

STUDI POTENSI PENURUNAN KONSOLIDASI DI KALUKUBULA (Studi kasus: Perumahan Kelapa Mas Permai)

Benyamin Bontong *

Abstract

The consolidation settlement is one of the problems of soft soil layer area. The goal of this research is to analyze the potential of consolidation settlements at Kalukubula by using the Terzaghi's 1-D consolidation theory. This site has 16 meters in thickness of soft soil. The analysis result shows that the potential of total consolidation settlements to reach for 8 cms at the center of the site for the average loaded per unit area at the surface $q=0,5 \text{ kg/cm}^2$ and 24cms for $q=1 \text{ kg/cm}^2$. The 50% of average degree of consolidation reach after 11 years and 90% after 36 years.

Key word: Soft soil, settlement, degree of consolidation

Abstrak

Penurunan konsolidasi merupakan satu masalah pada lapisan tanah lunak. Penelitian ini hendak menganalisis potensi penurunan konsolidasi di Kalukubula dengan menggunakan teori konsolidasi 1-D dari Terzaghi. Lokasi ini memiliki lapisan lunak yang mencapai ketebalan 16 meter. Hasil penelitian menunjukkan bahwa potensi penurunan konsolidasi total mencapai 8 cm pada titik pusat areal, untuk beban merata di permukaan tanah sebesar $q=0,5 \text{ kg/cm}^2$ dan sebesar 24 cm untuk q sebesar 1 kg/cm^2 . Derajat konsolidasi rata-rata 50% tercapai dalam 11 tahun dan 90% setelah 36 tahun.

Kata kunci: tanah lunak, penurunan, derajat konsolidasi.

1. Pendahuluan

Perumahan Kelapa Mas Permai Kalukubula terletak di Kecamatan Dolo Kabupaten Donggala Provinsi Sulawesi Tengah, dengan jarak kira-kira 15 kilometer dari kota Palu. Lokasi ini sebelumnya merupakan areal persawahan tetapi sekarang ini kawasan tersebut dialihfungsikan menjadi lahan pengembangan permukiman/perumahan. Berdasarkan hasil investigasi lapangan, lokasi ini memiliki ketebalan tanah lunak sedalam 16 meter yang tersusun oleh dua jenis lapisan utama yaitu lapisan lempung dengan ketebalan 8,5 meter dan dibawahnya merupakan lapisan lanau berpasir halus dengan ketebalan 7,5 meter. Kondisi topografi lokasi ini relatif datar dan pada musim penghujan, ada

peluang untuk tergenang air hujan. Muka air tanah pada saat pengujian lapangan dilaksanakan terletak sangat dangkal yaitu pada peil -0,30m di bawah permukaan tanah setempat. Berdasarkan kondisi tersebut, lokasi ini memiliki potensi untuk mengalami penurunan konsolidasi setelah beralih fungsi dari lahan persawahan menjadi lahan perumahan akibat adanya tambahan pembebanan di atasnya. Oleh karena itu penting untuk diketahui seberapa besar potensi penurunan yang akan terjadi dan berapa lama proses penurunan tersebut akan berlangsung.

2. Tinjauan Pustaka

Apabila suatu struktur dibangun diatas tanah, akan menimbulkan

* Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tadulako, Palu

deformasi pada tanah berupa penurunan. Pada tanah pasir, penurunan yang terjadi secara praktis merupakan fungsi beban saja. Lain halnya dengan tanah lempung, masalahnya lebih rumit oleh karena penurunan yang terjadi disamping merupakan fungsi beban, juga merupakan fungsi waktu (*stress-strain-time dependent*). Hal ini disebabkan oleh karena lempung memiliki daya rembes yang sangat kecil sehingga sewaktu massa tanah lempung jenuh air dibebani, air akan terperas keluar secara lambat laun sambil diikuti oleh penurunan atau deformasi. Proses ini disebut *konsolidasi*. Besarnya deformasi yang terjadi bergantung pada besarnya beban dan lamanya proses pemampatan berlangsung. Bila suatu massa tanah yang luas menerima beban vertikal merata, deformasi dianggap terjadi dalam arah vertikal saja, dan dikenal sebagai konsolidasi satu dimensi. Uji konsolidasi satu dimensi di laboratorium diperkenalkan oleh Karl Terzaghi (Das, 1983) yang mensimulasikan deformasi satu arah dengan menggunakan alat odometer. Prinsip kerja odometer adalah seperti pada Gambar 1.

Pembebanan diberikan secara bertahap dengan rasio tambahan beban terhadap beban sebelumnya = 1 ($\Delta p/p=1$). Kalau tekanan akibat beban awal = p maka pembebanan (*loading*) berturut-turut = $p, 2p, 4p, 8p, 16p, 32p$ kemudian beban dikurangi (*unloading*) menjadi $8p, 2p, 0$. Setiap tahap pembebanan diamati hubungan penurunan terhadap waktu, selama 24 jam untuk sel konsolidasi standar ASTM D2435. Pada akhir setiap tahap dihitung angka pori. Hasil pengukuran dibuat dalam bentuk kurva seperti pada Gambar 2.

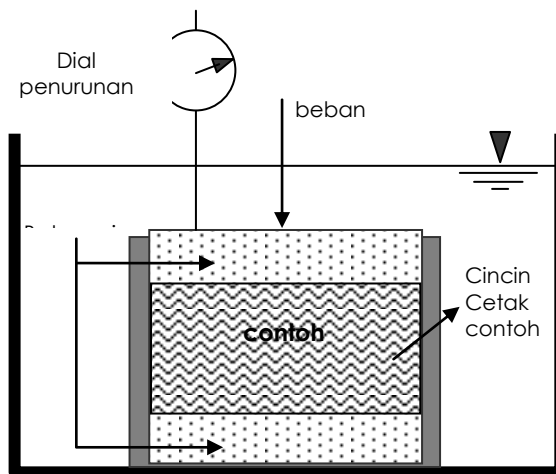
Dari gambar 2. dihitung parameter konsolidasi sebagai berikut :

Indeks kompresi C_c (gradien kurva kompresi asli):

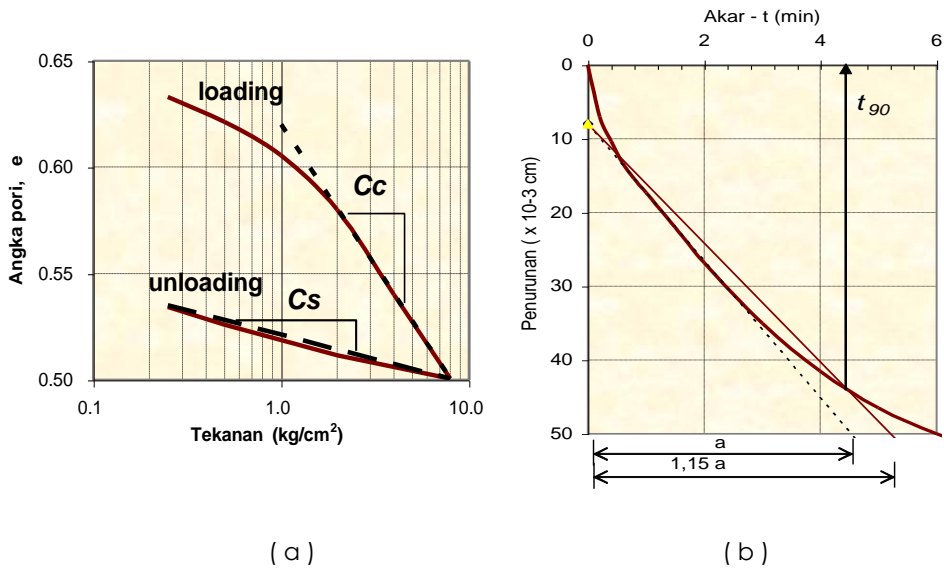
$$c_c = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{p + \Delta p}{p}\right)} \dots\dots\dots(1)$$

Indeks *swelling* C_s (gradien kurva rebound):

$$c_s = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{p + \Delta p}{p}\right)} \dots\dots\dots(2)$$



Gambar 1. Sel konsolidasi (mengukur hubungan $\sigma - \epsilon - t$)



Gambar 2. Kurva Uji Konsolidasi.
 (a) Kurva Tekanan Konsolidasi vs. Angka Pori
 (b) Kurva Penurunan vs. Akar Waktu

Penurunan total konsolidasi (S) dihitung sebagai berikut :

- Untuk lempung NC:

$$S = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_o} \log \left(\frac{p_o + \Delta p}{p_o} \right) \dots\dots\dots(3)$$

- Untuk lempung OC :

Bila $p_c \geq p_o + \Delta p$

$$S = \frac{C_s \cdot H}{1 + e_o} \log \left(\frac{p_o + \Delta p}{p_o} \right)$$

Bila $p_c \leq p_o + \Delta p$

$$S = \frac{C_s \cdot H}{1 + e_o} \log \left(\frac{p_c}{p_o} \right) + \frac{C_c \cdot H}{1 + e_o} \log \left(\frac{p_o + \Delta p}{p_c} \right) \dots\dots\dots(4)$$

Persamaan konsolidasi 1-D Terzaghi dinyatakan dalam hubungan berikut

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots(5)$$

Koefisien konsolidasi C_v :

$$c_v = \frac{T_v \cdot H_{dr}^2}{t} \rightarrow c_v = \frac{0.848 \times H_{dr}^2}{t_{90}}$$

Solusi numerik persamaan Terzaghi dengan metode beda hingga (Al-Khafaji, dan Tooley, 1986) sbb:

$$u'_{o,t'+\Delta t'} = \frac{\Delta t'}{\Delta z'^2} (u'_{1,t'} + u'_{3,t'} - 2u'_{o,t'}) + u'_{o,t'} \dots\dots\dots(6)$$

$$u'_{o,t'+\Delta t'} = \frac{\Delta t'}{\Delta z'^2} (u'_{1,t'} + u'_{3,t'} - 2u'_{o,t'}) + u'_{o,t'} \dots\dots\dots(7)$$

Khuisus untuk titik yang terletak pada perbatasan (*interface*) dua lapisan yang berbeda, digunakan persamaan:

$$u'_{o,t+\Delta t'} = \frac{\Delta t'}{\Delta z'^2} \left(\frac{1+k_2/k_1}{1+(k_2/k_1)/(cv_1/cv_2)} \right) \left(\frac{2k_1}{k_1+k_2} u'_{1,t'} + \frac{2k_2}{k_1+k_2} u'_{3,t'} - 2u'_{o,t'} \right) + u'_{o,t'} \dots (8)$$

3. Metode Peneelitan

3.1 Pengambilan contoh penelitian

Lokasi pengambilan contoh lapisan tanah di Kompleks Perumahan Kelapa Mas Permai, Kalukubula Kecamatan Dolo Kabupaten Donggala, kira-kira 15 km dari kota Palu. Pengujian lapangan yang dilakukan adalah pemboran mesin dengan kedalaman total mencapai 17 meter.

3.2 Metode analisis

Pengujian laboratorium dilakukan pada 11 contoh tanah yang diambil dari lubang bor dengan tanda pengenal berdasarkan urutan kedalaman dari sampel nomor S1 sampai dengan S11. Pengujian laboratorium meliputi uji sifat fisik dan indeks tanah serta uji karakteristik konsolidasi 1-D. Pembebanan untuk uji konsolidasi

diambil $p = 0,25 \text{ kg/cm}^2$ dan rasio beban $\Delta p/p = 1$.

3.3 Metode analisis

Perhitungan penurunan konsolidasi dilakukan dengan cara manual oleh karena sifatnya masi sederhana. Perhitungan dissipasi tekanan air pori serta analisis hubungan regangan-waktu dilakukan dengan bantuan program komputer yang dibuat khusus untuk tujuan ini.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil Uji Laboratorium

Hasil uji sifat fisik tanah dan Indeks tanah dan uji konsolidasi ditabelkan pada tabel 1. dan tabel 2.

Tabel 1. Hasil uji sifat fisik dan indeks tanah

Para-meter	No-tasi	Satuan	Nomor Contoh										
			S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9	S-10	S-11
Berat isi	γ_{sat}	gm/cm ³	1.79	1.84	1.78	1.91	1.90	1.97	2.02	2.03	2.03	2.04	2.04
Berat isi kering	γ_d	gm/cm ³	1.27	1.34	1.25	1.47	1.47	1.55	1.62	1.62	1.61	1.62	1.63
Kadar air asli	w_n	%	40.5	36.9	41.9	29.9	29.4	26.7	24.4	25.1	25.6	25.8	24.7
Berat Jenis	Gs		2.59	2.62	2.58	2.59	2.59	2.60	2.69	2.72	2.71	2.71	2.72
Angka Pori	e		1.04	0.95	1.07	0.76	0.78	0.68	0.66	0.68	0.67	0.67	0.67
Batas Cair	LL	%	54.0	52.0	52.3	50.2	50.0	50.8	48.2	35.0	35.9	36.0	35.7
Indeks Plastisitas	PI	%	26.0	24.5	25.1	22.9	22.5	23.0	17.5	5.5	7.1	7.0	6.3
Klasifikasi USCS			CH	CH	CH	CH	CH	CH	ML	ML	ML	ML	ML

Tabel 2. Hasil Uji Karakteristik Konsolidasi

No. Sampel	Kedalaman Sampel (m)		Kedalaman yg Diwakili (m)			Cc	Cs	Pc (kg/cm ²)
S ₁	1.00	s/d 1.40	0.30	S/d 1.50	0.338	0.052	0.92	
S ₂	2.00	s/d 2.40	1.50	S/d 2.50	0.224	0.026	1.00	
S ₃	3.00	s/d 3.40	2.50	S/d 4.00	0.308	0.047	1.10	
S ₄	4.50	s/d 4.90	4.00	S/d 5.50	0.205	0.021	1.15	
S ₅	6.00	s/d 6.40	5.50	S/d 7.00	0.227	0.025	1.20	
S ₆	7.50	s/d 7.90	7.00	S/d 8.50	0.154	0.020	1.25	
S ₇	9.00	s/d 9.40	8.50	S/d 10.00	0.132	0.023	1.40	
S ₈	10.50	s/d 10.90	10.00	S/d 11.50	0.137	0.013	1.55	
S ₉	12.00	s/d 12.40	11.50	S/d 13.00	0.127	0.017	1.70	
S ₁₀	13.50	s/d 13.90	13.00	S/d 14.50	0.123	0.016	1.85	
S ₁₁	15.00	s/d 15.40	14.50	S/d 16.00	0.114	0.016	2.00	

Tabel 3. Tegangan Overburden dan OCR

No. Sampel	Berat Isi (gr/cm ³)	angka pori e _o	Tebal, h (m)	$\gamma' \times h$ (kg/cm ²)	Po (kg/cm ²)	Pc (kg/cm ²)	OCR
Top Soil	$\gamma = 1.5$	-	0.3	0.045	0.023		
S-1	$\gamma_{sat} = 1.79$	1.042	1.20	0.095	0.092	0.92	9.96
S-2	$\gamma_{sat} = 1.84$	0.955	1.00	0.084	0.182	1.00	5.50
S-3	$\gamma_{sat} = 1.78$	1.065	1.50	0.117	0.282	1.10	3.90
S-4	$\gamma_{sat} = 1.91$	0.758	1.50	0.137	0.409	1.15	2.81
S-5	$\gamma_{sat} = 1.90$	0.775	1.50	0.135	0.545	1.20	2.20
S-6	$\gamma_{sat} = 1.97$	0.807	1.50	0.146	0.685	1.25	1.83
S-7	$\gamma_{sat} = 2.02$	0.658	1.50	0.153	0.834	1.40	1.68
S-8	$\gamma_{sat} = 2.03$	0.681	1.50	0.155	0.988	1.55	1.57
S-9	$\gamma_{sat} = 2.03$	0.668	1.50	0.154	1.142	1.70	1.49
S-10	$\gamma_{sat} = 2.04$	0.667	1.50	0.157	1.298	1.85	1.43
S-11	$\gamma_{sat} = 2.04$	0.669	1.50	0.156	1.454	2.00	1.38

4.2 Analisis besaran konsolidasi

Berdasarkan data hasil uji di atas, selanjutnya dihitung besaran-besaran angka pori, tekanan overburden, tekanan prakonsolidasi dan OCR. Hasilnya ditabelkan dalam tabel 3.

Analisis hubungan regangan terhadap waktu meliputi parameter m_v , t_{90} , c_v dan k dilakukan berdasarkan

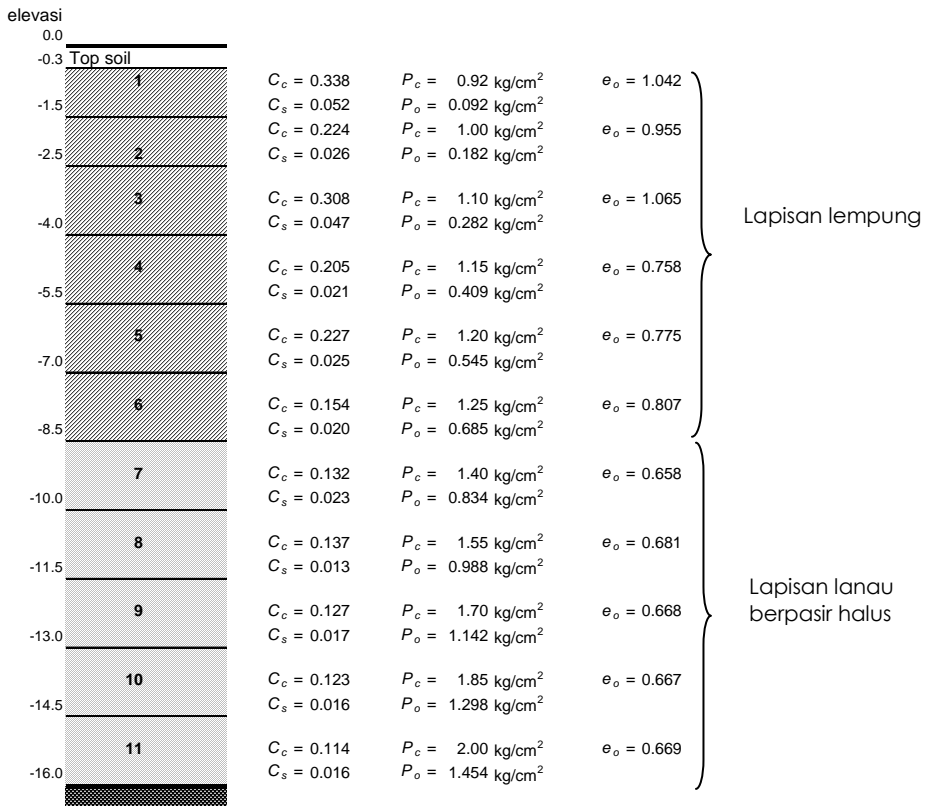
kurva hubungan penurunan terhadap akar t Hasilnya diperlihatkan pada tabel 4.

4.3 Analisis dan Pembahasan Potensi Penurunan

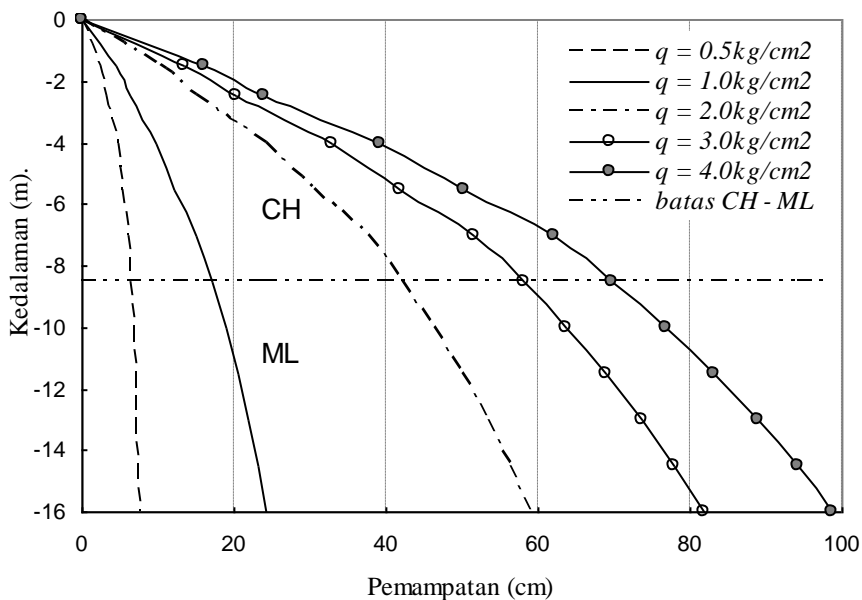
Profil lapisan tanah dan parameter pemampatannya seperti diperlihatkan pada gambar 3.

Tabel 4. Nilai Rata-rata Parameter m_v , t_{90} , c_v dan k

No. Contoh	m_v (cm^2/kg)	t_{90} (det)	Cv		k	
			(cm^2/det)	(m^2/hari)	(cm/det)	(m/hari)
S ₁	3.03E-02	1.07E+03	8.21E-04	7.09E-03	2.40E-08	2.08E-05
S ₂	3.40E-02	6.86E+02	1.15E-03	9.92E-03	3.93E-08	3.39E-05
S ₃	3.84E-02	9.35E+02	8.24E-04	7.12E-03	3.47E-08	2.99E-05
S ₄	3.37E-02	1.61E+02	4.77E-03	4.12E-02	1.66E-07	1.43E-04
S ₅	3.99E-02	5.33E+02	1.53E-03	1.32E-02	7.35E-08	6.35E-05
S ₆	1.74E-02	8.93E+01	1.08E-02	9.33E-02	1.78E-07	1.54E-04
S ₇	2.43E-02	3.23E+01	2.49E-02	2.15E-01	6.66E-07	5.75E-04
S ₈	3.22E-02	2.00E+01	4.38E-02	3.79E-01	1.66E-06	1.43E-03
S ₉	2.82E-02	2.00E+01	4.37E-02	3.78E-01	1.45E-06	1.25E-03
S ₁₀	3.98E-02	2.11E+01	3.96E-02	3.42E-01	1.68E-06	1.45E-03
S ₁₁	3.36E-02	2.00E+01	4.31E-02	3.72E-01	1.73E-06	1.50E-03



Gambar 3. Profil lapisan tanah dan parameternya.



Gambar 4. Potensi penurunan konsolidasi

Untuk lokasi perumahan Kelapa Mas Permai di Kalukubula, geometri penempatan rumah terdistribusi secara teratur sehingga pembebanan di atas areal dapat dianggap merata di atas lokasi yang relatif luas dibandingkan dengan kedalaman tanah lunak. Potensi penurunan didasarkan atas anggapan tersebut. Kalau rata-rata beban bangunan yang bekerja dimisalkan sebesar $q \text{ kg/cm}^2$, maka tambahan tekanan $\Delta P = q$. Hasil analisis potensi penurunan diperlihatkan pada Gambar 4.

Dari Gambar 4 di atas untuk beban q sebesar 1 kg/cm^2 , penurunan total yang akan terjadi sekitar 24 cm. Beban ini kurang lebih setara dengan bangunan 3 sampai 4 lantai. Untuk bangunan 1 – 2 lantai, beban q mungkin tidak lebih dari $0,5 \text{ kg/cm}^2$, dan untuk kondisi ini, dari gambar 4 dapat dilihat penurunan total tidak lebih dari 8 cm. Dari uraian ini terlihat bahwa potensi penurunan pada kompleks perumahan Kelapa Mas Permai relatif cukup besar. Kalau penurunan terjadi secara merata, tidak akan


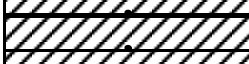
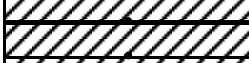
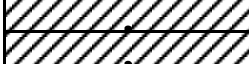
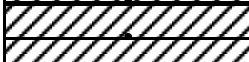
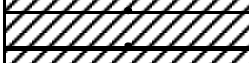
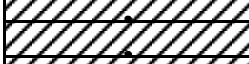

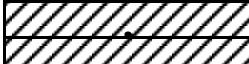



mendatangkan masalah struktural pada bangunan. Akan tetapi jika terdapat perbedaan tekanan elemen struktur yang berinteraksi dengan tanah, ditambah dengan kemungkinan sifat tanah yang tidak homogen, kondisi ini dapat menyebabkan penurunan yang tidak merata pada elemen struktur bangunan. Dampaknya bisa menimbulkan keretakan dalam elemen struktur.

4.4. Analisa hubungan Regangan – Waktu

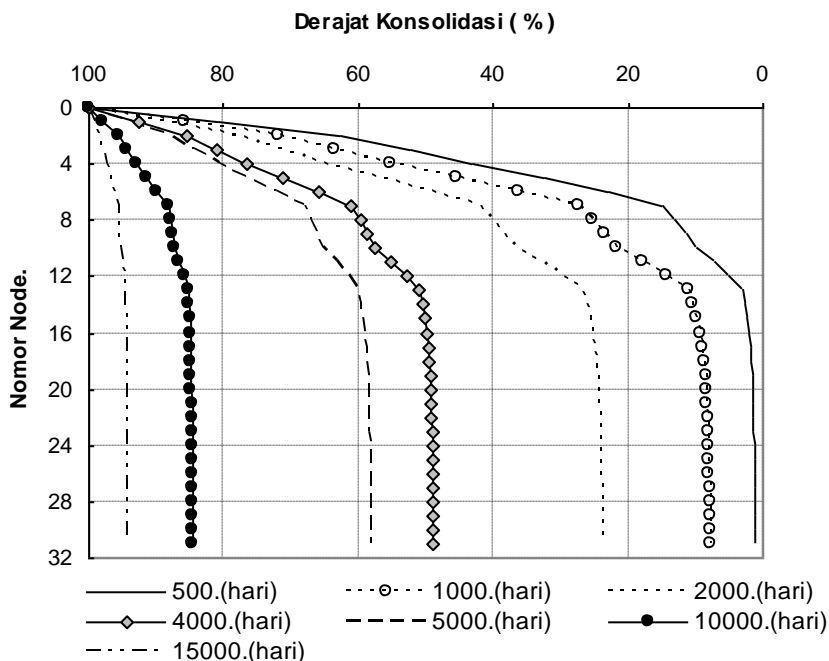
Untuk menganalisis hubungan antara dissipasi tekanan air pori berlebih dengan waktu, diaplikasikan metode numerik beda hingga. Lapisan tanah dimodelkan seperti pada Gambar 5. Lapisan tanah dibagi menjadi 31 elemen dengan ketebalan setiap elemen diambil $0,50 \text{ meter}$ kecuali pada lapisan nomor 1 diambil ketebalan elemen $0,60 \text{ meter}$. Jumlah *node* sebanyak 32. Parameter C_v dan k diambil pada rentang ΔP 1 sampai dengan 2 kg/cm^2 . Dari hasil perhitungan diperoleh derajat

konsolidasi untuk waktu-waktu tertentu. Hasilnya diperlihatkan pada gambar 6. Dari hasil analisis pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa derajat konsolidasi rata-rata di pertengahan lapisan sebesar

sekitar 50% akan tercapai dalam waktu sekitar 4.000 hari atau ± 11 tahun dan konsolidasi rata-rata 90% akan tercapai sekitar 13.000 hari atau ± 36 tahun.

elemen per lapis	No Lapis	Profil	Peil (m)	No. Urut Node	No. Node per lapis	$C_v (m^2/hari)$ $k (m/hari)$
2	1		-0.3	0	1	5.8178E-03
			-1.5	1	2	2.1995E-05
2	2		-2.5	2	1	1.2326E-02
			-4.0	3	2	3.5502E-05
3	3		-5.5	4	1	7.8645E-03
			-7.0	5	2	2.7830E-05
3	4		-8.5	6	3	3.8308E-02
			-10.0	7	1	1.0978E-04
3	5		-11.5	8	2	1.4399E-02
			-13.0	9	3	4.8342E-05
3	6		-14.5	10	1	1.2273E-01
			-16.0	11	2	2.4531E-04
3	7		-17.5	12	3	2.3299E-01
			-19.0	13	1	4.1334E-04
3	8		-20.5	14	2	4.5262E-01
			-22.0	15	3	9.9980E-04
3	9		-23.5	16	1	4.4960E-01
			-25.0	17	2	1.0435E-03
3	10		-26.5	18	3	4.3451E-01
			-28.0	19	1	9.6941E-04
3	11		-29.5	20	2	4.4141E-01
			-31.0	21	3	9.9986E-04
			-31.0	22	4	

Gambar 5. Pemodelan tanah untuk analisis numerik beda hingga



Gambar 6. Kurva derajat konsolidasi untuk waktu-waktu tertentu, dengan $q = 1 \text{ kg/cm}^2$

Dalam selang waktu 2000 hari (± 6 tahun), derajat konsolidasi yang tercapai kurang dari 25%. Selama rentang waktu ini, penurunan konsolidasi belum banyak terjadi dan sekalipun terdapat perbedaan tekanan pada bagian elemen struktur yang berinteraksi dengan tanah, serta mungkin sifat tanah pendukungnya tidak homogen, kemungkinan besar bangunan belum mengalami permasalahan. Namun untuk kestabilan jangka panjang, sebaiknya diperhatikan potensi penurunan dalam merancang bangunan di sekitar daerah ini.

5. Kesimpulan

Dari pembahasan hasil penelitian di atas, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Kedalaman total lapisan tanah lunak di Kompleks Perumahan Kelapa Mas Permai Kalukubula mencapai 16 meter. Kedalaman sampai dengan -8,5m tergolong lempung plastisitas

tinggi (CH) dan kedalaman 8,5 sampai. 16m merupakan jenis lanau berpasir halus plastisitas rendah (ML).

- 2) Potensi penurunan konsolidasi untuk pembebanan merata di permukaan $q = 0,5 \text{ kg/cm}^2$ mencapai 8 cm dan untuk beban $q=1 \text{ kg/cm}^2$ mencapai 24cm. Nilai ini tergolong relatif cukup besar (Untuk keamanan struktur, penurunan biasanya dibatasi tidak lebih dari 25 mm).
- 3) Derajat konsolidasi rata-rata pada pertengahan lapisan sebesar $U=50\%$ akan tercapai dalam waktu sekitar 4.000 hari atau 11 tahun dan $U=90\%$ akan tercapai dalam kurun waktu sekitar 13.000 hari atau ± 36 tahun.
- 4) Dalam selang waktu 2000 hari (± 6 tahun), derajat konsolidasi yang tercapai kurang dari 25%.

6. Daftar Pustaka

- Al-Khafaji, A.W., dan Tooley, J.R., 1986, "Numerical Methods in

Engineering Practice", Holt,
Rinehart and Winston, INC.

Bowles, J.E., 1984, "*Physical and Geotechnical Properties of Soil*", McGraw-Hill, International Edition.

Bowles, J.E., 1988, "*Engineering Properties of Soil and Their Measurement*", McGraw-Hill, International Edition.

Das, Braja M., 1983, "*Advanced Soil Mechanics*", McGraw-Hill, International Edition.

Head, K.H., 1986, "*Manual of Soil Laboratory Testing Vol. 2,3*", ELE International Limited, Pentech Press, London

Holtz, R.D., and Kovacs, W.D., 1981, "*An Introduction to Geotechnical Engineering*", Prentice Hall Inc.