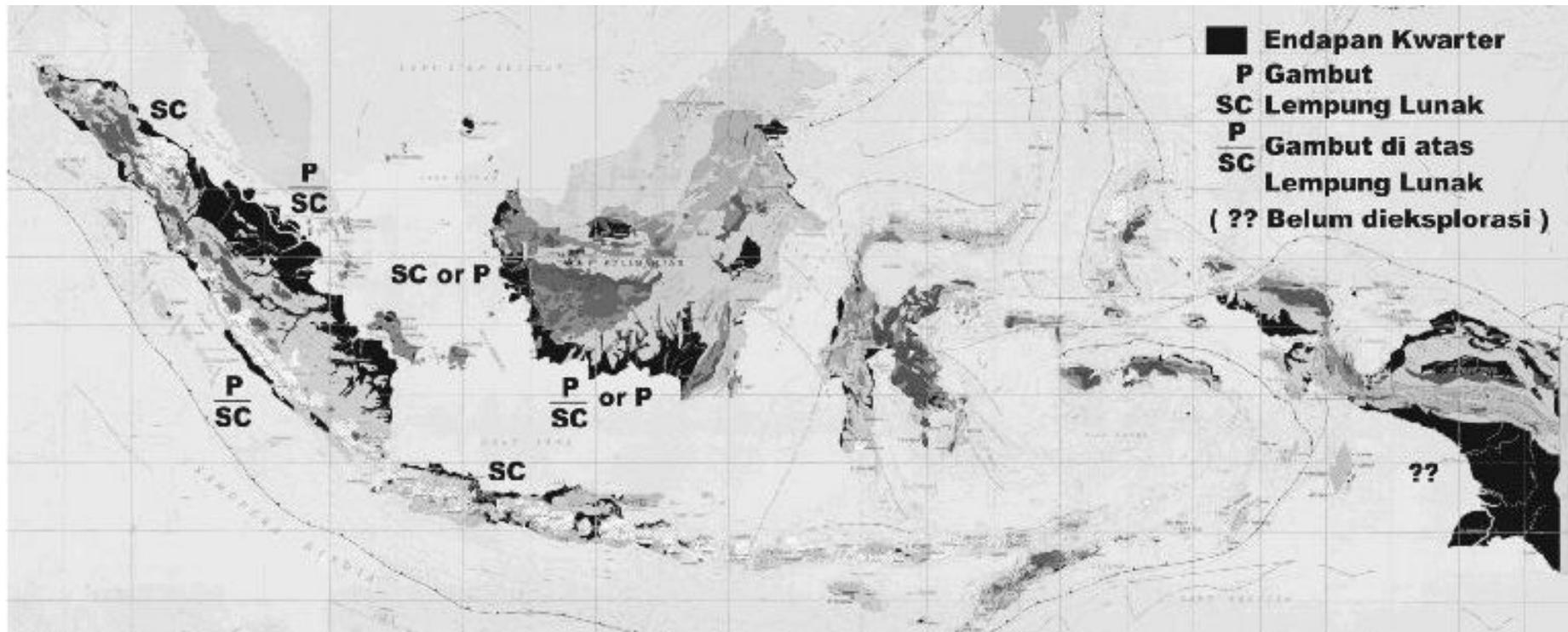
Beberapa contoh tanah gambut tidak menunjukkan mekanisme keruntuhan selama proses pembebanan (penggeseran). Hal ini disebabkan permeabilitas gambut yang tinggi dan pengaruh perkuatan dari serat gambut. Namun perlu diperhatikan bahwa tanah di bawah gambut pada banyak lokasi merupakan tanah lunak sehingga masalah stabilitas sering muncul.

A.4 Lokasi gambut di Indonesia

Gambut tropis mencakup kira-kira 50 juta hektar atau 10 persen daerah lahan-gambut dunia. Luas daerah lahan-gambut di Indonesia diduga antara 19 juta hingga 27 juta hektar. Daerah-daerah di Indonesia yang ditutupi oleh deposit gambut mencakup Sumatera bagian utara dan timur, Kalimantan, dan Irian Jaya seperti ter lihat pada Gambar A.1.

Pulau Sumatera dan Kalimantan mempunyai lahan gambut yang cukup luas dan berada di atas lapisan tanah lunak hingga *firm*. Gambut ini masih muda, berserat dan sangat kompresibel. Pada beberapa kasus, rapunan dengan dedaun dan reranting pohon serta semak terlihat jelas. Kadar air alami gambut berada dalam rentang 800% – 1200%.

Daerah lahan gambut di Kalimantan, Irian dan Sumatera masing-masing sebesar 50,4%, 24,9%, dan 24,3% dari seluruh lahan gambut di Indonesia. Sebagian besar deposit ini terdiri atas jenis obrogeni, sementara deposit jenis topogeni muncul pada beberapa tempat yang tidak terlalu luas (Radjagukguk). Hampir separuh deposit gambut di Kalimantan dan Sumatera mempunyai tebal lebih dari 2 meter. Pada daerah pantai, tebal maksimum deposit gambut kira-kira 2 meter sementara deposit yang lebih tebal mungkin muncul di daerah pedalaman Andrene. Di Sumatera tebal maksimum deposit gambut tercatat sampai 16 meter.



Gambar A.1 Sebaran gambut dan lempung lunak di Indonesia

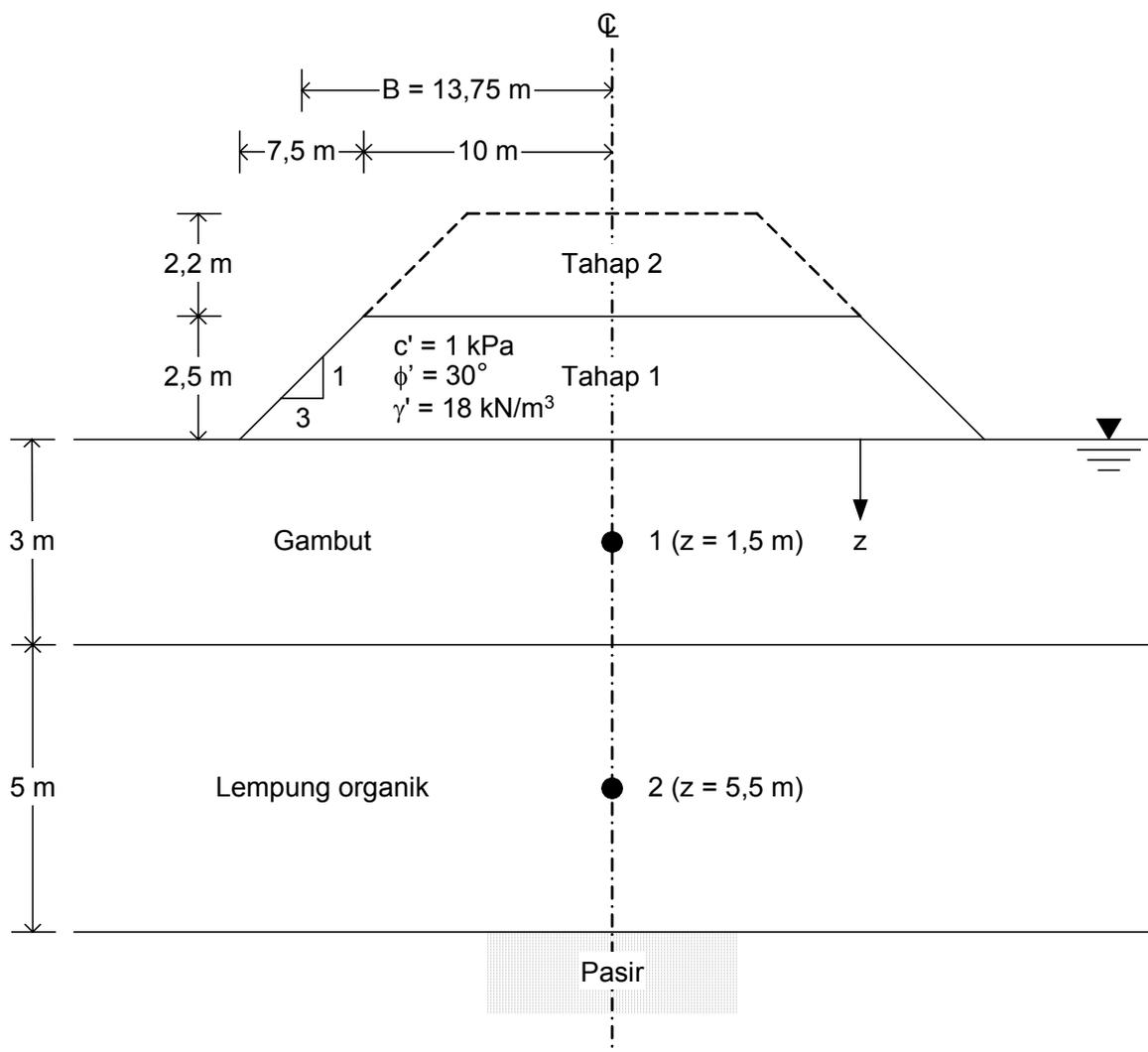
Lampiran B

(informatif)

Contoh Perhitungan

Suatu proyek jalan akan dilaksanakan di atas gambut setebal 3 m dengan lempung organik setebal 5 m di bawahnya. Persyaratan proyek jalan ini mewajibkan pekerjaan perkerasan harus dimulai 2 tahun sejak dimulainya konstruksi. Tinggi timbunan tidak boleh kurang dari 1,8 m dari tanah dasar. Untuk mengatasi masalah stabilitas akibat kuat geser *undrained* yang rendah pada tanah dasar dan meminimalkan penurunan akibat kompresi sekunder selama masa layan jalan (sekitar 10 tahun) maka konstruksi timbunan dilakukan dengan mengadopsi teknik prapembebanan.

Berdasarkan hasil dari analisis, tanah fondasi sanggup memikul beban timbunan setinggi 2,5 m dan perlu dibiarkan selama 1 tahun sebelum timbunan tahap kedua dilaksanakan. Sifat-sifat tanah dasar timbunan diperlihatkan pada Tabel B.1 sedangkan geometri timbunan ditunjukkan pada Gambar B.1.



Gambar B.1 Geometri timbunan dan stratifikasi tanah

Tabel B.1 Parameter-parameter geoteknik

Parameter	Simbol	Unit	Gambut	Lempung organik
Berat isi	γ	kN/m ³	11	14
Batas cair	w_L	%	313	103
Batas plastis	w_p	%	189	54
Indeks plastisitas	I_p	%	134	49
Kuat geser <i>undrained</i>	c_u	kPa	9	12
Angka pori	e_0	-	5,5	2,8
Indeks kompresi	C_c	-	2,5	0,8
Indeks rekompresi	C_s	-	0,2	0,05
Indeks kembang	C_r	-	0,28	0,08
Koefisien konsolidasi	c_v	m ² /s	$1,5 \times 10^{-7}$	2×10^{-8}
Koefisien kompresi sekunder	C_α	-	0,15	0,044
Koefisien kompresi sekunder pada daerah <i>overconsolidated</i>	C_α^s	-	0,03	0,01
Rasio terkonsolidasi lebih	OCR	-	4	2
Sudut geser dalam efektif (dari uji triaksial CU)	ϕ	°	20	17

B.1 Perhitungan penurunan dan stabilitas pada tahap 1

- a) Menghitung faktor keamanan untuk timbunan tahap 1 (tinggi timbunan 2,5 m).

Dari analisis stabilitas dengan metode Bishop yang disederhanakan didapat $F = 1,25$ (analisis stabilitas sengaja tidak ditampilkan di sini karena sudah merupakan perhitungan rutin)

- b) Mengestimasi rasio beban tambahan.

$$\text{Gambut: } \frac{C_\alpha^s}{C_\alpha} = \frac{0,03}{0,15} = 0,2$$

$$\text{Lempung organik: } \frac{C_\alpha^s}{C_\alpha} = \frac{0,01}{0,044} = 0,23$$

Dari Gambar 9 dengan mengambil nilai untuk gambut didapat $R_s = 0,29$.

Dengan menganggap tegangan yang bekerja pada tanah dasar sama dengan tebal timbunan maka didapat hubungan:

$$h_{s+f} = R_s \cdot h_f + h_f$$

dengan pengertian h_{s+f} adalah tebal timbunan dengan beban tambahan dan h_f adalah tebal timbunan pada masa layan (setelah pembuangan beban tambahan).

Sebagai estimasi awal h_f diambil sebesar 3,5 m sehingga $h_{s+f} = 4,52$.

Ambil $h_{s+f} = 4,7$ m untuk iterasi awal. Dengan demikian, tebal timbunan tahap 2 adalah $(4,7-2,5) = 2,2$ m.

- c) Menghitung kenaikan tegangan pada tanah dasar akibat berat timbunan (bisa dihitung dengan bantuan Gambar 4 atau dari teori elastisitas yang bisa dirujuk pada berbagai buku mekanika tanah) dengan kedalaman 1,5 m untuk gambut dan 5,5 m untuk lempung organik.

Gambut: $\Delta\sigma_{v1} = 44,97$ kPa

Lempung organik: $\Delta\sigma_{v2} = 43,85$ kPa

d) Menghitung tegangan *overburden*.

Gambut: $\sigma'_{v0_1} = (11-9,81) \times 1,5 = 1,78$ kPa

Lempung organik: $\sigma'_{v0_2} = (11-9,81) \times 3 + (14-9,81) \times 2,5 = 14,04$ kPa

e) Menghitung penurunan akibat konsolidasi.

$$\begin{aligned} \text{Gambut: } S_{c1} &= H \left(\frac{C_r}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} + \frac{C_c}{1+e_0} \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_p} \right) \\ &= 3 \times (0,043 \times \log 4 + 0,385 \times \log \frac{1,78 + 44,97}{7,2}) = 1,02 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Lempung organik: } S_{c2} = 5 \times (0,021 \times \log 2 + 0,211 \times \log \frac{14,04 + 43,85}{28}) = 0,0169 \text{ m}$$

f) Menghitung penurunan sesaat (*immediate settlement*).

Dari analisis stabilitas dengan metode Bishop yang disederhanakan didapat $F = 1,25$.

$$B = 10 + 7,5/2 = 13,75 \text{ m}$$

$$q_1 = 18 \times 2,5 = 45 \text{ kPa}$$

Dari Gambar 3, untuk $L/B = \infty$ dan $H/B = 8/13,75 = 0,582$ didapat $I_v = 0,035$

$$\text{Dari Persamaan (12): } E_u = \frac{215c_u \ln F}{I_p}$$

$$\text{Gambut: } E_{u1} = \frac{215 \times 9 \times \ln 1,25}{1,24} = 348 \text{ kPa}$$

$$\text{Lempung organik: } E_{u2} = \frac{215 \times 12 \times \ln 1,25}{0,49} = 1175 \text{ kPa}$$

$$\bar{E}_u = \frac{348 \times 3 + 1175 \times 5}{8} = 865 \text{ kPa (dari Persamaan (13))}$$

$$S_{i1} = 4 \frac{0,035 \times 45 \times 13,75}{865} = 0,1 \text{ m}$$

g) Menghitung derajat konsolidasi setelah 1 tahun.

Gambut: $c_{v1} = 1,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} = 0,01296 \text{ m}^2/\text{hari}$

$$T_{v1} = \frac{c_{v1} t}{H_1^2} = \frac{0,01296 \times 365}{3^2} = 0,526, \text{ dari Persamaan (25) } U_1 \approx 78\%$$

Karena nilai c_v untuk gambut jauh lebih besar dibandingkan lempung organik, maka aliran air untuk lempung organik dianggap dua arah (*two-way drainage*).

Lempung organik: $c_{v2} = 2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s} = 0,001728 \text{ m}^2/\text{hari}$

$$T_{v2} = \frac{c_{v2}t}{H_2^2} = \frac{0,001728 \times 365}{(5/2)^2} = 0,1 = 0,526, \text{ dari Persamaan (24) } U_2 \approx 35,5\%$$

h) Menghitung kuat geser setelah 1 tahun.

Kenaikan kuat geser takteralirkan bisa diestimasi dengan hubungan (Persamaan (5)):

$$\Delta c_u = U \cdot \tan \phi' \cdot \Delta \sigma_v$$

dengan ϕ' didapat dari parameter efektif uji triaksial CU.

$$\text{Gambut: } \Delta c_{u1} = U_1 \cdot \tan \phi_1' \cdot \Delta \sigma_{v1} = 0,78 \times \tan 20 \times 44,97 = 12,8 \text{ kPa}$$

$$\text{Lempung organik: } \Delta c_{u2} = U_2 \cdot \tan \phi_2' \cdot \Delta \sigma_{v2} = 0,355 \times \tan 17 \times 43,85 = 4,8 \text{ kPa}$$

$$c_{u1}' = c_{u1} + \Delta c_{u1} = 9 + 12,8 = 21,8 \text{ kPa}$$

$$c_{u2}' = c_{u2} + \Delta c_{u2} = 12 + 4,8 = 16,8 \text{ kPa}$$

Untuk timbunan dengan tinggi sebesar 4,7 m (secara konservatif pengaruh penurunan pada tahap 1 diabaikan), hasil analisis stabilitas dengan menggunakan metode Bishop yang disederhanakan menghasilkan faktor keamanan 1,37.

∴ Umur timbunan tahap 1 selama 1 tahun mencukupi untuk dilaksanakannya penimbunan tahap 2 secara langsung (dua tahap sudah mencukupi).

i) Menghitung penurunan pada akhir tahap 1 (waktu 1 tahun).

$$s_{c1} = 0,78 \times 1,02 = 0,8 \text{ m}$$

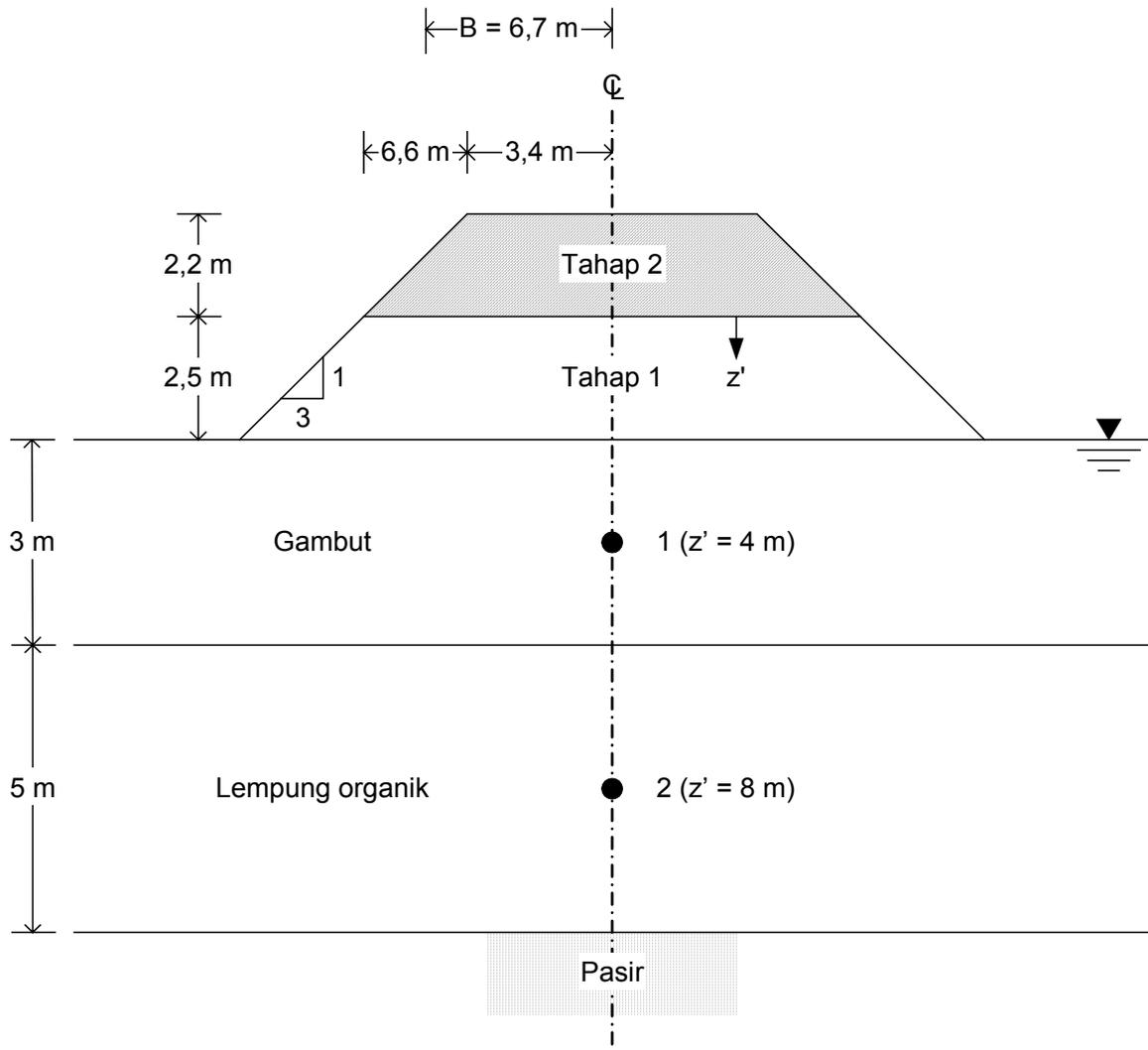
$$s_{c2} = 0,355 \times 0,36 = 0,13 \text{ m}$$

$$\text{Penurunan tahap 1: } s_{\text{tot1}} = s_{c1} + s_{c2} + s_{i1} = 0,8 + 0,13 + 0,1 = 1,03 \text{ m}$$

Karena konsolidasi tahap 1 belum selesai maka, maka penurunan akibat kompresi sekunder tidak dihitung.

B.2 Perhitungan penurunan dan stabilitas pada tahap 2

Asumsi pada tahap 2 adalah tebal stratifikasi tanah (gambut dan lempung organik) tidak mengalami perubahan akibat penurunan pada tahap 1. Asumsi lain adalah pengaruh *uplift* akibat tenggelamnya sebagian timbunan di bawah muka air tanah diabaikan. Kedua asumsi ini konservatif dan berada pada sisi yang lebih aman (*on the safer side*). Pekerjaan perkerasan dimulai 2 tahun dihitung mulai dari awal konstruksi timbunan maka surcharging yang merupakan bagian dari tahap 2 berlangsung selama 1 tahun. Pembuangan timbunan setebal 1,2 m mengakibatkan tebal timbunan selama masa layan adalah 3,5 m (lihat langkah (b) pada tahap 1).



Gambar B.2 Geometri timbunan dan stratifikasi tanah tahap 2

a) Menghitung penurunan sesaat (*immediate settlement*).

Dari analisis stabilitas dengan metode Bishop yang disederhanakan didapat $F = 1,37$ (lihat langkah (f) untuk tahap 1).

$$B = 3,4 + 6,6/2 = 6,7 \text{ m}$$

$$q_2 = 18 \times 2,2 = 39,6 \text{ kPa}$$

Karena q_2 bekerja pada permukaan timbunan tahap 1 maka q_2' yang sesungguhnya bekerja pada permukaan tanah asli ($z' = 2,5 \text{ m}$) harus dihitung dengan menggunakan teori elastisitas.

$$q_2' = 2I q_2 = 2 \times 0,486 \times 39,6 = 38,5 \text{ kPa}$$

Nilai I diperoleh dari Gambar 4. Kemudian, dari Gambar 3, untuk $L/B = \infty$ dan $H/B = 8/6,7 = 1,194$ didapat $I_v = 0,106$.

Dari Persamaan (12):
$$E_u = \frac{215c_u \ln F}{I_p}$$

$$\text{Gambut: } E_{u1} = \frac{215 \times 21,8 \times \ln 1,37}{1,24} = 1190 \text{ kPa}$$

$$\text{Lempung organik: } E_{u2} = \frac{215 \times 16,8 \times \ln 1,37}{0,49} = 2321 \text{ kPa}$$

$$\overline{E}_u = \frac{1190 \times 3 + 2321 \times 5}{8} = 1897 \text{ kPa (dari Persamaan (13))}$$

$$S_{i2} = 4 \frac{0,106 \times 38,5 \times 6,7}{1897} = 0,058 \text{ m}$$

- b) Menghitung tegangan *overburden*.

$$\text{Gambut: } \sigma'_{v01} = 1,78 + 0,78 \times 44,97 = 36,86 \text{ kPa}$$

$$\text{Lempung organik: } \sigma'_{v02} = 14,04 + 0,355 \times 43,85 = 29,61 \text{ kPa}$$

Akurasi perhitungan sebenarnya bisa diperbaiki dengan mempertimbangkan pengaruh angkatan (*uplift*) akibat sebagian timbunan berada di bawah muka air tanah karena penurunan.

- c) Menghitung kenaikan tegangan pada tanah dasar akibat berat timbunan (bisa dihitung dari teori elastisitas yang bisa dirujuk pada berbagai buku mekanika tanah) dengan jarak dari permukaan timbunan tahap 1 $z' = 4$ m untuk gambut dan $z' = 8$ m untuk lempung organik.

$$\text{Gambut: } \Delta\sigma_{v1} = 36,32 \text{ kPa}$$

$$\text{Lempung organik: } \Delta\sigma_{v2} = 29,01 \text{ kPa}$$

- d) Menghitung penurunan akibat konsolidasi.

$$\text{Gambut: } e_1 = e_0 - \frac{1+e_0}{H} S_{c1} = 5,5 - \frac{1+5,5}{3} 0,8 = 3,77$$

$$S_{c1}' = \frac{2,5 \times 3}{1+3,77} \log \frac{36,86 + 36,32}{36,86} = 0,47 \text{ m}$$

$$\text{Lempung organik: } e_1 = 2,8 - \frac{1+2,8}{5} 0,13 = 2,70$$

$$S_{c2}' = \frac{0,8 \times 5}{1+2,70} \log \frac{29,61 + 29,01}{29,61} = 0,32 \text{ m}$$

$$s_c' = s_{c1}' + s_{c2}' = 0,47 + 0,32 = 0,79 \text{ m}$$

Perhitungan yang lebih akurat bisa diperoleh dengan mempertimbangkan berkurangnya tebal lapisan gambut & lempung organik akibat pengaruh kompresi sebagai bagian dari proses konsolidasi.

- e) Menghitung derajat konsolidasi pada tahap 2 (1 tahun mulai dari akhir tahap 1)

Seperti telah diungkapkan sebelumnya, H & c_v dianggap tidak berubah akibat pembebanan pada tahap 1 sehingga derajat konsolidasi pada tahap 2 sama dengan tahap 1.

- f) Menghitung penurunan pada akhir tahap 2 (waktu 1 tahun).

$$s_{c1}' = 0,78 \times 0,47 = 0,37 \text{ m}$$

$$s_{c2}' = 0,355 \times 0,32 = 0,11 \text{ m}$$

$$\text{Penurunan tahap 2: } s_{\text{tot}2} = s_{c1} + s_{c2} + s_{i2} = 0,37 + 0,11 + 0,058 = 0,54 \text{ m}$$

Karena konsolidasi tahap 2 belum selesai maka, maka penurunan akibat kompresi sekunder tidak dihitung.

- g) Menghitung tegangan *overburden* sebelum pembuangan beban tambahan.

$$\text{Gambut: } \sigma'_{v0_1} = 36,86 + 0,78 \times 36,32 = 65,19 \text{ kPa}$$

$$\text{Lempung organik: } \sigma'_{v0_2} = 29,61 + 0,355 \times 29,01 = 39,91 \text{ kPa}$$

- h) Menghitung pengurangan tegangan akibat pembuangan beban tambahan setebal 1,2 m.

$$\text{Gambut: } -\Delta\sigma_1' = -2l_1 q_2 = -2 \times 0,409 \times (1,2 \times 18) = -17,66 \text{ kPa}$$

$$\text{Lempung organik: } -\Delta\sigma_2' = -2l_2 q_2 = -2 \times 0,301 \times (1,2 \times 18) = -12,98 \text{ kPa}$$

l_1 dan l_2 didapat dari teori elastisitas dengan kedalaman z'' dan geometri timbunan seperti terlihat pada Gambar B.3.

- i) Menghitung swelling akibat pembuangan beban tambahan setebal 1,2 m.

$$\text{Gambut: } e_2 = e_1 - \frac{1+e_1}{H} S_{c1}' = 3,77 - \frac{1+3,77}{3} 0,37 = 3,18$$

$$\text{Dari Persamaan (29): } S_{sw} = C_{s\epsilon} H \log \frac{\sigma'_{v(f+sr)}}{\sigma'_{vf}}$$

$$Sw_1 = -\frac{0,2 \times 3}{1+3,18} \log \frac{65,19}{65,19-17,66} = -0,02 \text{ m}$$

$$\text{Lempung organik: } e_2 = 2,7 - \frac{1+2,7}{5} 0,11 = 2,62$$

$$Sw_2 = -\frac{0,05 \times 5}{1+2,62} \log \frac{39,91}{39,91-12,98} = -0,012 \text{ m}$$

$$Sw = Sw_1 + Sw_2 = -0,02 - 0,012 = -0,032 \text{ m}$$

- j) Menghitung waktu swelling akibat pembuangan beban tambahan.

Berdasarkan penelitian Samson (1985), waktu swelling yang diperlukan akibat *unloading* kurang lebih sama dengan waktu beban tambahan. Pada contoh kasus, waktu beban tambahan adalah 1 tahun sehingga waktu swelling diestimasi juga sebesar 1 tahun.

- k) Menghitung waktu dimulainya kompresi sekunder.

Setelah terjadinya swelling penurunan berikutnya yang akan terjadi adalah kompresi sekunder pada bagian "terkonsolidasi lebih" (OC) yang besarnya kurang lebih sama dengan swelling.

Di sini, lapisan gambut yang hanya akan ditinjau karena penurunan sekunder lebih dominan pada lapisan ini dan formula yang akan dipakai:

$$S_{sw} = \frac{C_{\alpha}^s}{1 + e_2} H \log \frac{t_s'}{t_s}$$

dengan pengertian t_s adalah lamanya swelling dan t_s' adalah lamanya kompresi sekunder pada bagian "terkonsolidasi lebih" (OC). Perhitungan selanjutnya:

$$0,02 = \frac{0,03 \times 3}{1 + 3,18} \log \frac{t_s'}{1} \text{ sehingga didapat } t_s' = 8,5 \text{ tahun.}$$

∴ Penurunan sekunder pada bagian "terkonsolidasi normal" akan berlangsung setelah (1 + 8,5) = 9,5 tahun (kurang lebih sama masa layan yang disyaratkan yaitu 10 tahun) setelah pembuangan beban tambahan. Penurunan pada bagian ini akan jauh lebih besar sehingga harus diantisipasi.

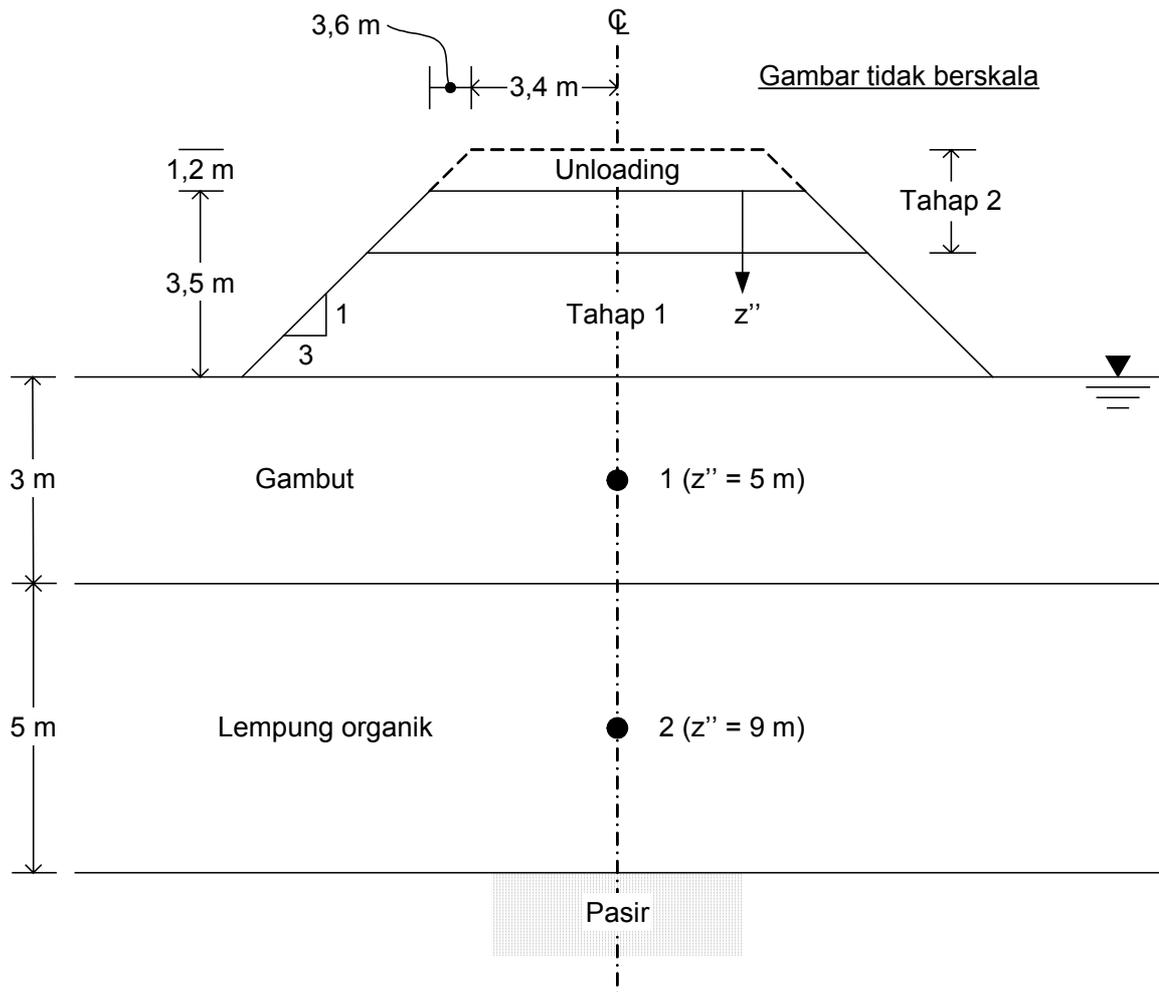
- l) Menghitung tinggi timbunan selama masa layan.

$$H_f = 3,5 - s_{tot1} - s_{tot2} + s_w - s_{sw} = 3,5 - 1,03 - 0,54 + 0,032 - 0,02 = 1,94 \text{ m} > 1,8 \text{ m}$$

Metode konstruksi memenuhi syarat ketinggian timbunan selama masa layan (± 10 tahun).

B.3 Komentar

Perhitungan di atas sifatnya pendahuluan. Akurasi perhitungan dapat diperbaiki dengan menerapkan metode elemen hingga (FEM) dalam analisis. Walaupun demikian, untuk memastikan asumsi-asumsi yang diambil dalam analisis maka diperlukan pemantauan perilaku timbunan (antara lain penurunan dan tekanan air pori) dengan pemasangan instrumentasi di lapangan. Dari hasil pemantauan bisa diambil keputusan mengenai perubahan metode konstruksi yang dipandang perlu.



Gambar B.3 Geometri timbunan pada masa layan

**Lampiran C
(informatif)****Daftar nama dan lembaga****1) Pemrakarsa**

Pusat Penelitian dan Pengembangan Prasarana Transportasi, Badan Penelitian dan Pengembangan Kimpraswil.

2) Penyusun

Nama	Instansi
Dr. Ir. Hedy Rahadian, MSc.	Pusat Litbang Prasarana Transportasi
Ir. Budi Satriyo, MT	Pusat Litbang Prasarana Transportasi
Ir. Rudy Febrijanto, MT	Pusat Litbang Prasarana Transportasi

Bibliografi

- Broms, B. (1979) Problems and solutions to constructions in soft clay. *Proc. 6th Asian Reg. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, Vol. 2, Singapore.
- Das, B.M. (2002) *Principles of geotechnical engineering*. 5th ed. Brooks/Cole.
- Desai, C.S. dan Kundu, T. (2001) *Introductory finite element method*. CRC Press.
- Duncan, J.M. (1996) State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. *J. Geotech. Engrg.*, Vol. 122, No. 7, 577-596, ASCE.
- Geotechnical analysis by the finite element method. (1995) *Technical Letter No. 1110-2-544*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- Hartlen, J. dan Wolski, W. (Editor) (1996) Embankments on organic soils. *Development in Geotechnical Engineering*, 80, Elsevier Science B.V.
- Holtz, R.D. dan Kovacs, W. D. (1981) *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice-Hall, Inc.
- Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T., dan Lancellotta, R. (1985) New developments in field and laboratory testing of soils: Theme Lecture 2. *Proc. 11th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg.*, San Francisco, Vo. 1, 57-153.
- Johnson, S.J. (1970) Precompression for improving foundation soils. *J. Soil Mech. Found. Engrg.* Vol. 96, SM 1, 111-144, ASCE.
- Ladd, C.C. (1991) Stability evaluation during staged construction, The 22nd Karl Terzaghi Lecture. *J. Geotech. Engrg.*, Vol. 117, No. 4, 537-614, ASCE.
- Lambe, T. W. dan Whitman, R.V. (1969) *Soil mechanics, SI version*. John Wiley & Sons, Inc.
- O'Riordan, N.J. dan Seaman, J.W. (1994) Highway embankments over soft compressible alluvial deposits: guideline for design and construction. *Contractor Report 341*, Transport Research Laboratory.
- Padfield, C.J. dan Sharrock, M.J. (1983) Settlement of structures on clay soils. *CIRIA Special Publication 27*, PSA Civil Engineering Technical Guide 38, CIRIA.
- Perry, J., Pedley, M. dan Reid, M. (2001) Infrastructure embankments: condition appraisal and remedial treatment. *Publication C550*, CIRIA.
- Potts, D.M. dan Zdravkovic, L. (1999) *Finite element analysis in geotechnical engineering: theory*. Thomas Telford, London.
- Sabatini, P.J., Bachus, R.C., Mayne, P.W., Schneider, J.A. dan Zettler, T.E. (2002) Geotechnical Engineering Circular No. 5: Evaluation of soil and rock properties. *Report No. FHWA-IF-02-034*, FHWA.
- Whitman, R.V. dan Bailey, W.A. (1967) Use of computers for slope stability analysis. *J. Soil Mech. Found. Engrg.*, Vol. 93, No. SM4, 475-498, ASCE.
- Wright, S.G., Kulhawy, F.H. dan Duncan, J.M. (1973) Accuracy of equilibrium slope stability analysis. *J. Soil Mech. Found. Engrg.*, Vol. 99, No. SM10, 783-791.