

Stabilitas Dan Deformasi Pada Tanah Lempung Lunak Di Bendungan Teritip

Rasita Mulyati¹, Goji Pamungkas²

Direktorat Bendungan dan Danau, Dirjen SDA, Kementerian PUPR¹, Mahasiswa Program Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang²

Email: rasita.mulyati@pu.go.id¹, insinyur.goji@gmail.com²

DOI: <http://dx.doi.org/10.31869/rtj.v5i2.1688>

Abstrak: Bendungan pada tanah lunak sangat berbeda perilakunya jika dibandingkan dengan fondasi batuan. Potensi kegagalan bendungan dapat terjadi akibat *differential settlement*. Penurunan total pada Bendungan Teritip tanpa PVD membutuhkan waktu 17 tahun. Analisis penggunaan PVD menunjukkan adanya peningkatan kuat geser akibat disipasi tegangan air pori yang ditandai dengan peningkatan angka keamanan. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai konsolidasi minimal 80% adalah 180 hari berdasarkan simulasi elemen hingga. Penurunan total pada tubuh bendungan adalah 1.37 meter.

Kata kunci: PVD, Penurunan, Konsolidasi, Disipasi, Tegangan Air Pori

Abstract: Dams on soft soils differ greatly in behavior when compared to rock foundations. Potential dam failures can occur due to differential settlement. The total reduction in Barnacle dam without PVD takes 17 years. Analysis of the use of PVD shows an increase in shear strength due to dissipation of pore stresses marked by an increase in safety figures. The time needed to achieve consolidation of at least 80% is 180 days based on finite element simulations. The total reduction in the body of the dam is 1.37 meters.

Keywords: PVD, Decrease, Consolidation, Dissipation, Pore Water Stress

PENDAHULUAN

Bendungan Teritip Terletak di Desa Teritip, Kecamatan Balikpapan Timur, Kota Balikpapan, Provinsi Kalimantan Timur. Dibangun pada tahun 2014 sampai tahun 2016 dan di *impounding* pada tahun 2017. Bendungan merupakan suatu usaha manusia untuk melaksanakan upaya konservasi dalam bidang konservasi sumber daya air. Peran Bendungan ini sangat penting dalam menyediakan air baku 260 liter/detik untuk kota Balikpapan. Hal ini membuat air menjadi salah satu sumber daya alam terbarukan dan memegang peranan penting dalam kehidupan.

Bendungan harus memiliki keamanan yang tinggi karena fungsinya yang vital. Selain itu, potensi kerusakan akibat kegagalan bendungan bukan hanya pada kehilangan fungsi layanan air. Namun, potensi kegagalan bendungan juga menyebabkan kerugian materi dan non-materi bagi kehidupan di hilir bendungan. Dengan demikian, bendungan harus didesain stabil baik dari sisi timbunan maupun fondasinya.

Bendungan Teritip merupakan urugan tanah homogen yang berada pada tanah lunak, dengan tinggi bendungan 10,50 meter dan kapasitas tampungan total $2,431 \times 10^6 \text{ m}^3$, hal

ini dianggap sebagai tantangan dalam perkembangan ilmu rekayasa sipil khususnya pada kelompok keahlian Geoteknik. Perilaku tanah lunak sangat berbeda daripada fondasi batuan. Potensi kegagalan bendungan dapat terjadi akibat *differential settlement*. Hal ini karena tanah lunak dapat mengalami penurunan yang tidak seragam.

METODE PENELITIAN

1. Perilaku Tanah Lempung Lunak

Tanah lempung lunak menurut Look (2007) merupakan lempung yang mempunyai kuat geser antara 0 – 25 kPa. Menurut Schmertmann (1978), klasifikasi tanah lunak berdasarkan hasil penyelidikan sondir memiliki nilai tahanan konus q_c antara 0 – 0.4 Mpa. Dengan demikian, daya dukung tanah lunak untuk menahan beban sangat rendah. Beban yang bekerja di atas tanah lunak dibatasi oleh beban kritis yang bergantung pada kuat geser tak terdrainasinya.

Nagaraj & Miura (2001) menguraikan karakteristik dasar yang harus dipelajari dalam *soft clay engineering*. Kebanyakan tanah lunak merupakan material yang tidak tersementasi dengan baik. Hal ini berhubungan dengan

sejarah pembebanan masa lalu sehingga lempung lunak tidak mengalami peningkatan kuat geser. Proses sementasi yang tidak baik mengabaikan lempung lunak memiliki pori yang besar. Pada akhirnya, lempung memiliki kompresibilitas yang tinggi sehingga potensi penurunan akan meningkat seiring dengan meningkatnya beban yang ada di atasnya.

Selain kuat geser yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi, kemampuan pengaliran lempung arah bertikal juga rendah. Permasalahan ini sering berhubungan dengan lamanya proses disipasi tegangan air pori di dalam lempung. Karena proses disipasi yang lama, maka waktu yang diperlukan untuk mencapai konsolidasi 100% juga akan berlangsung lama. Pada kondisi tertentu, proses disipasi yang tidak baik akan menyebabkan akumulasi tegangan air pori. Apabila kondisi telah melewati equilibriumnya, kegagalan lempung lunak akan terjadi.

2. Penurunan Konsolidasi

Penurunan konsolidasi dihitung dengan persamaan 1 berikut ini (Das, 2010).

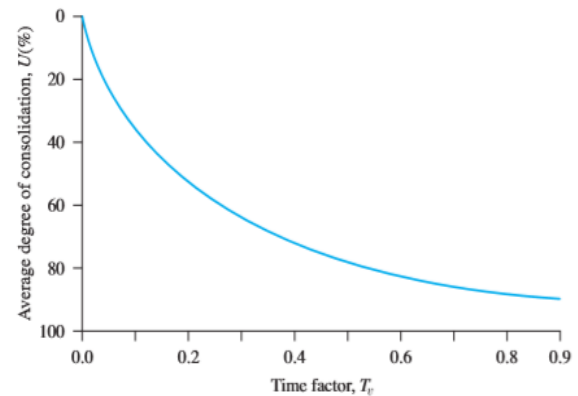
$$S = \frac{H \times C_c}{1 + e_0} \log \frac{(P_1 + P_2)}{P_1} \quad (1)$$

Dimana C_c merupakan koefisien kompresi, e_0 angka pori awal, dan P adalah tegangan yang membebani tanah. Persamaan 1 merupakan perhitungan penurunan konsolidasi untuk tanah terkonsolidasi normal. Kriteria tanah terkonsolidasi normal adalah nilai P_c atau tekanan pra-konsolidasi lebih besar dari beban tanah yang bekerja saat ini (P_0).

Waktu penurunan total tersebut dapat berlangsung lama atau cepat tergantung dari jenis tanah yang mempengaruhi proses keluarnya air, umumnya mampatnya partikel-partikel mineral tanah berlangsung lambat atau dengan kata lain (koefisien konsolidasi) dari lapisan tersebut sangatlah kecil. Prediksi waktu penurunan tersebut dihitung berdasarkan Persamaan 2 di bawah ini:

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

Dimana C_v adalah koefisien konsolidasi arah vertikal dan T_v adalah faktor waktu. Besarnya faktor waktu bergantung pada derajat konsolidasinya. Variasi faktor waktu berdasarkan waktu konsolidasinya dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Variasi Faktor Waktu vs Derajat Konsolidasi (Das, 2010)

3. Perbaikan Tanah dengan PVD

Salah satu upaya untuk meningkatkan kuat geser dan daya dukung tanah lempung lunak adalah dengan mempercepat terjadinya konsolidasi. Hartlen & Wolski (1996) memberikan *guidance* dalam melakukan pendekatan desain PVD. Derajat konsolidasi gabungan antara konsolidasi vertikal dan horizontal dihitung dengan persamaan Callilo Persamaan 3.

$$U = 1 - (1 - U_v)(1 - U_h) \quad (3)$$

Pada persamaan 3, konsolidasi vertikal sangat sedikit pengaruhnya dalam percepatan konsolidasi dengan PVD. Dengan demikian, kecepatan konsolidasi hanya menggunakan komponen konsolidasi arah horizontal. Sehingga lama waktu yang dibutuhkan untuk mencapai konsolidasi tertentu dengan PVD dapat ditentukan dengan Persamaan 4.

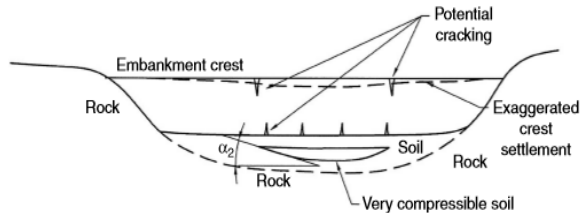
$$t = \frac{D^2 \mu}{8 C_h} \ln \frac{1}{1 - U_h} \quad (4)$$

Dimana C_h = koefisien konsolidasi arah horizontal, D = diameter efektif PVD, dan μ = efek smear yang terjadi pada proses konstruksi. Dengan menentukan lama waktu konstruksi t , maka jarak atau diameter D dapat ditentukan.

4. Aspek Tanah Lunak Terhadap Performa Bendungan

Permasalahan tanah lunak pada pondasi bendungan dapat membahayakan terhadap keamanan bendungan. Apabila perbaikan tanah tidak berlangsung dengan baik, maka *differential settlement* dapat terjadi pada tubuh bendungan. Menurut Fell et. al. (2015), terjadinya perbedaan penurunan pada tubuh bendungan berpotensi menghasilkan retak atau

celah pada tubuh bendungan. Apabila celah yang terjadi lebar dan panjang, maka erosi internal dapat terjadi. Erosi yang berlangsung lama akan membuat lubang dan menyebabkan sinkhole pada tubuh bendungan, sehingga kegagalan dapat terjadi pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Retak Tubuh Bendungan Akibat Tanah Lunak pada Pondasinya (Fell et. al., 2015).

KOMPILASI DATA

Parameter desain berdasarkan data perencanaan PT Indra Karya (2013) sebagaimana ditampilkan pada **Tabel 1** berikut ini. Nilai Lamda (λ) dan Kappa (κ) diambil berdasarkan Kempfert & Gebreselassie (2006). Dalam Hartlen & Wolski (1996), nilai C_h diambil dua kali dari nilai C_v .

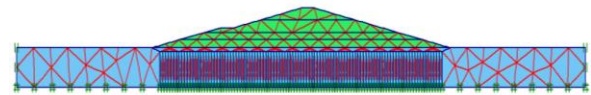
Tabel 1. Parameter Desain untuk Analisis Kestabilan Bendungan (PT Indra Karya, 2013)

No	Parameter	Fondasi tanah lunak	Timbunan
1	Berat isi, γ_n (kN/m ³)	16.2	18
2	Berat isi jenuh, γ_{sat} (kN/m ³)	17	19
3	Undrained shear strength, S_u (kN/m ²) (vane shear test)	10	25
4	Triaksial CU :		
	- Kohesi efektif, c' (kN/m ²)	8	20
	- Sudut geser dalam ef, ϕ' (....°)	14	21
5	Modulus Young, E (kN/m ²)	650	5000
6	Koef permeabilitas vertikal, k_v (cm/s)	8×10^{-7}	2×10^{-7}
7	Koef permeabilitas horisontal, k_h (cm/s)	56×10^{-7}	6×10^{-7}
8	Lamda (λ)	0.238	0.115
9	Kappa (κ)	0.052	0.0255
10	Poisson ratio, V	0.33	0.3

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis permodelan penurunan dan kestabilan dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga. Model bendungan dapat dilihat pada **Gambar 3** berikut. Kemiringan bagian hulu direncanakan dengan kemiringan 5H:1V. Penimbunan dilakukan

dengan cara bertahap dengan tahap I sampai tahap II setinggi 2 meter. Selanjutnya pada tahap III dan tahap IV setinggi 3 meter.



Gambar 3. Diskretisasi Elemen Hingga Model Bendungan

Disipasi tegangan air pori pada setiap kenaikan timbunan akan menimbulkan kenaikan kuat geser tanah di dasar pondasi bendungan. Kenaikan kuat geser ini bergantung pada tegangan tambahan vertikal dan derajat konsolidasinya. Pada **Gambar 4**, **Gambar 5**, **Gambar 6**, dan **Gambar 7** ditampilkan disipasi tegangan air pori pada tiap tahap penimbunannya.

$$\text{Waktu konsolidasi, } t = (a.H)^2 \frac{T}{C_v}$$

dimana :

a = konstanta aliran; aliran satu arah = 1; aliran dua arah = 0,5

H = ketebalan lapisan yang ditinjau = 6 m = 600 cm.

C_v = koefisien konsolidasi arah vertikal = $5,691 \times 10^{-4}$ cm²/detik

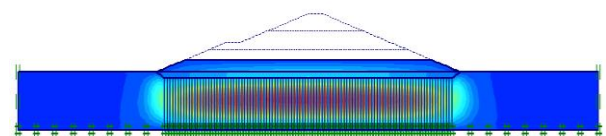
T = faktor waktu, untuk $U = 90\%$, $T = 0,848$

$$\text{Jadi } t_{90} = \frac{1 \times 600^2 \times 0,848}{5,691 \times 10^{-4}} = 5,365 \times 10^8 \text{ detik} \\ = 17 \text{ tahun.}$$

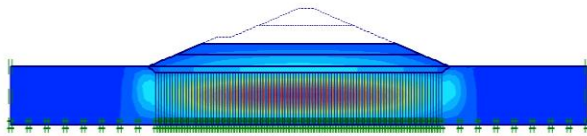
Dengan perhitungan manual, jarak PVD dapat dipilih berdasarkan **Tabel 2** berikut ini. Jarak antar PVD diambil jaraknya 1.00 meter.

Tabel 2. Pemilihan Jarak PVD Berdasarkan Persamaan Barron Hansbo

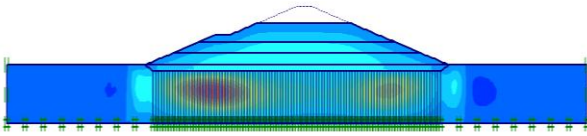
Pre-loading time. (month)	$t \times C_h / D^2$ (eq.1)	D (meter)	$S = D / 1,05$ (meter)	$\ln(D/dw-0.75)$	eq. 2
3	0.96	0.685	0.65	2.56	0.96
6	1.15	0.885	0.84	3.1	1.16
9	1.16	1.08	1.03	3.11	1.17
12	1.19	1.23	1.17	3.17	1.19



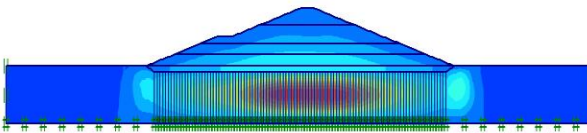
Gambar 4. Excess Pore Water Pressure (8.99 kPa) Tinggi Timbunan 2 meter (180 hari)



Gambar 5. Excess Pore Water Pressure (3.84 kPa) Tinggi Timbunan 4 meter (360 hari)



Gambar 6. Excess Pore Water Pressure (1.00 kPa) Tinggi Timbunan 7 meter (540 hari)



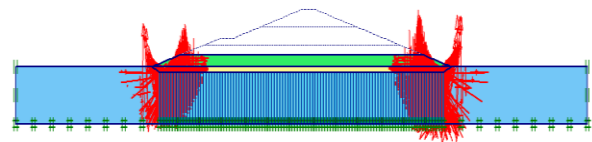
Gambar 7. Excess Pore Water Pressure (0.234 kPa) Tinggi Timbunan 10 meter (720 hari)

Disipasi tegangan air pori pada setiap kenaikan timbunan akan menimbulkan kenaikan kuat geser tanah di dasar pondasi bendungan. Kenaikan kuat geser ini bergantung pada tegangan tambahan vertikal dan derajat konsolidasinya. Jika dilihat besarnya disipasi tegangan seperti pada **Gambar 4**, **Gambar 5**, **Gambar 6**, dan **Gambar 7**, maka derajat konsolidasi sudah melampaui 80%. Berdasarkan simulasi tersebut, dibutuhkan waktu minimal 180 hari pada setiap tahapan penimbunan untuk mencapai konsolidasi minimal 80% apabila digunakan PVD.

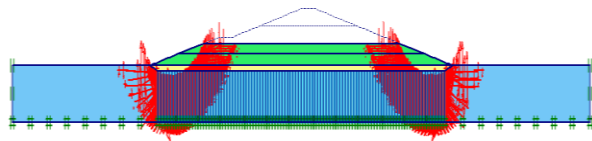
Setiap kenaikan timbunan akan diperiksa kenaikan angka amannya. Perhitungan angka aman menggunakan metode reduksi ϕ/c . Perhitungan ini dilakukan dengan menurunkan nilai shear strength (c dan ϕ) dari soil dan selanjutnya bagian dari tanah yang telah menyentuh selubung keruntuhan mohr columb akan mengalami kondisi plastis dan terbentuk plastic point. Pada titik ini akan mengalami incremental strain yang tinggi dibandingkan titik lain yang belum mengalami plastic. Pada titik dimana incremental strain tinggi pada umumnya berbentuk pita atau band. Band ini pada metode slice pada limit equilibrium disebut failure plane atau bidang kegagalan. Hasil perhitungan angka aman setelah konstruksi selesai dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Rangkuman FoS (factor of safety) atau Angka Aman Pada Penimbunan Bertahap dengan Kriteria Angka Aman (US Army Corps of Engineer, 2003)

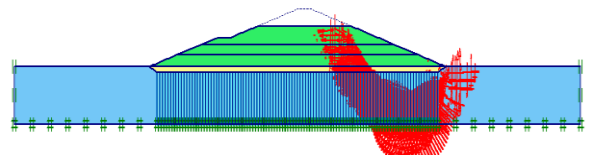
Tinggi Timbunan	Nilai FoS	Kriteria Penerimaan	Kesimpulan	Bidang Kegagalan
	(angka aman dengan ϕ/c reduction)			
2 meter	2.945	1.3	aman	Gambar 7
4 meter	2.225		aman	Gambar 8
7 meter	1.822		aman	Gambar 9
10 meter	1.687		aman	Gambar 10



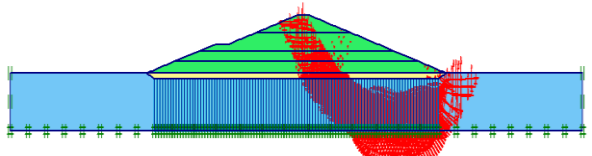
Gambar 8. Bidang Gelincir Tinggi Timbunan 2 meter (SF 2.945)



Gambar 9. Bidang Gelincir Tinggi Timbunan 4 meter (SF 2.225)

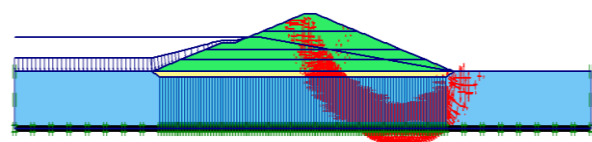


Gambar 10. Bidang Gelincir Tinggi Timbunan 7 meter (SF 1.822)



Gambar 11. Bidang Gelincir Tinggi Timbunan 10 meter (SF 1.687)

Apabila simulasi dilanjutkan dengan kondisi steady saat genangan mencapai MAN, hasil angka aman menunjukkan nilai SF 1.501. Untuk stabilitas jangka panjang, angka aman tersebut masih masuk dalam kriteria. Hasil permodelan angka aman saat kondisi steady dapat dilihat pada **Gambar 12**.

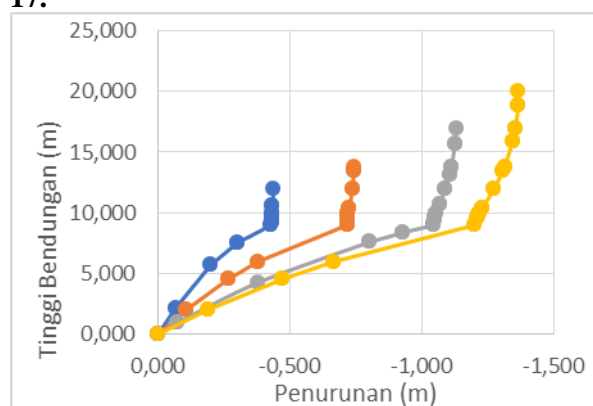


Gambar 12. Bidang Gelincir Tinggi

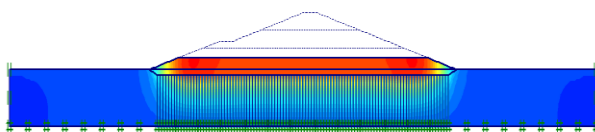
Timbunan 10 meter Kondisi Steady (SF 1.501)

Penurunan yang terjadi pada setiap tahapan penimbunan dapat dilihat pada grafik **Gambar 13**. Perhitungan untuk penurunan menggunakan model material Soft Soil Clay untuk memprediksi penurunan jangka panjang. Model SSC merupakan analisis critical soil mechanics dengan parameter utama adalah Lamda (λ) dan Kappa (κ). Kedua parameter tersebut hubungan anatar specific volumetrik dan tegangan (Kempfert & Gebreselassie, 2006).

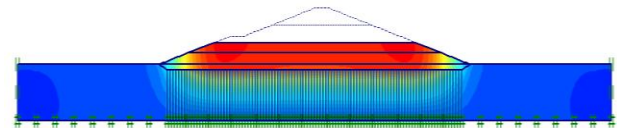
Pada **Gambar 17** terlihat bahwa penurunan maksimum pada timbunan 10 meter adalah 1.36 meter. Penimbunan tahap I menyebabkan penurunan sebesar 0.438 meter atau sepertiga dari penurunan totalnya. Penambahan timbunan berikutnya menyebabkan penurunan sebesar 0.74 meter. Dengan penambahan timbunan dan waktu konsolidasi yang sama, penurunan yang terjadi lebih kecil daripada penimbunan yang pertama. Hal yang sama juga terjadi pada tahap penimbunan selanjutnya sampai tahap IV. Berdasarkan hasil tersebut, pada setiap penambahan tinggi timbunan menyebabkan kenaikan kuat geser dan penurunan indeks kompresibilitas tanah lempung lunak. Gambar vertical displacement hasil permodelan ditampilkan pada **Gambar 14**, **Gambar 15**, **Gambar 16** dan **Gambar 17**.



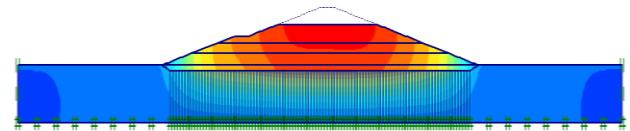
Gambar 13. Distribusi Penurunan Tanah Pada Tiap Ketinggian Timbunan



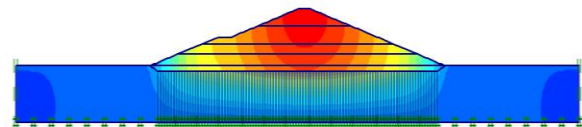
Gambar 14. Vertical Displacement Pada Timbunan 2 (Uy 0.438)



Gambar 15. Vertical Displacement Pada Timbunan 4 (Uy 0.741)



Gambar 16. Vertical Displacement Pada Timbunan 7 (Uy 1.21)



Gambar 17. Vertical Displacement Pada Timbunan 10 (Uy 1.366)

PENUTUP

Dari beberapa uraian tentang permodelan kestabilan Bendungan Teritip, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Penggunaan PVD mampu mempercepat waktu konsolidasi yang dibutuhkan.
2. Perhitungan dengan metode Barron Hansbo bahwa tiap penimbunan membutuhkan waktu 9 bulan dengan jarak PVD 1.00 meter. Berdasarkan permodelan elemen hingga, dibutuhkan waktu minimal 180 hari untuk mencapai derajat konsolidasi minimum.
3. PVD mampu meningkatkan kuat geser, sehingga kestabilan tubuh bendungan meningkat seiring dengan terjadinya disipasi tegangan air pori.
4. Bendungan harus diamati besarnya penurunan aktual untuk mencegah terjadinya differential settlement. Pada saat konstruksi, piezometer dan settlement plate menjadi instrumen utama untuk menilai derajat konsolidasinya. Bendungan masih dapat mengalami penurunan apabila disipasi tegangan air pori yang signifikan masih terjadi.
5. Sebaiknya pada saat investigasi, juga dilakukan uji organik untuk mengetahui apakah ada potensi penurunan sekunder yang dapat menyebabkan *differential settlement*.

DAFTAR PUSTAKA

- Das, B. M. (2010). *Principle of Geotechnical Engineering* (7th ed.). Connecticut: Cengage Learning.
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., & Foster, M. (2015). *Geotechnical Engineering of Dams* (2nd ed.). London: Taylor & Francis.
- Hartlen, J., & Wolski, W. (1996). *Embankment on Organic Soil*. Amsterdam: Elsevier Science B. V.
- Kempfert, H.-G., & Gebreselassie, B. (2006). *Excavations and Foundations in Soft Soils*. Berlin: Springer.
- Look, B. G. (2007). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. London: Taylor & Francis.
- Nagaraj, T. ., & Miura, N. (2001). *Soft Clay Behaviour (Analysis and Assessment)*. Rotterdam: A.A Balkema.
- PT Indra Karya. (2013). *Laporan Akhir Persetujuan Desain Sertifikasi Bendungan Teritip*. Balikpapan.
- Schmertmann, J. H. (1978). *Guidelines for Cone Penetration Test: Performance and Design*. Washington DC.
- US Army Corps of Engineer. (2003). *Slope Stability EM 1110-2-1902*. Washington DC.