

PENURUNAN KONSOLIDASI PONDASI TELAPAK PADA TANAH LEMPUNG MENGANDUNG AIR LIMBAH INDUSTRI

Roski R.I. Legrans

ABSTRAK

Efek samping dari produk yang dihasilkan suatu industri adalah limbah industri. Dalam bidang teknik sipil, limbah cair yang mengandung sejumlah zat kimia yang masuk ke dalam tanah dapat memberikan pengaruh terhadap kemampumampatan/kompresibilitas tanah yang pada akhirnya berpengaruh terhadap besarnya penurunan yang terjadi. Dengan menggunakan hasil penelitian yang memanfaatkan air limbah industri dalam pengujian konsolidasi di laboratorium, dilakukan perhitungan penurunan konsolidasi pada pondasi telapak. Perhitungan penurunan konsolidasi menggunakan persamaan penurunan konsolidasi pada tanah lempung terkonsolidasi normal. Perhitungan pertambahan tegangan pada lapisan tanah lempung jenuh di bawah pondasi telapak menggunakan metode 2:1. Dari hasil perhitungan disimpulkan bahwa semakin bertambah prosentase kandungan air limbah semakin besar penurunan konsolidasi yang terjadi, dimana nilai maksimumnya mendekati nilai maksimum penurunan yang disyaratkan. Prosentase kandungan air limbah 25 % menghasilkan penurunan konsolidasi sebesar 11,8 % lebih kecil dari penurunan konsolidasi pada tanah asli.

Kata kunci : *penurunan konsolidasi, limbah industri, pondasi telapak, lempung jenuh*

1. PENDAHULUAN

Pondasi telapak adalah salah satu jenis konstruksi pondasi dangkal yang digunakan dalam pekerjaan teknik sipil. Berfungsi sebagai konstruksi yang memikul beban dari struktur bangunan atas, pondasi telapak harus memenuhi persyaratan : 1.) aman terhadap terjadinya keruntuhan geser pada tanah yang mendukung pondasi, dan 2.) tidak mengalami penurunan yang berlebihan yang dapat menyebabkan struktur bangunan atas menjadi labil. Untuk persyaratan pertama berhubungan dengan daya dukung batas tanah (*ultimate bearing capacity*) dan daya dukung izin tanah (*allowable bearing capacity*). Sementara untuk persyaratan yang kedua berhubungan daya rembesan air tanah (*permeability*) dan kemampumampatan tanah (*compressibility*).

Perkembangan industri yang pesat saat ini menghasilkan limbah yang merupakan efek samping dari produk suatu industri. Limbah industri yang berwujud cair yang meresap ke dalam tanah dapat memberikan manfaat tetapi dapat pula memberikan kerugian seperti pencemaran air tanah. Dalam bidang teknik sipil, limbah cair yang mengandung sejumlah zat kimia yang masuk ke dalam tanah bisa mengubah struktur tanah asli menjadi lebih baik yang berarti bisa meningkatkan daya dukung tanah terhadap pembebanan suatu

struktur bangunan ataupun bisa juga memberikan nilai yang sebaliknya.

Selain daya dukung tanah, air limbah industri dapat memberikan pengaruh terhadap kemampumampatan/kompresibilitas tanah yang pada akhirnya berpengaruh terhadap besarnya penurunan yang terjadi, khususnya penurunan konsolidasi yang berlangsung dalam suatu periode waktu tertentu. Pengaruh air limbah industri terhadap parameter konsolidasi yang digunakan dalam perhitungan penurunan konsolidasi pada pondasi telapak akan dibahas dalam tulisan ini.

2. TEORI KONSOLIDASI

Akibat adanya pembebanan (Δp) pada lapisan tanah lempung jenuh menyebabkan bertambahnya tegangan ($\Delta \sigma$) pada tanah yang diikuti dengan meningkatnya tekanan air pori (*pore water pressure*). Nilai koefisien permeabilitas pada tanah lempung yang kecil menyebabkan tekanan air pori berdisipasi dalam waktu yang lama, dan secara perlahan pertambahan tegangan mulai dipikul seluruhnya oleh partikel tanah (σ).

Jika ada beban tambahan (*surchage*) pada permukaan tanah maka akan menyebabkan meningkatnya tegangan total pada lapisan tanah lempung sehingga : $\Delta \sigma = \Delta p$. Pada waktu $t = 0$, yakni saat tegangan mulai bekerja, kelebihan tekanan air

pori (Δu) pada setiap kedalaman (h_i) pada lapisan tanah lempung akan menjadi sama dengan beban tambahan (*surchage*) sehingga : $\Delta u = \Delta h_i \cdot \gamma_w = \Delta p$. Dengan demikian pertambahan tegangan efektif pada waktu $t = 0$ adalah : $\Delta \sigma' = \Delta \sigma - \Delta u$. Secara teoritis, saat tekanan air pori telah terdisipasi seluruhnya pada lapisan lempung yakni pada $t = \infty$, $\Delta u = 0$ sehingga $\Delta \sigma' = \Delta \sigma - \Delta u = \Delta p - 0 = \Delta p$. Meningkatnya nilai tegangan efektif secara bertahap pada lapisan lempung menyebabkan terjadinya penurunan secara bertahap dalam suatu periode waktu, proses ini dinamakan konsolidasi.

Pemeriksaan konsolidasi di laboratorium dimaksudkan untuk menentukan sifat pemampatan suatu macam tanah yang diakibatkan adanya tekanan vertikal. Sifat ini berupa perubahan bentuk dan keluarnya air dalam pori tanah. Parameter-parameter yang diperiksa dalam percobaan konsolidasi adalah besarnya penurunan yang terjadi sesudah pembebanan atau penurunan konsolidasi, yang berhubungan dengan indeks pemampatan (C_c) dan berapa lama waktu penurunan konsolidasi terjadi, yang berhubungan dengan koefisien konsolidasi (C_v).

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log \frac{p_2}{p_1}}$$

$$c_v = \frac{0.848 \cdot d^2}{t_{90}}$$

Keterangan : C_c = indeks pemampatan; c_v = koefisien konsolidasi; Δe = perubahan angka pori ($e_1 - e_2$); e_1, e_2 = angka pori yang didapat pada grafik semi-log; p_1, p_2 = tekanan yang didapat pada grafik semi-log; $d = \frac{1}{2} \cdot H = \frac{1}{2}$ tinggi benda uji; t_{90} = waktu yang diperlukan untuk konsolidasi 90 %.

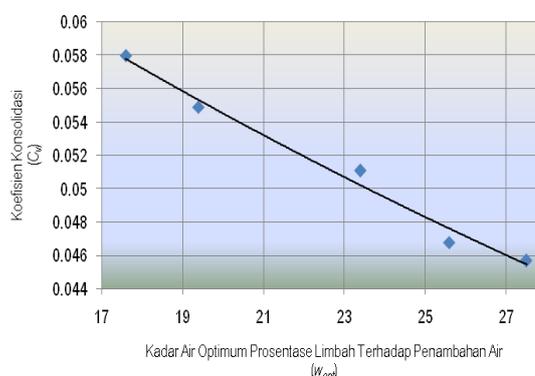
3. HASIL PENGUJIAN LABORATORIUM TERHADAP TANAH MENGANDUNG AIR LIMBAH INDUSTRI

Rompis (2002) melakukan penelitian dengan melakukan pengujian konsolidasi pada tanah yang mengandung air limbah industri dengan perlakuan yakni sampel yang digunakan pada pengujian konsolidasi diambil dari hasil pemadatan dengan menggunakan kadar air optimum dari prosentase campuran limbah terhadap air untuk masing-masing prosentase 0 %, 25 %, 50 %, 75 % dan 100 %. Limbah yang digunakan berupa limbah cair

buangan industri pengalengan ikan PT Sinar Pure Food International. Zat-zat kimia yang terkandung dalam limbah tidak diperiksa secara spesifik untuk mengetahui zat mana yang dapat memberikan pengaruh terhadap tanah.

Prosentase Limbah Terhadap Penambahan Air	Kadar Air Optimum Prosentase Limbah Terhadap Penambahan Air (w_{opt})	Koefisien Konsolidasi (c_v)
%	%	cm ² /det
0	17,60	0,0580
25	19,40	0,0549
50	23,40	0,0511
75	25,60	0,0468
100	27,50	0,0457

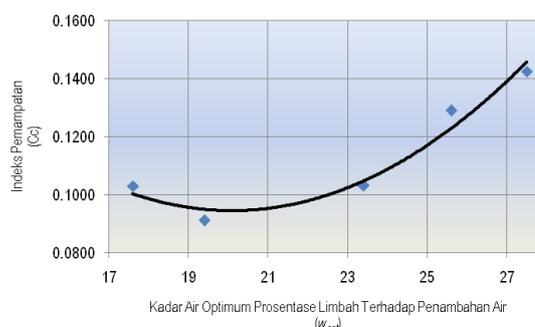
Tabel 1. Kadar Optimum Prosentase Limbah Terhadap Penambahan Air dan Koefisien Konsolidasi



Gbr 1. Grafik Hubungan Kadar Optimum Prosentase Limbah Terhadap Penambahan Air dengan Koefisien Konsolidasi

Prosentase Limbah Terhadap Penambahan Air	Kadar Air Optimum Prosentase Limbah Terhadap Penambahan Air (w_{opt})	Indeks Pemampatan (C_c)
%	%	
0	17,60	0,1030
25	19,40	0,0912
50	23,40	0,1032
75	25,60	0,1291
100	27,50	0,1426

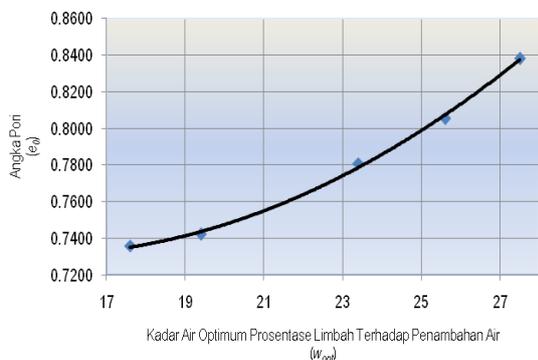
Tabel 2. Kadar Optimum Prosentase Limbah Terhadap Penambahan Air dan Indeks Pemampatan



Gbr 2. Grafik Hubungan Kadar Optimum Prosentase Limbah Terhadap Penambahan Air dengan Indeks Pemampatan

Prosentase Limbah Terhadap Penambahan Air	Kadar Air Optimum Prosentase Limbah Terhadap Penambahan Air (W_{opt})	Angka Pori (e_0)
%	%	
0	17,60	0,7360
25	19,40	0,7422
50	23,40	0,7809
75	25,60	0,8055
100	27,50	0,8381

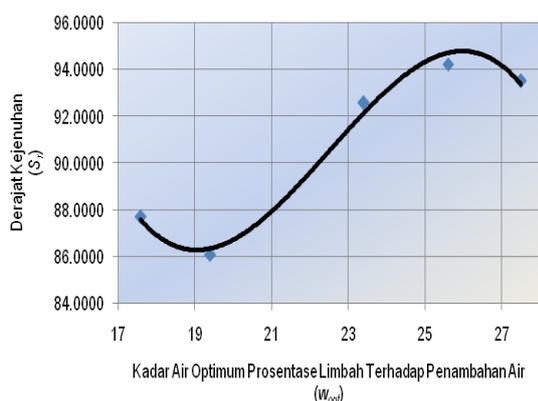
Tabel 3. Kadar Optimum Prosentase Limbah Terhadap Penambahan Air dan Angka Pori



Gbr 3. Grafik Hubungan Kadar Optimum Prosentase Limbah Terhadap Penambahan Air dengan Angka Pori

Prosentase Limbah Terhadap Penambahan Air	Kadar Air Optimum Prosentase Limbah Terhadap Penambahan Air (W_{opt})	Derajat Kejenuhan (S_r)
%	%	%
0	17,60	87,7078
25	19,40	86,0952
50	23,40	92,5818
75	25,60	94,2460
100	27,50	93,5237

Tabel 4. Kadar Optimum Prosentase Limbah Terhadap Penambahan Air dan Derajat Kejenuhan



Gbr 4. Grafik Hubungan Kadar Optimum Prosentase Limbah Terhadap Penambahan Air dengan Derajat Kejenuhan

Dari hasil penelitian diperoleh kesimpulan bahwa : 1.) semakin besar prosentase limbah terhadap penambahan air pada tanah asli, koefisien konsolidasinya semakin menurun; 2.) indeks pemampatan mencapai nilai minimum pada antara 25 % dan 50 % prosentase limbah terhadap

penambahan air; 3.) semakin besar prosentase limbah terhadap penambahan air pada tanah asli, angka pori tanah makin meningkat, dan 4.) prosentase limbah terhadap penambahan air pada tanah asli 25 % memberikan nilai derajat kejenuhan minimum dan 75 % memberikan nilai maksimum.

4. PENURUNAN PADA PONDASI DANGKAL

Penurunan pada pondasi dangkal terbagi atas 2 (dua) kategori, yakni : 1.) penurunan segera atau penurunan elastis (*elastic settlement, S_e*), dan 2.) penurunan konsolidasi (*consolidation settlement, S_c*). Penurunan segera terjadi pada saat atau segera setelah pembangunan konstruksi dikerjakan. Sedangkan penurunan konsolidasi terjadi sebagai proses keluarnya air pori dari rongga tanah lempung jenuh dimana penurunan konsolidasi bergantung pada waktu terjadinya konsolidasi. Penurunan total pada pondasi adalah penjumlahan penurunan segera dan penurunan konsolidasi. Harr (1966) mengemukakan persamaan penurunan segera pondasi telapak yaitu :

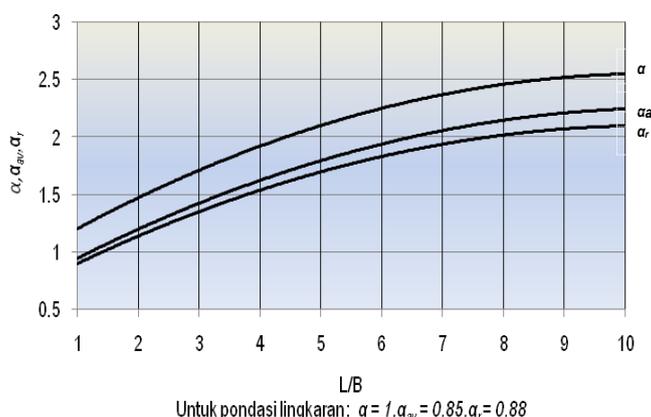
- pondasi fleksibel

$$S_e = \frac{B \cdot q_0}{E_s} (1 - \mu_s^2) \cdot \alpha_{av}$$

- pondasi kaku

$$S_e = \frac{B \cdot q_0}{E_s} (1 - \mu_s^2) \cdot \alpha_r$$

Keterangan : B = lebar pondasi; q_0 = tegangan yang bekerja sampai dasar pondasi; E_s = modulus Young; μ_s = angka Poisson; α_{av}, α_r = konstanta terhadap perbandingan panjang dan lebar pondasi (L/B).

Gbr 5. Kurva L/B untuk Penentuan Konstanta α , α_{av} , dan α_r

Penurunan konsolidasi dinyatakan dengan persamaan-persamaan :

- pada lempung terkonsolidasi normal

$$S_c = \frac{C_c \cdot H_c}{1 + e_0} \log \frac{p_0 + \Delta p_{av}}{p_0}$$

- pada lempung terkonsolidasi lebih dimana :

$$S_c = \frac{C_s \cdot H_c}{1 + e_0} \log \frac{p_0 + \Delta p_{av}}{p_0}$$

- pada lempung terkonsolidasi lebih dimana :

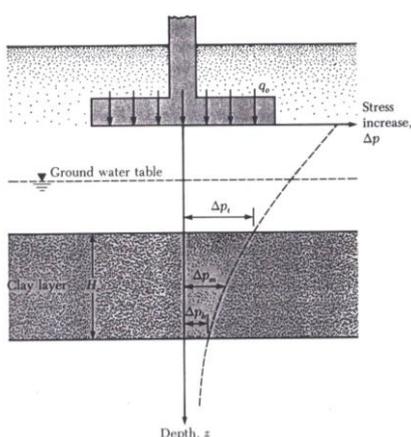
$$S_c = \frac{C_s \cdot H_c}{1 + e_0} \log \frac{p_c}{p_0} + \frac{C_c \cdot H_c}{1 + e_0} \log \frac{p_0 + \Delta p_{av}}{p_c}$$

Keterangan : C_c = indeks pemampatan; C_s = indeks pemuaian; H_c = tebal lapisan lempung; e_0 = angka pori awal; p_0 = tekanan efektif rata-rata pada lapisan lempung; Δp_{av} = nilai rata-rata pertambahan tegangan akibat beban pondasi pada lapisan lempung; p_c = tekanan prakonsolidasi.

Nilai Δp pada tanah lempung tidak konstan dengan bertambahnya kedalaman. Nilai ini akan berkurang dengan bertambahnya kedalaman lapisan lempung yang diukur dari dasar pondasi. Nilai rata-rata pertambahan Δp dihitung dengan persamaan :

$$\Delta p_{av} = \frac{1}{6} (\Delta p_t + 4 \cdot \Delta p_m + \Delta p_b)$$

Keterangan : Δp_{av} = nilai rata-rata pertambahan tegangan akibat beban pondasi pada lapisan lempung; Δp_t , Δp_m , Δp_b = pertambahan tegangan pada bagian atas, tengah dan bawah pada lapisan lempung.

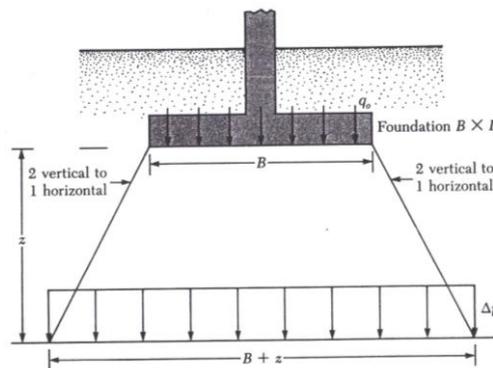


Gbr 6. Pertambahan Tegangan Δp pada Lapisan Lempung

Pertambahan tegangan dalam lapisan tanah lempung di bawah pondasi telapak dihitung dengan menggunakan Metode 2:1, dengan asumsi bahwa tegangan di bawah pondasi akan menyebar sepanjang garis dengan perbandingan 2:1. Nilai Δp pada

setiap kedalaman z dihitung dengan persamaan :

$$\Delta p = \frac{q_0 \cdot B \cdot L}{(B + z) \cdot (L + z)}$$



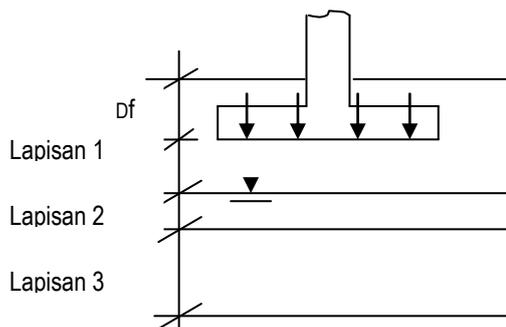
Gbr 7. Pertambahan Tegangan Di Bawah Pondasi dengan Metode 2:1

Jenis Tanah	Modulus Young, E_s		Angka Poisson μ_s
	MN/m ²	lb/in ²	
Loose Sand	10.35 – 24.15	1500 – 3500	0.20 – 0.40
Medium dense sand	17.25 – 27.60	2500 – 4000	0.25 – 0.40
Dense sand	34.50 – 55.20	5000 – 8000	0.30 – 0.45
Silty sand	10.35 – 17.25	1500 – 2500	0.20 – 0.40
Sand and gravel	69.00 – 172.50	10000 – 25000	0.15 – 0.35
Soft clay	2.07 – 5.18	300 – 750	
Medium clay	5.18 – 10.35	750 – 1500	0.20 – 0.50
Stiff clay	10.35 – 24.15	1500 – 3500	

Tabel 5. Parameter Elastis untuk Berbagai Jenis Tanah

5. APLIKASI

Hasil pengujian konsolidasi pada pembahasan sebelumnya diterapkan pada contoh perhitungan penurunan konsolidasi pondasi telapak berikut : sebuah pondasi telapak berukuran 1 m x 2 m dengan kedalaman galian 1 m dari permukaan tanah dan q_0 sebesar 150 kN/m². Hitung penurunan konsolidasi pada lapisan lempung jenuh dengan menggunakan nilai indeks kompresibilitas dan angka pori hasil pengujian konsolidasi, data-data lainnya diketahui yakni : lapisan 1 : pasir kering, $H_1 = 2,5$ m, $\gamma = 16,5$ kN/m³; lapisan 2 : pasir jenuh, $H_2 = 0,5$ m, $\gamma_{sat} = 17,5$ kN/m³; lapisan 3 : lempung jenuh, $H_3 = 2,5$ m, $\gamma_{sat} = 16$ kN/m³.



Gbr 8. Perhitungan Penurunan Konsolidasi Pondasi Telapak

Perhitungan konsolidasi dilakukan dengan langkah-langkah : 1.) hitung p_0 ; 2.) hitung Δp pada bagian atas ($=\Delta p_t$), bagian tengah ($=\Delta p_m$), dan bagian bawah ($=\Delta p_b$) pada lapisan lempung dengan menggunakan metode 2:1; 3.) hitung Δp_{av} ; 4.) hitung penurunan konsolidasi S_c dengan menggunakan nilai e_0 dan C_c hasil pengujian konsolidasi pada tanah asli dan tanah yang mengandung air limbah. Hasil perhitungan disajikan dalam tabel berikut :

Campuran Air Limbah	p_0	Δp_{av}	e_0	C_c	S_c
	(kN/m ²)	(kN/m ²)			(mm)
0 %			0,7360	0,1030	15,65
25 %			0,7422	0,0912	13,81
50 %	52,83	14,53	0,7809	0,1032	15,29
75 %			0,8055	0,1291	18,86
100 %			0,8381	0,1426	20,46

Tabel 6. Hasil Perhitungan Penurunan Konsolidasi

6. KESIMPULAN

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa penurunan konsolidasi terbesar adalah pada tanah yang mengandung campuran air limbah 100 % sementara terkecil pada 25 %, tetapi besar penurunan konsolidasi pada campuran 25 % masih lebih kecil dibandingkan penurunan konsolidasi pada tanah asli. Tanah lempung yang mengandung air limbah 100 % terhadap penambahan air memberikan nilai penurunan konsolidasi sebesar 20,46 mm ($=2,05$ cm). Nilai ini hampir mencapai nilai penurunan maksimum yang disyaratkan yakni sebesar 25 mm ($=2,5$ cm). Apabila penurunan elastis turut dihitung untuk mendapatkan total penurunan, maka kemungkinan pada kandungan air limbah 50 % sampai 100 % nilai penurunannya akan melebihi nilai penurunan maksimum yang disyaratkan. Dapat disimpulkan bahwa apabila tanah lempung jenuh mengandung campuran air limbah sebesar 25 %, akan menghasilkan penurunan konsolidasi 11,8 % lebih kecil dari tanah lempung jenuh asli.

Untuk mendapatkan penurunan total pada pondasi, penurunan segera atau penurunan elastis perlu dihitung terutama pada lapisan pasir kering dan lapisan pasir jenuh pada aplikasi di atas. Parameter elastisitas tanah seperti modulus Young dan angka Poisson dari tanah perlu diketahui untuk menghitung penurunan elastisitas. Ukuran penampang pondasi dan beban yang bekerja pada pondasi juga berpengaruh terhadap besar penurunan yang terjadi. Apabila penurunan total yang dihitung mendekati nilai maksimum penurunan yang

disyaratkan atau bahkan melebihi, salah satu cara untuk mengurangi penurunan adalah dengan merevisi ukuran penampang pondasi tersebut dan beban yang bekerja pada pondasi sehingga penurunan total yang dihasilkan jauh di bawah nilai maksimum penurunan yang diizinkan.

7. REFERENSI

- Bowles, Joseph E., 1968. *Foundation Analysis And Design*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Das, Braja M., 1990. *Principles Of Foundation Engineering, Second Edition*. PWS Publishing Company, Boston.
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., 1981. *An Introduction To Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall, New York.
- Jumikis, Alfreds D., 1967. *Introduction To Soil Mechanics*. D. Van Nostrand Company Inc., Amsterdam.
- Rompis, M., 2002. *Skripsi : Pengaruh Penggunaan Air Limbah Industri Pengalengan Ikan Di Bitung Terhadap Koefisien Konsolidasi Tanah*. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UNSRAT, Manado.