

JURNAL ILMIAH SEMESTA TEKNIKA

Vol. 7, No. 2, November 2004
ISSN 1411-061X

PENURUNAN KONSOLIDASI EMBANKMENT DI ATAS TANAH LEMPUNG LUNAK

Agus Setyo Muntohar

VALIDASI PERCEPATAN GERAKAN TANAH DAN EFEK FREKUENSI GEMPA TERHADAP RESPON STRUKTUR BANGUNAN BERTINGKAT

As'at Pujiyanto

SIMULASI LS Z80 DENGAN BORLAND DELPHI

Dwijoko Purbohadi, Arif Hadianto & Bledug Kusuma PM

KARAKTERISTIK PENGGUNA MODA DARI TERMINAL BUS

Gendut Hantoro, Arief Wicaksana Ady & Wahyu Widodo

OPTIMASI BEBAN AS TRUK UNTUK MEMINIMALKAN BIAYA TRANSPORTASI
(Studi Kasus: Ruas Jalan Solo-Sragen-Mantingan, Provinsi Jawa Tengah)

Gito Sugiyanto

OPTIMASI PERCEPATAN DURASI DENGAN PENAMBAHAN JAM KERJA PADA PROYEK PEMBANGUNAN JEMBATAN (METODE: LEAST COST ANALYSIS)

M. Heri Zulfiar

VISUALISASI POLA ALIRAN PADA FENOMENA WATERHAMMER AKIBAT PENUTUPAN KATUP SECARA TIBA-TIBA PADA SALURAN HORIZONTAL

Sukamta

PENGGUNAAN LAMPU TL DAN PEMASANGAN KAPASITOR PARALEL SEBAGAI UPAYA MENURUNKAN BIAYA PEMAKAIAN ENERGI LISTRIK

Slamet Suropto

- Pemimpin Redaksi : Ir. Bledug Kusuma Prasaja, M.T.
Redaksi Pelaksana : Jazaul Ikhsan, S.T, M.T.
Sukamta, S.T., M.T.
Mitra Bestari : Prof. Adhi Susanto, M. Sc., Ph.D.
Dr. Ir. Indarto, DEA.
Ir. Soejatmiko, M.Sc.
Ir. Soegeng Djojowirono.
Ir. H. Daruslan.
Ir. Tony Soewandito .
- Sekretariat : Restu Fauziah, S.T
Arif Hadiano, S.T
- Periode Terbit : 2 x dalam setahun
Terbit Pertama : November 1998

JURNAL ILMIAH SEMESTA TEKNIKA adalah jurnal yang memuat hasil penelitian berupa kajian, rancang bangun, maupun pemodelan bidang rekayasa (keteknikan) dari prespektif Teknik Sipil, Teknik Elektro, maupun Teknik Mesin.

Untuk mendukung keberlangsungan jurnal redaksi mengundang para peneliti untuk menyumbang artikel ilmiah. Artikel disusun dengan sistematika sebagai berikut: judul; nama penulis; abstrak dalam bahasa Inggris (jika artikel berbahasa Indonesia) atau abstrak dalam bahasa Indonesia (jika artikel berbahasa Inggris); kata kunci (jika artikel dalam bahasa Indonesia) atau key word (jika artikel berbahasa Inggris); pendahuluan (meliputi: rumusan masalah, tinjauan pustaka, tujuan, dan manfaat); metode penelitian; hasil dan pembahasan; simpulan dan saran; persantunan (jika ada); daftar pustaka; lampiran (jika ada).

Artikel ilmiah hasil penelitian tersebut diketik 1,5 spasi; font 12; kertas HVS ukuran kwarto (21,6 cm x 28 cm), maksimum 15 halaman. Artikel yang dikirim hendaknya disertai dalam bentuk disket dengan program WS, MS, Word, atau Word Perfect.

Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Gedung Maesaroh Hilal Kampus Terpadu UMY
Jl. Lingkar Barat Tamantirto Bantul Yogyakarta
Telp. 0274-387656 Fax. 0274-387646
Alamat E-mail: semesta_teknika@umy.ac.id
Bank: BUKOPIN 041Cab. Yogyakarta a.n JAZAUL IKHSAN
No. Rek: 1001033743

PENURUNAN KONSOLIDASI EMBANKMENT DI ATAS TANAH LEMPUNG LUNAK

Agus Setyo Muntohar

Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

ABSTRACT

The soil settlement can be easily calculated based on the Boussinesq's theory. However, the approximate method has some limitation when applied in different soils. In this study, a simple model of embankment over the soft clay soils is devised to study the settlement characteristics. The model is scaled as length dimension (L) 1 : 10, whose fabricated from flexiglass material and rigid. The clay thickness is varies in two different layers i.e. 10 cm (P-1) and 20 cm (P-2). Consolidation test is carried out to investigate the compressibility properties of clays used in the model. The settlement was analyzed by using analytical method: one-point, 1/6 Simpson, dan sub-layers methods. The test result shows that the sub-layers method is accurate to calculate the consolidation settlement compared to other two methods. The number of layers as much as $n = 20$ is enough to calculate the settlement convergency. The accuracy of the sub-layers method is confirmed also when compared to result of embankment model. In general, the sub-layers method is more applicable to calculate the consolidation settlement of the soft clay whose the clay thickness is equal or greater than width of the foundation (B_f).

Keywords: *settlement, consolidation, embankment, soft clay.*

PENDAHULUAN

Konstruksi embankment atau timbunan tanah untuk jalan raya sering dibangun di atas tanah lunak yang mempunyai kuat dukung tanah yang rendah. Secara teoritis akibat rendahnya kuat dukung dan penambahan tegangan vertikal dari embankment akan menyebabkan penurunan (*settlement*). Besarnya penurunan yang terjadi ini pada beberapa kondisi dapat dengan mudah diperkirakan dengan menggunakan pendekatan teori seperti teori Boussinesq. Namun metode ini juga didasarkan pada keterbatasan asumsi-asumsi model tanah. Untuk itu uji lapangan dengan *trial embankment* (*trial embankment test*) adalah alternatif untuk mengetahui penurunan yang sangat mendekati dengan penurunan yang akan terjadi. Akan tetapi, tentunya *trial embankment test* ini memerlukan biaya yang tidak sedikit. Oleh karena itu, sebagai suatu alternatif pendekatan, pembuatan model sederhana uji penurunan di laboratorium akan dilakukan dalam penelitian ini.

Dalam memperkirakan penurunan secara teoritis metode-metode untuk seperti *one-point*, *aturan simpson* atau *sub-layers* akan memberikan hasil yang berbeda. Banyak faktor yang akan mempengaruhi perbedaan karakteristik penurunan embankment di atas tanah lempung lunak selain beban embankment yaitu antara lain jenis tanah lempung dan ketebalan lapisan tanah lempung. Penurunan pada tanah lempung ini dapat berlangsung lama sehubungan dengan proses konsolidasi. Semakin tebal lapisan tanah lempung dan semakin lunak tanah lempung tersebut, secara teoritis penurunan yang terjadi akan semakin besar. Untuk itu kedua faktor ini perlu dikaji sebagai parameter yang mempengaruhi penurunan.

Menurut Mc. Phail dkk. (2000) besarnya penurunan konsolidasi akibat beban fondasi dipengaruhi oleh antara lain : (1) jenis tanah lempung, (2) ketebalan lapisan tanah lempung, (3) kedalaman fondasi, (4) intensitas beban, (5) ketebalan lapisan pasir di atas tanah lempung, dan (6) dimensi fondasi. Untuk dua faktor pertama, disebutkan bahwa penurunan tanah meningkat sebesar 4 kali bila jenis tanah sangat lunak dimana mempunyai batas cair, $LL = 75\%$, dengan angka pori, $e = 2$, dan indeks pempadatan, $C_c = 0,624$. Dari hasil simulasi yang dilakukannya diketahui bahwa, penurunan tanah yang terjadi cukup besar sampai dengan ketebalan tanah lempung 20 m, untuk ketebalan lapisan lebih dari 20 m tidak banyak mengalami penurunan lagi. Analisis dan penghitungan penurunan yang dilakukannya menunjukkan bahwa metode *sub-layer* lebih baik daripada metode *one-point*.

Anggapan yang dibuat oleh Mc Phail dkk. (2000) dalam analisis dan penghitungan penurunan ternyata kurang tepat sebagaimana yang diteliti oleh Budi dkk. (2003). Budi dkk. (2003) menunjukkan bahwa untuk kondisi tanah sangat lunak, analisis dan penghitungan penurunan lebih dekat dengan kondisi tanah *overconsolidated (OC)* daripada *normally consolidated (NC)*. Lebih lanjut, Budi dkk. (2003) menunjukkan bahwa untuk tiga variasi pemodelan ketebalan tanah, yaitu 24 cm, 39 cm, dan 50 cm, penurunan konsolidasi akan semakin besar dengan semakin tebal lapisan tanah lempung. Seperti halnya dikemukakan oleh Mc. Phail dkk. (2000), Budi dkk. (2003) juga menunjukkan bahwa penurunan yang dihitung dengan metode *sub-layer* selalu lebih besar dari penurunan yang dihitung dengan metode *one-point*, dan lebih mendekati penurunan hasil uji model. Baik Budi dkk. (2003) dan Mc. Phail dkk. (2000) menyebutkan bahwa 10 jumlah lapisan pada metode *sub-layers* telah memberikan konvergensi penghitungan penurunan konsolidasi.

Perkiraan besarnya penurunan konsolidasi dapat diketahui berdasarkan hasil uji konsolidasi di laboratorium. Penurunan yang terjadi

di lapangan diasumsikan sebagai konsolidasi satu dimensi. Penurunan konsolidasi ini pada dasarnya merupakan akibat terjadinya perubahan volume (*volume change*). Perubahan volume ini dinyatakan dengan perubahan angka pori (Δe). Selanjutnya besarnya penurunan konsolidasi (S_c) akibat perubahan angka pori dirumuskan seperti dalam Persamaan (1) (Terzaghi & Peck, 1948).

$$S_c = h \frac{\Delta e}{1 + e_o} \quad (1)$$

dimana h adalah ketebalan lapisan lempung dan e_o adalah angka pori awal.

Untuk tanah lempung dengan kondisi terkonsolidasi normal (*normally consolidated*), perubahan angka pori diberikan oleh :

$$\Delta e = C_c \left[\log \frac{(\sigma'_o + \Delta \sigma')}{\sigma'_o} \right] \quad (2)$$

Sedangkan untuk lapisan tanah lempung terkonsolidasi berlebih (*over consolidated*) perubahan angka pori diberikan oleh :

$$\Delta e = C_s \left[\log \frac{(\sigma'_o + \Delta \sigma')}{\sigma'_o} \right], \text{ untuk } (\sigma'_o + \Delta \sigma) \leq \sigma'_c \quad (3)$$

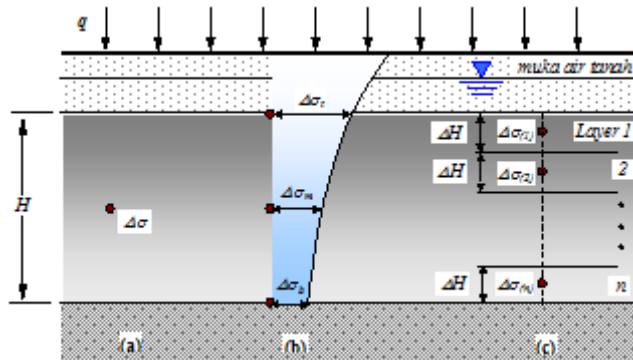
$$\Delta e = C_r \left(\log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} \right) + C_c \left[\log \frac{(\sigma'_o + \Delta \sigma')}{\sigma'_c} \right],$$

untuk $\sigma'_o < \sigma'_c < (\sigma'_o + \Delta \sigma)$ (4)

Metode One – Point. Dalam metode ini lapisan tanah dianggap satu lapisan (*one layer*) dan penambahan tegangan ($\Delta \sigma$) akibat beban di permukaan tanah hanya ditinjau pada tengah lapisan tanah lempung (Gambar 1a). Selanjutnya penurunan konsolidasi dihitung dengan persamaan (1).

Metode Aturan $\frac{1}{6}$ Simpson. Penambahan tegangan ($\Delta \sigma$) dalam metode ini dihitung sebagai nilai rata-rata dengan menggunakan aturan $\frac{1}{6}$ Simpson (Gambar 1b) yang dinyatakan dalam Persamaan (5).

$$\Delta \sigma_{av} = \frac{1}{6} (\Delta \sigma_t + 4 \Delta \sigma_m + \Delta \sigma_b) \quad (5)$$



Gambar 1 Metode perkiraan penurunan konsolidasi (a) one-point, (b) $\frac{1}{6}$ Simpson, (c) sub-layers

Metode Sub-Layers. Metode ini menggunakan pendekatan bahwa suatu lapisan tanah terdiri dari beberapa lapisan tipis (Gambar 1c). Budhu (2000) menjelaskan bahwa pembagian lapisan tanah menjadi beberapa lapisan kecil akan lebih sesuai diterapkan untuk ketebalan tanah lebih dari 2 m. Penambahan tegangan ($\Delta\sigma$) dan perhitungannya dilakukan pada setiap lapisan. Penurunan total untuk lapisan tanah lempung setebal h diberikan oleh persamaan berikut :

$$S_c = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta S_{c,i} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta e_i}{1 + e_o} \Delta h \quad (6)$$

METODE PENELITIAN

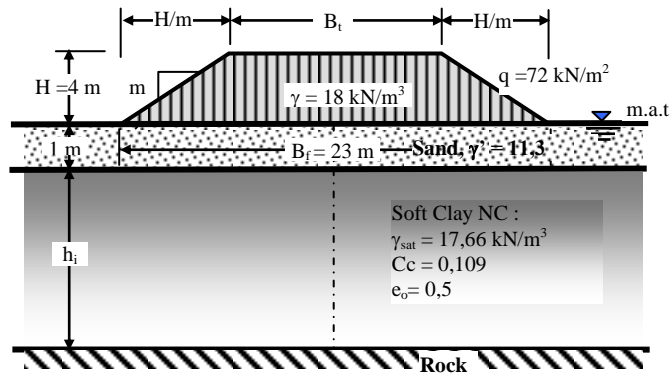
1. Desain Penelitian

Penelitian ini secara umum dibagi dalam dua bagian penelitian yaitu analisis teoritis penurunan konsolidasi dan uji model laboratorium. Analisis teoritis penurunan konsolidasi dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh metode yang digunakan (*one-point*, *simpson*, dan *sub-layers*), karakteristik tanah lempung (ketebalan lapisan tanah lempung), dan jumlah pembagian lapisan (n) terhadap penurunan konsolidasi. Data karakteristik tanah dan karakteristik embankment yang digunakan dalam analisis teoritis ini berupa data sekunder yang diperoleh dari beberapa pustaka. Berdasarkan hasil kajian teoritis ini, dibuat model uji 2D guna membandingkan hasil penurunan sesungguhnya dan penurunan teoritis. Tanah yang digunakan sedemikian rupa sehingga diharapkan sebagai tanah lempung lunak. Uji sifat-sifat fisik dan konsolidasi dari model 2D diperlukan sebagai masukan dalam penghitungan penurunan konsolidasi.

2. Alat dan Bahan

Data untuk analisis teoritis penurunan konsolidasi

Data yang digunakan untuk analisis teoritis penurunan konsolidasi didasarkan pada data sekunder dari Rahadian dkk. (2003) untuk data fisik embankment dan Mc. Phail dkk. (2000) untuk data tanah lempung.



Gambar 2 Kondisi tanah dan embankment untuk kajian teoritis penurunan

Tanah Lempung

Tanah yang digunakan sebagai tanah lempung untuk uji model 2-D diambil dari Godean. Berdasarkan identifikasi pengujian sifat-sifat fisis tanah tersebut memiliki berat jenis (*specific gravity*), $G_s = 2,4$, batas cair (*liquid limit*), $LL = 41,3\%$, indek plastistas (*plasticity index*), $PI = 15,5\%$, dan kandungan butir halus (ukuran butir $< 7,5 \mu\text{m}$) = 58% , Menurut sistem pengklasifikasian tanah USCS, tanah ini diklasifikasikan ke dalam tanah lempung/lanau dengan simbol ML/OL yang mempunyai kandungan lempung (ukuran butir $< 2 \mu\text{m}$) sebesar $17,6\%$.

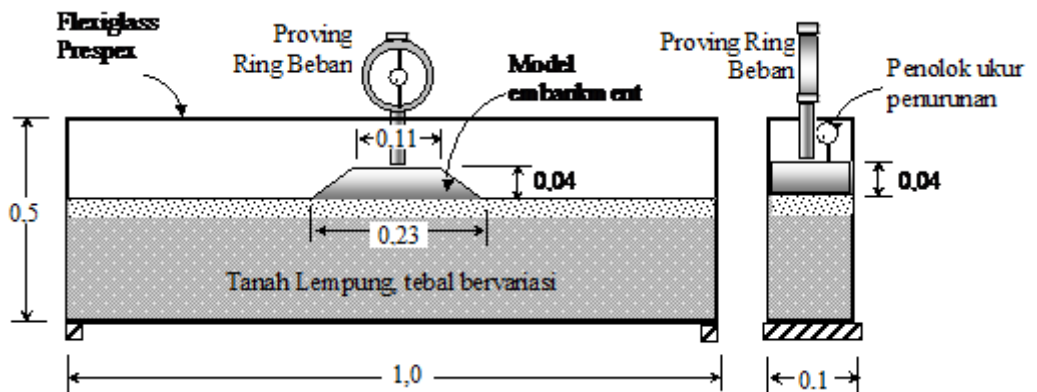
3. Model Embankment 2-D

Dalam penelitian ini uji model penurunan konsolidasi di lakukan di laboratorium. Skala pemodelan adalah pada skala dimensi panjang (L) 1 : 100. Model dibuat dalam bidang 2 dimensi (2-D model), yang terbuat dari bahan *flexiglass* dengan ukuran panjang 100 cm, lebar 10 cm, dan tinggi 50 m (Gambar 3). Sample tanah lempung diuji dalam kondisi batas cairnya. Model embankment terbuat dari bahan *flexi-glass* elastis berbentuk trapesium dengan tinggi 4 cm, lebar bagian bawah 23 cm dan lebar pada bagian puncak 11 cm dan diisi dengan pasir seragam yang mempunyai berat volume, $\gamma = 14,4 \text{ kN/m}^3$. Untuk pembebanan pada

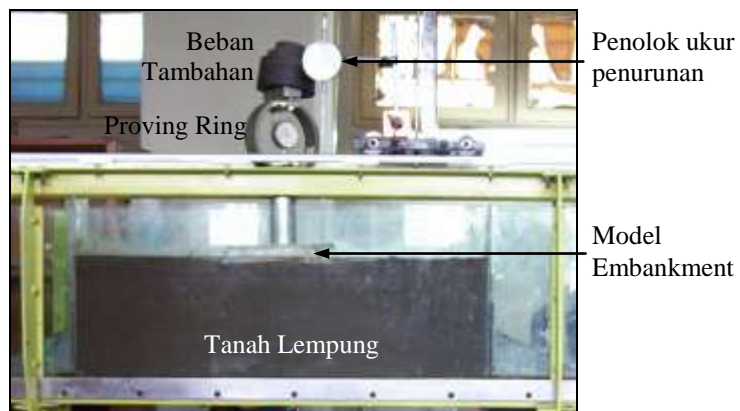
bagian atas diberikan tambahan beban. Penurunan akan diketahui dengan memasang *dial gauge indicator* dibagian atas embankment.

4. Analisis Data

Parameter pengujian yang akan diperoleh adalah penurunan embankment untuk berbagai ketebalan tanah, dan juga lama (waktu) yang diperlukan untuk mengakhiri penurunan. Dari data yang diperoleh, selanjutnya dibuat suatu analisis hubungan (*correlation analysis*) yang dapat disajikan dalam grafik hubungan antara : (1) penurunan dan ketebalan lapisan tanah lempung untuk masing-masing metode hitungan yang digunakan, (2) penurunan dan kemiringan embankment, (3) penurunan dan jumlah lapisan tanah lempung (untuk metode *sub-layers*), (4) perbandingan penurunan hasil analisis teoritis dan uji model.



(a)



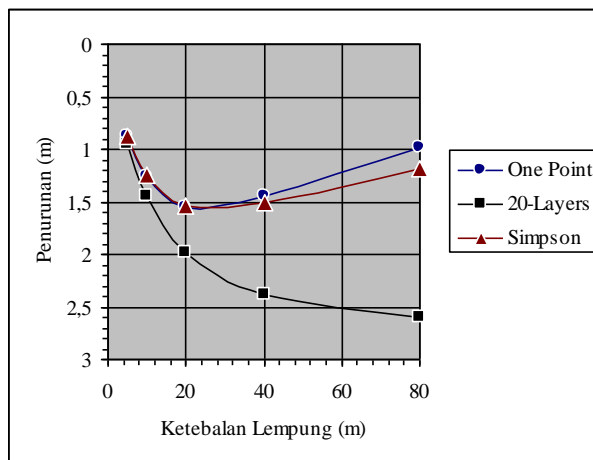
(b)

Gambar 3 Model 2D penurunan embankment (a) skema, (b) pengaturan model di laboratorium

HASIL UJI DAN PEMBAHASAN

1. Hubungan penurunan konsolidasi dengan ketebalan tanah lempung

Besarnya penurunan konsolidasi ditentukan oleh beberapa hal selain karakteristik tanahnya (ketebalan lapisan lempung), yaitu oleh karakteristik embankment seperti lebar bagian fondasi dan kemiringan lereng embankment. Gambar 4 menunjukkan hubungan antara penurunan dan ketebalan lempung dengan metode penghitungan penurunan konsolidasi yang berbeda.



Gambar 4 Perbandingan teori penurunan antara one-point, Simpson dan sub layer

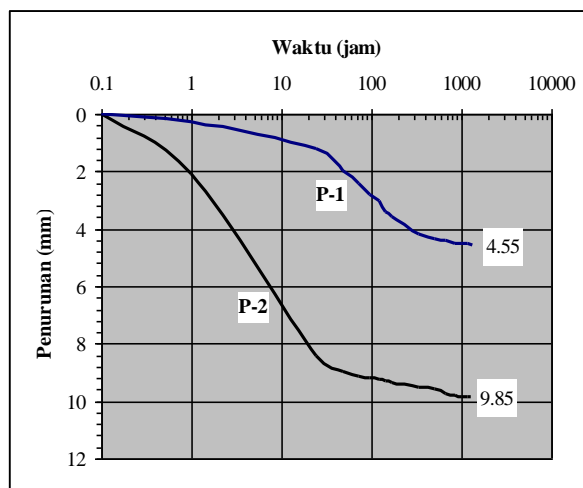
Mengacu pada hubungan pada Gambar 5 tersebut, besarnya penurunan konsolidasi untuk ketiga metode yang digunakan menggunakan metode *one-point*, *Simpson* dan *sub-layer* memberikan karakteristik yang berbeda. Secara teoritis menurut Persamaan (2) dan (3) atau (4), dapat dijelaskan bahwa penurunan konsolidasi akan semakin besar dengan bertambahnya ketebalan lapisan lempung sebagai akibat dari bertambahnya tegangan *overburden* (σ_o) tanah yang ada di atasnya (Cernica, 1997). Namun, penghitungan penurunan berdasarkan metode *one-point* dan aturan *Simpson* tidak sesuai dengan teori tersebut, dimana penurunan konsolidasi cenderung untuk berkurang mulai ketebalan lempung lebih dari 20 m seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Dengan demikian kedua metode tersebut tidak akurat bila digunakan untuk memperkirakan penurunan dengan ketebalan lempung lebih dari 20 m. Selain dapat pula diamati bahwa pada metode *one-point* dan *sub-layer*

untuk kondisi tanah lempung lunak menghasilkan perubahan penurunan konsolidasi yang relatif sama sampai pada ketebalan lapisan 10 m.

2. Karakteristik penurunan model embankment

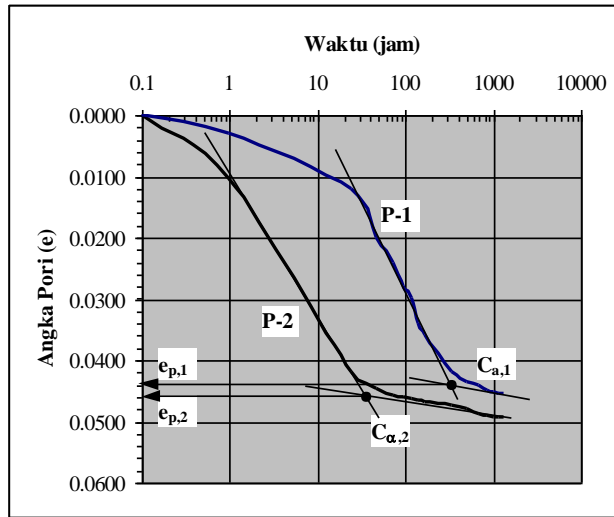
Berdasarkan hasil kajian analisis teoritis penurunan konsolidasi diketahui secara umum bahwa penambahan penurunan konsolidasi pada ketebalan lapisan lempung lebih dari 20 m adalah relatif kecil. Oleh karena itu, dalam uji model laboratorium digunakan dua variasi ketebalan lapisan lempung yaitu 20 m dan 10 m. Berhubung skala dalam uji model laboratorium adalah 1 : 100, maka tebal lapisan lempung yang diuji adalah 20 cm (P-2) dan 10 cm (P-1).

Hubungan antara waktu dan penurunan untuk kedua pengujian model tersebut ditunjukkan dalam Gambar 5. Pada pengujian model P-2 menunjukkan bahwa penurunan primer terjadi segera setelah beban diberikan dalam selang waktu 24 jam tetapi model P-1 dalam waktu 200 jam dan setelah itu terjadi penambahan penurunan (penurunan sekunder) relatif kecil sampai 1344 jam (56 minggu). Kecepatan penurunan primer dan sekunder dapat dihitung dari kurva dalam Gambar 7 berturut-turut adalah 3,3 mm/jam dan 0,3 mm/jam untuk model P-1, serta 5,0 mm/jam dan 0,7 mm/jam untuk model P-2.



Gambar 5 Hubungan antara waktu dengan penurunan untuk P-1 dan P-2.

Bila Gambar 5 dibuat ke dalam hubungan antar perubahan angka pori (Δe) dan waktu, akan diperoleh hubungan seperti pada Gambar 6 dan parameter penurunan seperti koefisien penurunan primer (C_p) dan koefisien penurunan sekunder ($C_{\alpha'}$) yang disajikan dalam Tabel 1.



Gambar 6 Hubungan perubahan angka pori dan waktu

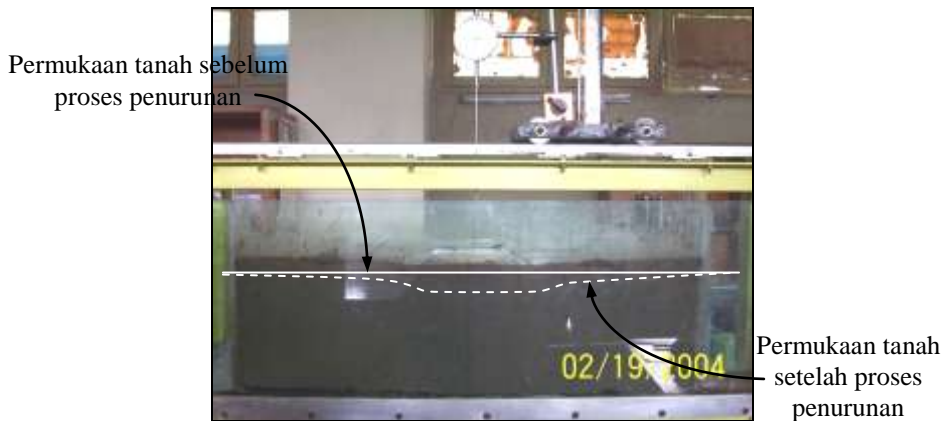
Tabel 1 Parameter penurunan konsolidasi

Parameter	Model P-1	Model P-2
C_p	0,0332	0,0251
C_a	0,0029	0,0036
e_p	0,0440	0,0480
C_{α}'	0,0027	0,0035

Keterangan : e_p = angka pori saat akhir penurunan primer,

$$C_{\alpha}' = C_{\alpha} / (1 + e_p)$$

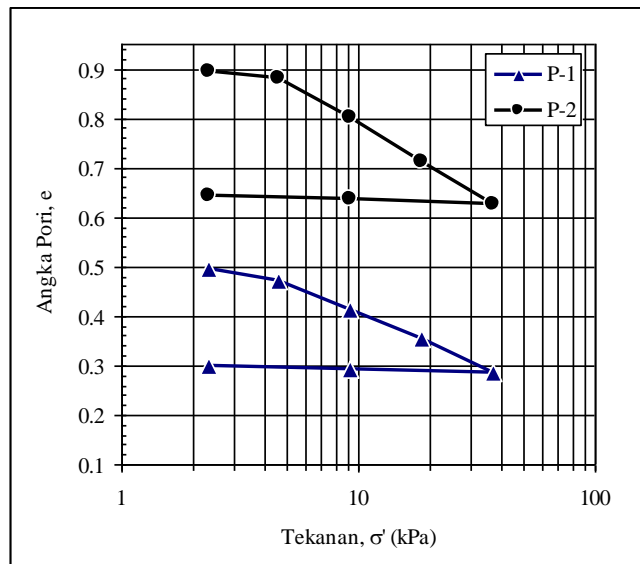
Gambar 7 menggambarkan kondisi penurunan embankment dan tanah setelah mengalami proses konsolidasi selama 1344 jam (56 minggu) untuk uji model P-2. Gambar tersebut menunjukkan bahwa selama pada akhir pengujian, permukaan tanah dibawah model embankment mengalami penurunan sedangkan permukaan tanah disamping model embankment mengalami kenaikan seperti ditunjukkan oleh garis putus-putus. Mengacu dari gambar tersebut, dapat diamati bahwa penurunan tanah dibawah embankment adalah sama sepanjang lebar bagian bawah model embankment. Hal ini adalah sesuai dengan anggapan yang digunakan bahwa konstruksi embankment adalah kaku (*rigid*). Dalam Zhang (1999), pola penurunan seperti ini terjadi nila embankment dibuat kaku atau lebar fondasi sangat kecil dibandingkan dengan lebar atau luas tanah lunaknya.



Gambar 7 Penurunan embankment P-2 setelah proses konsolidasi selama 56 minggu.

3. Karakteristik konsolidasi

Karakteristik konsolidasi dari kedua dalam uji model tersebut dapat ditunjukkan dengan grafik hubungan antara tekanan dan angka pori seperti disajikan dalam Gambar 8. Dari grafik hubungan $e-\log \sigma'$ di atas diperoleh nilai σ'_c , $\sigma'_{o'}$, C_c , C_r dan e_o yang besarnya dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 8 Karakteristik konsolidasi tanah lempung yang diuji pada model embankment

Tabel 2 Nilai σ'_c , σ'_o , C_c , C_r dan e_o

Model	σ'_c (kPa)	σ'_o (kPa)	C_c	$C_c'^{(*)}$	C_r	e_o
P-1	7,0	1,86	0,43	0,21	0,025	0,62
P-2	5,6	3,53	0,34	0,29	0,030	0,94

Catatan : $(^*) C_c'$ = indek pemampatan laboratorium, C_c = indek pemampatan, C_r = indek pengembangan, e_o = angka pori awal.

Dari Tabel 2 dan Gambar 8 di atas dapat diidentifikasi bahwa tanah lempung yang digunakan dalam model tergolong tanah lempung medium sampai dengan lunak yang mudah mengalami pemampatan (*compressible soils*). Secara umum, kedua tanah lempung pada uji model embankment memiliki sifat pemampatan yang sama, hal ini seperti ditunjukkan oleh perbedaan nilai koefisien pemampatan dan indek yang kecil untuk kedua tanah yang diuji (P-1 dan P-2). Tanah lempung yang diuji adalah tanah lempung *over-consolidated* (OC), dimana nilai tekanan prakonsolidasi (σ'_c) lebih besar dari nilai tekanan *overburden* (σ'_o) atau nilai dari *overconsolidation ratio* (OCR) >1 , yang artinya tekanan dahulunya lebih besar dari tekanan yang bekerja sekarang. Oleh karena itu, anggapan bahwa tanah lempung *normally consolidated* yang digunakan dalam analisis teoritis hitungan penurunan tidak sesuai dengan yang terjadi pada hasil uji model. Kondisi ini juga terjadi pada penelitian yang dilakukan oleh Budi dkk (2003) untuk fondasi persegi.

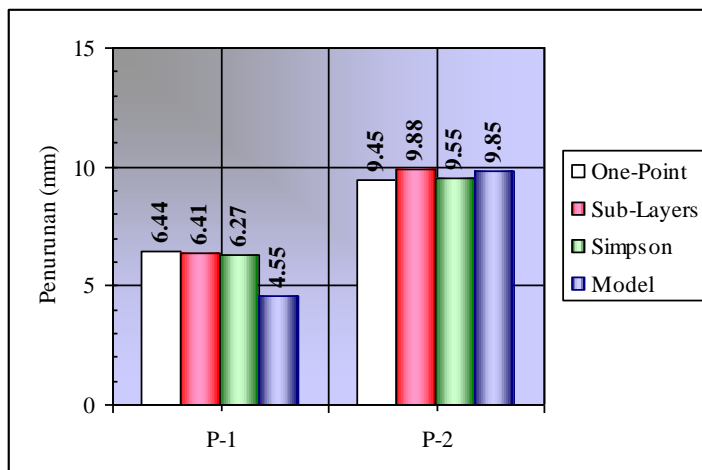
4. Penghitungan penurunan teoritis uji model embankment

Dari hasil pengujian di laboratorium diperoleh beberapa data yang digunakan untuk menghitung besarnya penurunan konsolidasi. Hasil perhitungannya penurunan dengan menggunakan metode *one-point*, aturan *simpson*, dan *sub-layers* diberikan dalam Tabel 3.

Tabel 3 Penurunan konsolidasi hasil penghitungan dan hasil pengujian model

Metode	Penurunan (mm)	
	P-1	P-2
One-Point	6,44	9,45
<i>Sub-Layer:</i>		
2 Lapisan	6,38	9,77
5 Lapisan	6,39	9,84
10 Lapisan	6,40	9,87
20 Lapisan	6,41	9,88
Simpson	6,27	9,55
Pengujian Model	4,55	9,85

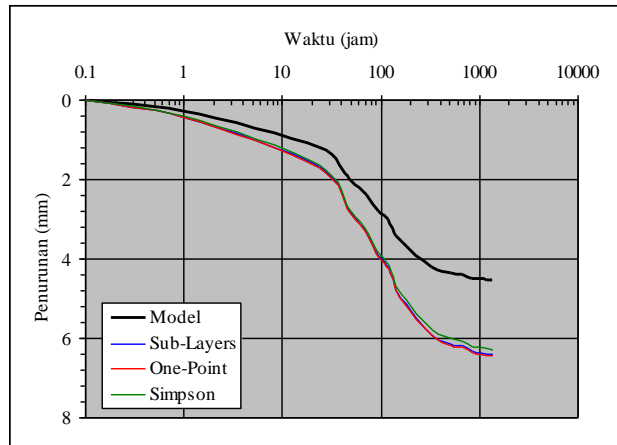
Gambar 9 memberikan perbandingan antara penurunan hasil penghitungan dengan ketiga metode yang telah disebutkan sebelumnya dan hasil uji model. Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa penurunan hasil penghitungan dengan metode *sub-layers* lebih mendekati dengan hasil uji model P-2 dengan selisih hasil (*deviasi*) 0,1% dan 0,3% terhadap hasil uji model masing-masing untuk 5 lapisan dan 20 lapisan. Untuk model dengan ketebalan lempung 10 cm (P-1) terjadi deviasi yang cukup besar berkisar 38% - 41% terhadap hasil uji model. Perilaku ini dimungkinkan dapat terjadi karena konsentrasi tegangan akibat beban embankment untuk kedalaman (z) yang kurang dari lebar beban terbagi rata yang bekerja di atas permukaan tanah. Alasan kedua yaitu dalam analisis teoritis lapisan tanah dianggap homogen dan isotropis yang elastis, namun jika dibandingkan dengan model P-2 maka model P-1 akan memiliki kekakuan yang lebih besar dan menghasilkan penurunan yang relative kecil. Seperti diuraikan oleh Budi dkk (2003) faktor skala ketebalan tanah lempung akan memberikan hasil yang kurang memuaskan bila kurang dari lebar fondasi. Hal serupa juga diamati oleh Chai dkk (2002). Dengan demikian, penurunan konsolidasi yang terjadi dari uji model lebih sesuai diperkirakan dengan menggunakan metode *sub-layers* dibandingkan dua metode lainnya.



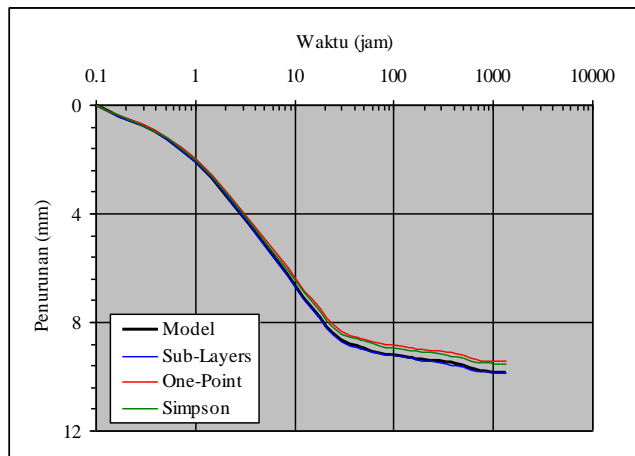
Gambar 9 Perbandingan penurunan konsolidasi antara perhitungan dengan pengujian

Mengulang kembali karakteristik penurunan dan waktu dalam Gambar 7, bila dianggap bahwa tanah dari uji model telah mengalami 100 %

proses konsolidasi selama waktu pengujian, maka dapat dibuat suatu perkiraan karakteristik penurunan menurut metode *one-point*, *sub-layers* dan *Simpson* seperti disajikan dalam Gambar 10. Gambar 10(a) di atas menunjukkan bahwa penurunan yang terjadi pada uji model laboratorium P-1 dimungkinkan belum mencapai penurunan sekunder yang mantap (*steady*). Hal ini dapat ditunjukkan dari perkiraan menggunakan ketiga metode analisis penurunan yaitu *one-point*, *sub-layers*, dan *Simpson*. Sedangkan untuk model P-2, penurunan yang terjadi relatif mendekati mantap, seperti ditunjukkan pada Gambar 10(b).



(a)



(b)

Gambar 10 Karakteristik penurunan embankment dari hasil uji model dan perkiraan (a) untuk model P-1 (b) untuk model P-2

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari pengujian dan analisis serta pembahasan penelitian dapat dituliskan sebagai kesimpulan sebagai berikut :

1. Semakin tebal lapisan tanah lempung akan menghasilkan penurunan konsolidasi yang semakin besar. Namun demikian, selisih penurunan untuk lapisan lempung yang lebih dari 20 m dengan 20 m memberikan hasil yang asymptot, yaitu 3% - 4%.
2. Pemakaian metode *one-point* dan aturan *1/6 Simpson* memberikan hasil penurunan konsolidasi yang tidak tepat untuk ketebalan lempung, $h \geq 20$ m. Namun sebaliknya, metode *Sub-layers* memberikan hasil yang lebih baik dan sesuai dengan teori distribusi tegangan dalam masa tanah.
3. Untuk metode penghitungan penurunan konsolidasi dengan *sub-layers*, pembagian lapisan tanah lempung sejumlah $n = 20$ bagian telah cukup untuk memberikan konvergensi hasil penurunan yang tetap.
4. Dari uji model embankment diperoleh bahwa secara umum bahwa untuk model dengan tebal lempung 10 cm dan 20 cm memiliki karakteristik penurunan konsolidasi yang sama. Karakteristik penurunan hasil uji model lebih sesuai dihitung dengan menggunakan metode *sub-layers* dengan tingkat kesalahan 0,1% - 0,3% terutama untuk lapisan tanah lempung lunak yang tebal [$h >$ lebar fondasi embankment (B_f)].

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Universitas Muhammadiyah Yogyakarta atas bantuan dana penelitian TA. 2003/2004. Terima kasih pula kepada Kepala Laboratorium Mekanika Tanah, Program Studi Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Yogyakarta atas pelaksanaan penelitian ini di laboratorium tersebut. Penelitian ini dibantu oleh seorang mahasiswa, Sdri. Istiqomah, untuk itu diucapkan pula terima kasih atas bantuannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Budhu, M., 2000, *Soil Mechanics and Foundation*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- Budi, G.S., Susanto, H., and Condro, S.R., 2003, Evaluasi Penurunan Tanah Liat Dengan Metode Sub-Layer, *Jurnal Dimensi Teknik Sipil*, Vol. 5 No. 1, 14-18.

- Cernica, J.N., 1997, *Geotechnical Engineering: Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- Chai, J.C., Miura, N., and Shen, S.L., 2002, Performance of embankments with and without reinforcement on soft subsoil, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 39, 838-848.
- Mc. Phail, J., Hellen, P., Britton, S., Colvin, C., Silvey, T., and Jones, J., 2000, Evaluation of Consolidation Settlement Using the Sub-Layer Method, *EJGE* Vol. 5-2000, Paper No. 0002. (www.ejge.com)
- Rahadian, H., Satriyo, B., and Prayoga, T., 2003, Settelement behaviour of a peat deposit subjected to embankment loading, *Proceeding of the 2nd International Conference on Advance Soft Soil Engineering & Technology*, 2-3 July 2003, Kuala Lumpur, Malaysia, 390-398.
- Terzaghi, K., and Peck, R., 1948, *Soil Mechanics in Engineering Practices*, John Wiley & Sons Inc., New York, USA.
- Zhang, L., 1999, Settlement pattern of soft soil foundations under embankments, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36, 774-781.