

# Prediksi Penurunan Tanah Timbunan pada Perbaikan Tanah Lunak dengan Prefabricated Vertical Drain pada Proyek Pembangunan Landas Pacu Bandara Ahmad Yani Semarang

Siswoko Adi Saputro, Agus Setyo Muntohar, Willis Diana  
Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik  
Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

**Abstrak.** Penurunan konsolidasi merupakan permasalahan yang sering dialami pada pekerjaan konstruksi di atas tanah lunak. Konsolidasi tanah adalah peristiwa terdisipasinya air pori akibat beban yang diterima tanah di atasnya, sehingga volumenya berkurang. Penurunan yang terjadi sebagai akibat langsung dari berkurangnya volume tanah yang disebabkan mampatnya air dan keluarnya udara dari rongga akibat beban dari atas yang diterima tanah. Penurunan berlebihan dapat menyebabkan kerusakan struktur bangunan di atasnya. Penurunan tanah pada jenis tanah lunak berlangsung dalam kurun waktu yang relatif lama, sehingga penggunaan *preload* dan *prefabricated vertical drain* (PVD) perlu diperhitungkan agar diketahui waktu yang dibutuhkan tanah untuk mencapai tekanan air pori minimum hingga tanah siap menerima beban bangunan di atasnya tanpa adanya lagi dampak penurunan. Prediksi penurunan konsolidasi dapat dilakukan dengan beberapa metode diantaranya dengan metode observasi Asaoka dan pemodelan numerik menggunakan *finite element method* (FEM). Kedua metode tersebut akan digunakan dalam studi kasus ini untuk mengestimasi besar penurunan akhir konsolidasi. Metode elemen hingga memerlukan parameter tanah yang cukup lengkap untuk mendapatkan hasil yang mendekati aktual. Nilai permeabilitas merupakan salah satu parameter yang harus diperhitungkan dalam pemodelan, karena adanya PVD nilai permeabilitas tanah pada pemodelan perlu dikonversi dan diekuivalensikan terhadap pengaruh PVD, sehingga variasi nilai permeabilitas dalam pemodelan dilakukan, perilaku penurunan konsolidasi hasil pemodelan juga dibandingkan dengan perilaku penurunan aktual agar diketahui pemodelan yang mendekati hasil pengamatan di lapangan. Metode Observasi Asaoka juga dapat memberikan prediksi besar penurunan akhir dengan menggunakan data pengamatan penurunan akibat timbunan dengan metode *curve fitting*. Dari hasil studi, diperoleh persentase keakuratan prediksi penurunan akhir (*final settlement*) dengan metode Asaoka hampir mencapai 100% dari kondisi actual di lapangan, dengan perbedaan hasil <5%. Dalam pemodelan numerik dengan variasi nilai  $k_{ve} = 10 k_v$ , hasil perilaku penurunan tanah menunjukkan kecocokan data dengan nilai RMSD (*Root Mean Square Deviation*) sebesar 59% dan untuk besar penurunan akhir serta waktu untuk mencapai tekanan air pori minimum hanya menunjukkan perbedaan hasil sebesar <5%.

Kata kunci : Prediksi penurunan akhir, konsolidasi, metode elemen hingga, permeabilitas, metode asaoka

## 1 Pendahuluan

Penurunan konsolidasi merupakan permasalahan yang sering dialami pada pekerjaan konstruksi di atas tanah lunak, seperti pada proyek perluasan bandar udara Ahmad Yani, Semarang tahun 2012-2013. Konsolidasi tanah adalah peristiwa terdisipasinya air pori akibat beban yang diterima tanah di atasnya, sehingga volumenya berkurang. Penurunan yang terjadi sebagai akibat langsung dari berkurangnya volume tanah yang disebabkan mampatnya air dan keluarnya udara dari rongga (Muntohar, 2009). Penurunan yang

berlebihan dapat menyebabkan kerusakan struktur bangunan di atasnya. Tanah lempung lunak cenderung mengalami penurunan yang besar dan sangat lambat serta berlangsung menerus seiring waktu. Untuk mempercepat penurunan konsolidasi pada tanah lunak, metode perbaikan tanah dengan *preloading* dan *prefabricated vertical drain* (PVD) sering digunakan dalam pekerjaan.

Salah satu permasalahan dalam pekerjaan metode perbaikan tanah dengan *preloading* dan *prefabricated vertical drain* (PVD) adalah menentukan besar dan lama waktu penurunan. Teori Terzhagi lazim digunakan untuk

memprediksi besarnya penurunan tanah yang terjadi. Namun, pada realita di lapangan hubungan tegangan-regangan pada tanah sangat rumit untuk diperkirakan, dimana tanah bersifat anisotropik, heterogen, dan non-elastik, sehingga analisis multi dimensi perlu dilakukan. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menganalisis multi dimensi yaitu metode elemen hingga (*finite element method, FEM*), pemodelan timbunan dengan metode FEM cukup rumit untuk dilakukan karena keakuratan hasil tergantung pada lengkapnya data lapangan, dan tepatnya asumsi terhadap kondisi tanah di lapangan.

Metode Observasi Asaoka (Metode Asaoka) adalah salah satu metode yang dapat juga digunakan untuk memprediksi besarnya penurunan akhir (*final settlement*) selain metode Terzaghi dan numerik. Melalui metode ini, besarnya penurunan tanah aktual dapat diprediksi tanpa membutuhkan parameter-parameter yang digunakan pada analisis konsolidasi, seperti data tekanan air pori, panjang drainase, regangan maksimum tanah dan koefisien konsolidasi. Dengan menggunakan metode Asaoka data penurunan yang didapatkan kemudian dianalisis dengan *curve fitting* (Nawir, dkk. 2012).

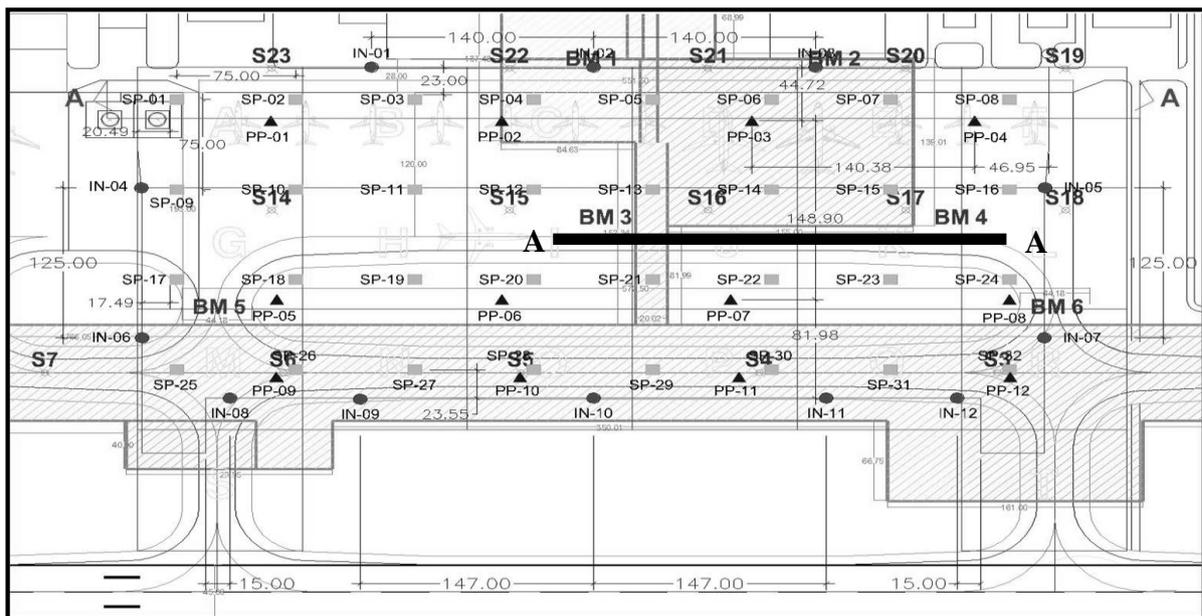
Dalam studi ini, besarnya prediksi penurunan tanah akhir akibat suatu kasus timbunan dianalisis dengan menggunakan Metode Observasi Asaoka, dan dengan

pemodelan numerik dengan metode elemen hingga (FEM). Pengaruh permeabilitas tanah terhadap perilaku penurunan dari hasil pemodelan numerik juga dikaji terhadap nilai permeabilitas tanah laboratorium untuk mengetahui kontribusi atau pengaruh PVD dalam perbaikan tanah dengan metode *preloading*. Kedua hasil dari masing-masing metode akan dibandingkan dengan data lapangan untuk menentukan metode yang mendekati kondisi nyata di lapangan.

## 2 Kondisi Geoteknik Lokasi

Konstruksi perluasan bandar udara Ahmad Yani Semarang, Jawa Tengah tahun 2012-2013 diketahui dibangun diatas tanah lunak. Parameter dan kondisi lapisan tanah, didapatkan melalui penyelidikan geoteknik seperti *Standard Penetration Test (SPT)* di 6 titik dengan kedalaman 30 m dan *Cone Penetration Test (CPT)* di 23 titik dengan variasi kedalaman 25-28 m serta pengujian tanah di laboratorium yang terdiri dari uji indeks properti tanah, uji kuat geser tanah, dan uji konsolidasi. Hasil penyelidikan menunjukkan lapisan tanah lunak ditemukan sampai variasi kedalaman 25-30 m. Lokasi penyelidikan tanah yang dilakukan dapat dilihat pada gambar 1.

Berdasarkan data hasil penyelidikan dan



Gambar 1 Lokasi titik penyelidikan geoteknik di lapangan

pengujian laboratorium, diketahui bahwa sangat lunak (*very soft*), lunak (*soft*), kaku (*stiff*) dan sangat kaku (*very stiff*). Gambar 2 menunjukkan profil tanah BM-03 dan BM-04 di lapangan.

Pada studi ini, analisis besar penurunan akan dianalisis dengan metode Asaoka dan Numerik. Kedua hasil dari masing-masing metode akan dibandingkan untuk mengetahui keakuratan dari masing-masing metode, dan juga agar diperoleh metode pendekatan melalui pemodelan numerik. Dari data tanah dan instrumentasi yang didapatkan Titik BM-03 dan BM-04 dipilih untuk dikaji dan dianalisis besar penurunannya yang terjadi. Data *settlement plate* yang akan dibandingkan dengan hasil analisis dengan metode Asaoka dan numerik adalah titik SP-13, 14, 15 dan 16. Titik *settlement plate* tersebut terletak berdekatan dengan titik BM-03 dan BM-04, sehingga pemodelan numerik menjadi lebih mendekati kondisi lapangan jika digunakan data tanah BM-03 dan BM-04. Adapun data tanah asli dan timbunan di titik BM-03 dan BM-04 disajikan dalam tabel

ditemukan empat lapisan dengan karakteristik 1 dan 2.

### 3 Perbaikan Tanah

Pada proyek perbaikan tanah yang dilakukan pada studi kasus ini, metode yang digunakan adalah metode *preloading* yang dikombinasikan PVD dan juga terdapat penggunaan geosintetik jenis geotekstil guna meningkatkan kuat geser tanah pada saat proses *preload*. Instrumentasi seperti *piezometer*, *inclinometer*, dan *settlement plate* dipasang pada konstruksi timbunan untuk memonitoring proses konsolidasi yang terjadi. Lapisan geotekstil yang digunakan adalah tipe TW-200 yang mempunyai nilai EA 21 kN/m. *Piezometer* dipasang di kedalaman 6, 12 dan 18 meter untuk memonitoring tekanan air pori pada saat proses konsolidasi. Dimensi PVD yang digunakan adalah 100 x 4 mm dengan spasi 1,2 m (pola segitiga) dengan panjang 20 m. Kemiringan timbunan yaitu 1:3 dengan tebal 5 m. (Gambar 3).

Tabel 1 Rangkuman hasil penyelidikan laboratorium dari titik BM-03 dan BM-04

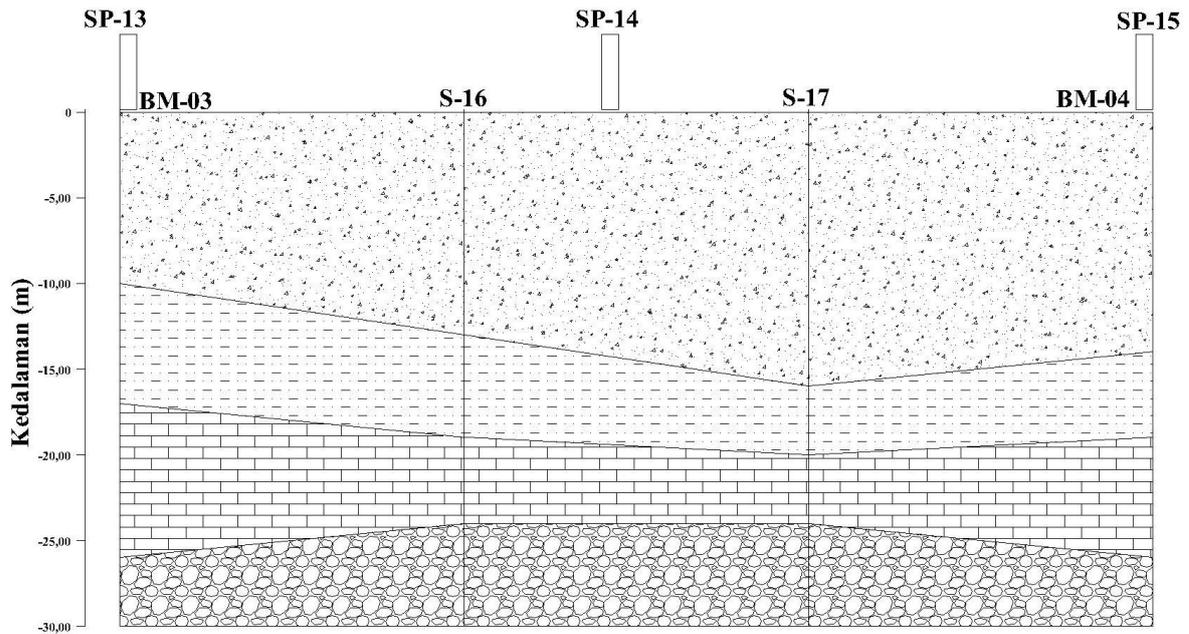
Titik Bor	Kedalaman (m)	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	Angka pori, e	Cc	Cs	Koef.	
							Permeabilitas, $k_v$ (m/hari)	$\phi$ (°)
BM3	2,50-3,00	15,59	8,630	2,02	1.080	0.069	1,62 x 10 <sup>-3</sup>	12.02
	5,50-6,00	14,91	7,460	2,45	1.670	0.079	0,18 x 10 <sup>-3</sup>	1.77
	8,50-9,00	14,81	8,240	1,72	0.94	0.063	1,60 x 10 <sup>-3</sup>	9.17
	11,50-12,00	14,22	7,260	2,52	5.76	0.283	0,89 x 10 <sup>-3</sup>	5.29
	14,50-15,00	14,81	7,950	1,93	1.400	0.067	0,84 x 10 <sup>-3</sup>	7.04
	17,50-18,00	23,25	16,580	0,57	0.660	0.036	7,45 x 10 <sup>-3</sup>	6.40
BM4	2,50-3,00	16,58	9,52	1.52	1.10	0.058	1,33 x 10 <sup>-3</sup>	7.12
	5,50-6,00	18,84	11,18	1.28	0.95	0.052	1,37 x 10 <sup>-3</sup>	9.55
	8,50-9,00	12,65	7,75	1.88	1.05	0.066	1,18 x 10 <sup>-3</sup>	4.70
	11,50-12,00	15,89	8,44	2.06	5.60	0.281	6,75 x 10 <sup>-3</sup>	6.38
	14,50-15,00	15,30	7,95	2.17	1.52	0.073	1,13 x 10 <sup>-3</sup>	12.18
	17,50-18,00	14,91	9,03	1.76	1.00	0.063	1,79 x 10 <sup>-3</sup>	3.53

Sumber : PT. Teknindo Geosistem Unggul, 2012-2013

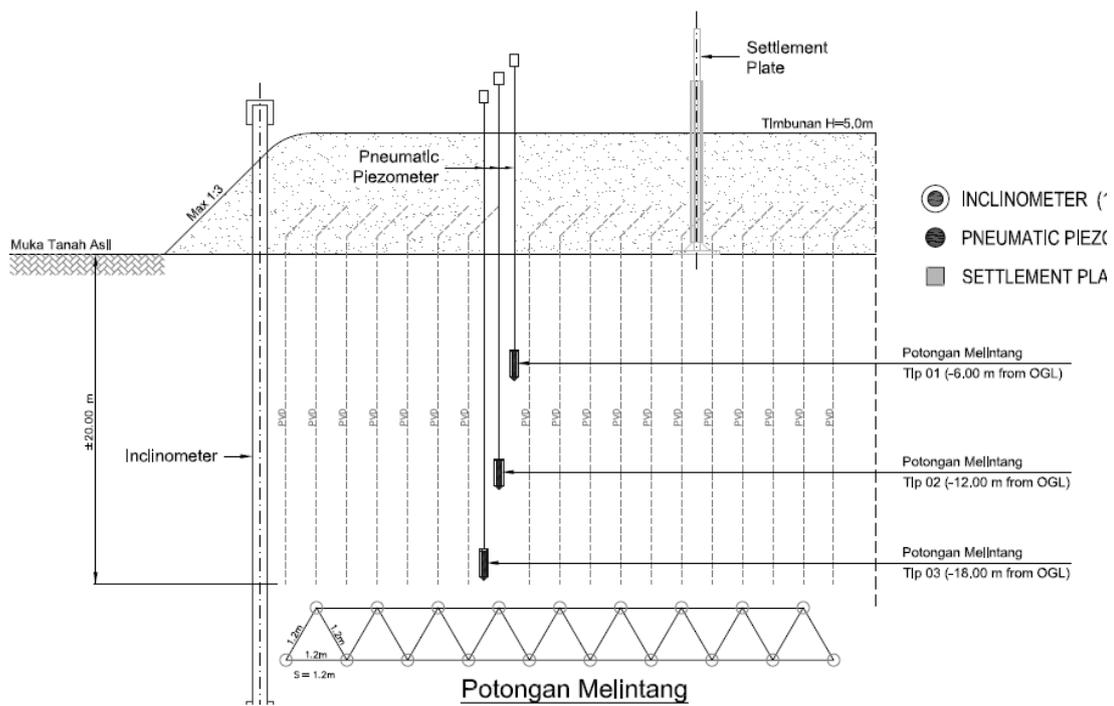
Tabel 2 Data parameter tanah timbunan

N-SPT	E (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma_{un}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	$K_{sat}$ (m/day)	v	$e_{init}$
11	10000	16	19	5	25	0.043	0.3	1.1

Sumber : PT. Teknindo Geosistem Unggul, 2015



Gambar 2 Profil tanah sepanjang potongan A-A (gambar 1)



Gambar 3 Bentuk penampang timbunan dan PVD beserta instrumentasi (Sumber : PT. Teknindo Geosistem Unggul, 2012-2013)

#### 4 Pemodelan Numerik

##### Material Tanah

Pemodelan numerik dilakukan menggunakan metode elemen hingga PLAXIS (versi 8). Tanah lunak, timbunan, dan PVD dimodelkan sebagai plane strain menggunakan elemen 15-nodes dalam PLAXIS 2D. Dalam analisis, lapisan tanah dibagi menjadi beberapa lapisan disesuaikan dengan lapisan tanah dilapangan. Model tanah lunak berdasarkan teori *Modified Cam-clay*

digunakan untuk menggantikan lapisan lempung. Model *Mohr-Coulumb* digunakan untuk memodelkan lapisan timbunan. Model tipe *Modified Cam-clay* sangat cocok untuk menganalisis penurunan pada tanah lunak (Sathananthan, 2005).

Parameter yang dibutuhkan dalam model tanah lunak diantaranya :

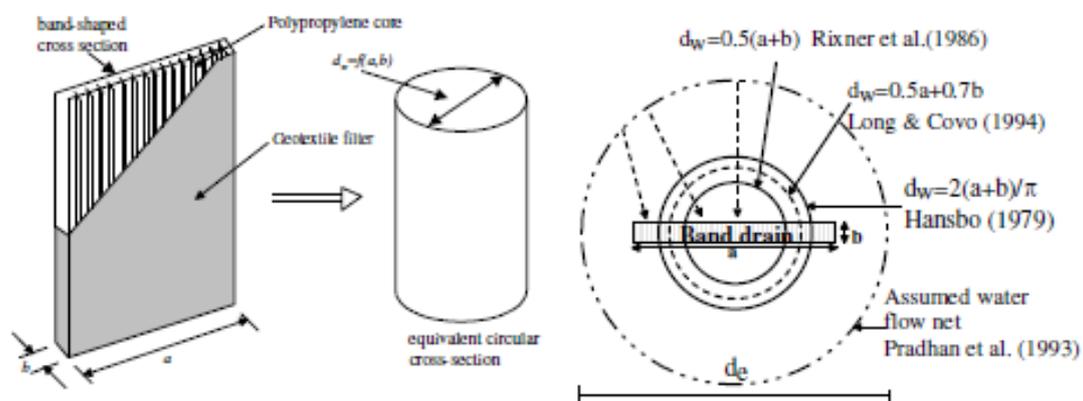
$$\lambda = \frac{c_c}{2,3 \cdot (1+e_0)} \quad (1)$$

Tabel 3 Parameter tanah lunak pada pemodelan numerik (*Modified Cam-clay*)

Titik Bor	Kedalaman (m)	Tipe Tanah	Kondisi Tanah	M	$\lambda$	$\kappa$	$\nu$	$e_0$	Koef.	
									Permeabilitas, $k_v$ (m/hari)	$c$ (kPa)
BM3	2,50-3,00	Very Soft	Undrained	1,2	0,16	0,01	0,3	2,02	$1,62 \times 10^{-3}$	6,3
	5,50-6,00	Very Soft		1,2	0,21	0,02	0,3	2,45	$0,18 \times 10^{-3}$	-
	8,50-9,00	Very Soft		1,2	0,15	0,01	0,3	1,72	$1,60 \times 10^{-3}$	3,2
	11,50-12,00	Soft		1,2	0,71	0,07	0,3	2,52	$0,89 \times 10^{-3}$	-
	14,50-15,00	Medium		1,18	0,21	0,02	0,3	1,93	$0,84 \times 10^{-3}$	-
	17,50-30,00	Very Stiff		1,08	0,18	0,02	0,3	0,57	$7,45 \times 10^{-3}$	20,5
BM4	2,50-3,00	Very Soft	Undrained	1,2	0,19	0,02	0,3	1,52	$1,33 \times 10^{-3}$	4,8
	5,50-6,00	Very Soft		1,2	0,18	0,02	0,3	1,28	$1,37 \times 10^{-3}$	4,4
	8,50-9,00	Very Soft		1,2	0,16	0,01	0,3	1,88	$1,18 \times 10^{-3}$	-
	11,50-12,00	Soft		1,2	0,80	0,08	0,3	2,06	$6,75 \times 10^{-3}$	1,2
	14,50-15,00	Medium		1,18	0,21	0,02	0,3	2,17	$1,13 \times 10^{-3}$	3,8
	17,50-30,00	Very Stiff		1,08	0,16	0,01	0,3	1,76	$1,79 \times 10^{-3}$	-

Tabel 4 Parameter tanah timbunan dalam pemodelan numerik (*Mohr Coloumb*)

E (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma_{un}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	$\nu$
10000	16	19	5	25	0.3



Gambar 4 Konsep ilustrasi ekuivalen diameter PVD dan zona drainase (Indraratna dkk, 2005)

$$\kappa = \frac{2.C_s}{2,3.(1+e_0)} \quad (2)$$

dengan  $\lambda$  adalah *modified compression index*, dan  $\kappa$  adalah *modified swelling index*.

Parameter yang digunakan dalam analisis numerik disajikan pada tabel 3 dan 4.

### Material PVD

Dalam Plaxis PVD dimodelkan dengan elemen *drain* dengan ketebalan nol (Sathananthan, 2005). Untuk memodelkan PVD dalam *plane strain*, ekuivalensi parameter PVD perlu dilakukan. PVD yang berbentuk segiempat perlu diekuivalensikan ke dalam bentuk silinder untuk mengetahui diameter drainase yang terpengaruh ( $D_e$ ). Adapun konsep ekuivalen diameter drainase dapat dilihat pada Gambar 4.

Menurut Hansbo (1981), Indraratna (2005) diameter zona pengaruh PVD dapat dihitung dengan persamaan berikut :

Pola segi empat

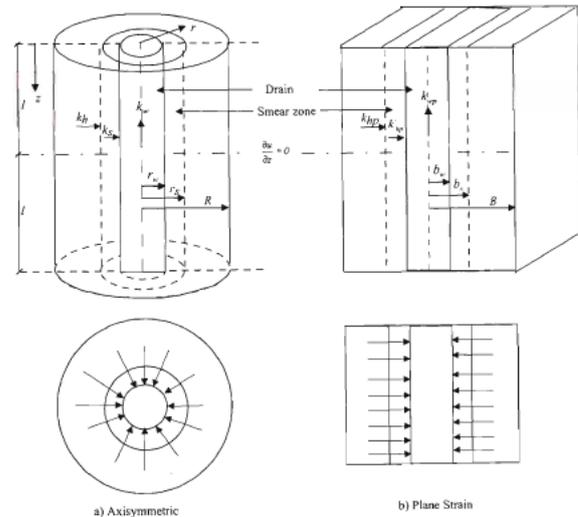
$$D_e = 1,128 S \quad (3)$$

Pola segitiga

$$D_e = 1,05 S \quad (4)$$

dengan  $S$  adalah jarak antar PVD (*spacing PVD*).

Bentuk PVD yang telah diekuivalensikan ke dalam bentuk silinder, perlu di konversi menjadi model *plane strain*. Dengan adanya PVD maka, akan mempengaruhi besarnya koefisien permeabilitas tanah disekitarnya (Gambar 5).



Gambar 5 Konversi axisymetrik bentuk PVD ke model *plane strain* (Indraratna dan Redana, 2000)

Menurut Russell (1992) konversi spasi drain dari asimetri ke *plane strain* dapat ditentukan melalui persamaan :

$$B = R \sqrt{\frac{3}{2} (\ln(n) - \frac{3}{4})} \quad (5)$$

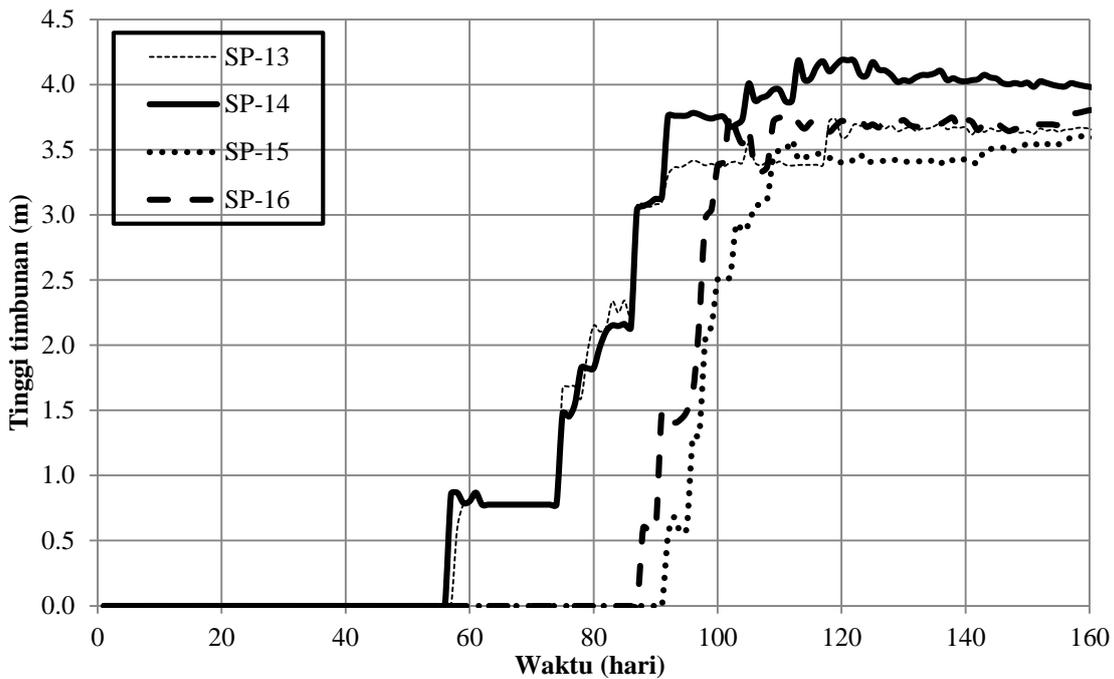
dimana,  $n = D_e/d_w$ , dan  $R$  adalah radius dari unit PVD ( $0,5 D_e$ ). Pada Tabel 5 parameter PVD yang digunakan dalam pemodelan dirangkum.

### Tahap Kontruksi (Simulasi)

Tahapan kontruksi dalam pemodelan dibuat dengan menyesuaikan kontruksi timbunan di lapangan. Hubungan waktu dan tinggi timbunan menjadi dasar dalam penentuan tahapan kontruksi. Gambar 6 menunjukkan tahapan kontruksi timbunan

Tabel 5 Parameter PVD dalam pemodelan numerik

Parameter	Simbol	Nilai
Diameter Drain (mm)	$d_w$	66
Diameter unit sel	$D_e$	1,3
$D_e/d_w$	$n$	18,5
Diameter unit sel pada kondisi plane strain	$B$	2,6
Smear zone diameter	$d_s$	-
Ratio of $k_h$ over $k_s$ in field	$(k_h/k_s)\phi$	-
$d_s/d_w$	$s$	-

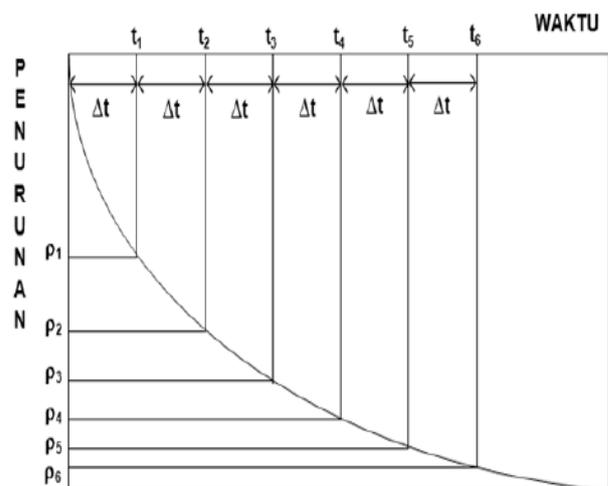


Gambar 6 Grafik hubungan tinggi timbunan dan waktu

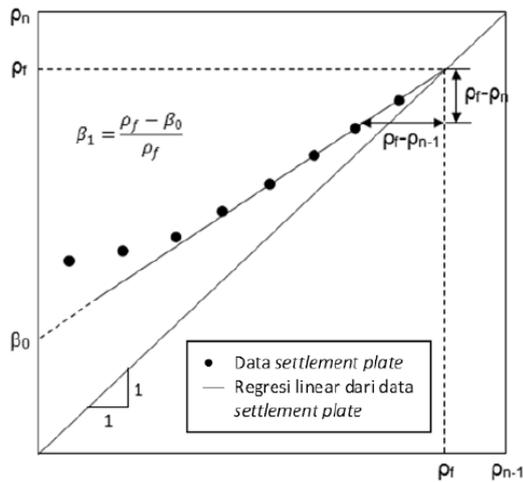
yang dilaksanakan di proyek perbaikan tanah pada perluasan Bandar udara Ahmad Yani Semarang.

### 5 Analisis Penurunan Metode Observasi Asaoka

Metode grafis diadopsi untuk menganalisis penurunan tanah akhir (*settlement final*) dalam metode observasi Asaoka. Pengukuran dan pembacaan data penurunan tanah dilapangan yang dilakukan dengan instrumen *settlement plate* dipilih pada interval waktu  $\Delta t$  yang konstan sehingga diperoleh nilai penurunan  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$  (Gambar 7). Kemudian nilai  $\rho_n$  (sumbu-y) dan nilai  $\rho_{n-1}$  (sumbu-x) diplot sehingga akan diperoleh titik-titik yang membentuk garis lurus lurus. Penurunan akhir ( $\rho_f$ ) adalah titik pertemuan antara garis  $\rho_n = \rho_{n-1}$  (bersudut  $45^\circ$ ) dengan trendline dari garis  $\rho_n$  vs  $\rho_{n-1}$  sebenarnya (Gambar 8).



Gambar 7 Prosedur analisis data monitoring penurunan dengan interval waktu yang konstan (Asaoka, 1978)



Gambar 8 Prediksi penurunan akhir berdasarkan hasil pengukuran langsung di lapangan (Asaoka, 1978)

## 6 Hasil dan Pembahasan

### Penurunan Akhir berdasarkan Metode Asaoka

Dari pengamatan penurunan harian langsung di lapangan pada *settlement plate* SP-13, 14, 15 dan 16 dapat diplot grafik antara penurunan waktu  $n$  ( $\rho_n$ ) pada sumbu-y dan penurunan pada waktu  $n-1$  ( $\rho_{n-1}$ ) pada sumbu-x untuk masing-masing tahap timbunan. Perpotongan trendline linear dari titik plot grafik didapatkan nilai penurunan akhir (*settlement final*) untuk masing-masing *settlement plate* (Gambar A.1 hingga A.2 pada Lampiran A)

Nilai penurunan akhir hasil analisis grafik kemudian dibandingkan dengan hasil pembacaan langsung di lapangan untuk mendapatkan persentase keakuratan hasil prediksi. Perbandingan kedua data disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6 Persentase rasio penurunan akhir metode Asaoka dan lapangan

Titik Bor	Titik SP	Prediksi Penurunan (mm)	Penurunan	Rasio (%)
			di Lapangan (mm)	
BM-03	SP-13	1620	1637	99,0
	SP-14	1840	1860	98,9
BM-04	SP-15	1710	1701	100,5
	SP-16	2010	1929	104,2

### Perilaku Penurunan Hasil Pemodelan Numerik

Perilaku penurunan tanah yang terjadi diamati dengan membandingkan data hasil pemodelan dan pengamatan langsung di lapangan. Perilaku yang diamati berupa hubungan antara besar penurunan terhadap waktu. Gambar A.5 hingga A.8 menunjukkan perilaku penurunan tanah pada titik *settlement plate* SP-13, 14, 15 dan 16.

Grafik tersebut merupakan hasil pemodelan yang dilakukan dengan variasi nilai permeabilitas ( $k$ ) dari nilai permeabilitas laboratorium yang dibandingkan dengan data pemodelan yang digunakan (Tabel 7)

Tabel 7 Variasi nilai  $k$  dalam pemodelan

Model	1	2	3	4	5
Rasio $k_{ve}/k_v$	1/1	1/5	1/10	1/20	1/100

Ket :  $k_{ve}$  = nilai permeabilitas dalam pemodelan,  $k_v$  = nilai permeabilitas laboratorium.

Pada Gambar A.5 dan A.6 perilaku penurunan ditunjukkan melalui hasil pemodelan yang dibandingkan dengan data lapangan untuk tanah di BM-03 yaitu pada *settlement plate* SP-13 dan SP-14. Dari hasil pemodelan numerik di titik SP-13, perilaku penurunan tanah yang paling mendekati kondisi lapangan yaitu pada model 3 dengan  $k_{ve} = 10 k_v$ , sedangkan pada titik SP-14 perilaku penurunan yang mendekati kondisi lapangan terdapat pada model 4 dengan  $k_{ve} = 20 k_v$ . Namun, perilaku pada model 3 dengan data tanah BM-04 menunjukkan kedekatan data dengan kondisi lapangan. Hal tersebut menunjukkan parameter tanah di titik SP-14 tidak bisa menggunakan BM-03, posisi titik SP-14 yang berada di tengah-tengah BM-03 dan BM-04 sehingga ada kemungkinan perubahan parameter tanah dari BM-03 ke BM-04, atau dengan kata lain parameter tanah di titik SP-14 adalah nilai tengah dari parameter BM-03 dan BM-04.

Hal serupa juga terjadi pada pemodelan di titik SP-15 (BM-04), perilaku penurunan pada model 3 yang paling mendekati kondisi lapangan dengan  $k_{ve} = 10 k_v$ , dan pada titik SP-16, hasil model 4 yang mendekati kondisi

Tabel 8 Prediksi penurunan akhir dengan pemodelan numerik

Titik bor	Titik SP	Penurunan akhir numerik untuk masing-masing model (mm)					Penurunan akhir lapangan (mm)	Rasio (%)
		1	2	3	4	5		
BM-03	SP-13	1580	1580	1580	1580	1580	1637	96,5
	SP-14	1575	1575	1575	1574	1576	1860	84,7
BM-04	SP-15	1748	1742	1746	1748	1745	1701	102,6
	SP-16	1758	1755	1753	1752	1750	1929	90,9

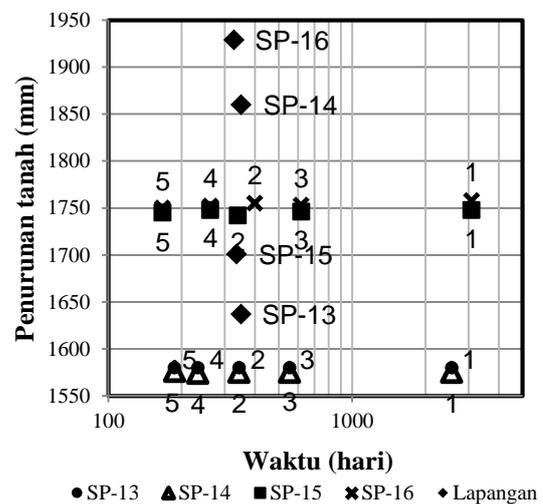
Tabel 9 Prediksi waktu untuk mencapai tekanan air pori minimum

Titik Bor		BM-03		BM-04	
Titik SP		SP-13	SP-14	SP-15	SP-16
Lapangan	$t_f$ (hari)	351	351	336	326
Model 1	$t_f$ (hari)	2560	2559	3086	3089
	(%)	729,3	729,1	918,5	941,8
Model 2	$t_f$ (hari)	344	344	340	399
	(%)	98,0	98,0	101,2	121,6
Model 3	$t_f$ (hari)	554	554	618	617
	(%)	157,8	157,8	183,9	188,1
Model 4	$t_f$ (hari)	233	233	262	262
	(%)	66,4	66,4	78,0	79,9
Model 5	$t_f$ (hari)	187	187	167	167
	(%)	53,3	53,3	49,7	50,9

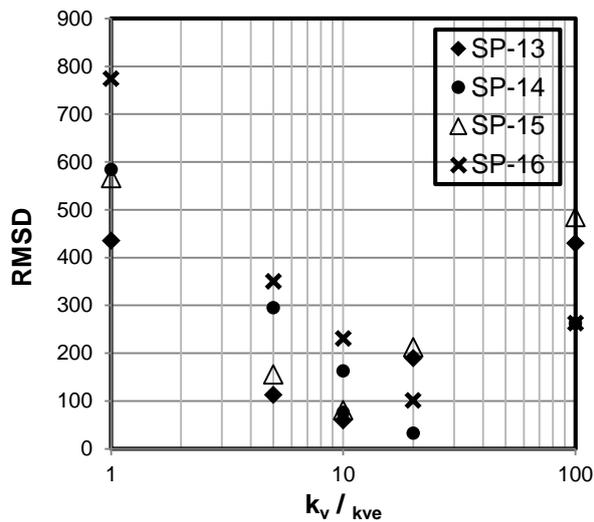
lapangan dengan  $k_{ve} = 20 k_v$ . Berdasarkan perilaku yang berbeda pada titik SP-16 dimungkinkan hal serupa pada titik SP-14 terjadi pada titik SP-16 yaitu parameter tanah di titik SP-16 tidak sesuai dengan parameter tanah pada SP-15 yang menggunakan data tanah BM-04, karena tanah bersifat sangat heterogen, sehingga perilaku penurunan pada titik SP-14 dan SP-16 tidak sesuai kondisi lapangan, karena data tanah di kedua titik dianggap sama dengan titik SP-13 (BM-03) dan SP-15 (BM-04).

Hasil analisis penurunan akhir dari pemodelan numerik menunjukkan kedekatan data untuk semua model (Tabel 8) dengan perbedaan data <5% dari data aktual, namun persentase yang paling mendekati kondisi lapangan terdapat pada titik SP-13 dan SP-15 melihat kedua titik paling berdekatan dengan BM-03 dan BM-04 sehingga parameter tanah yang digunakan dalam pemodelan paling mendekati kondisi aktual di lapangan. Waktu untuk mencapai penurunan akhir (tekanan air pori minimum) juga dibandingkan dengan data lapangan untuk mengetahui kesesuaian pemodelan yang digunakan. Berdasarkan hasil pemodelan numerik, data waktu yang paling

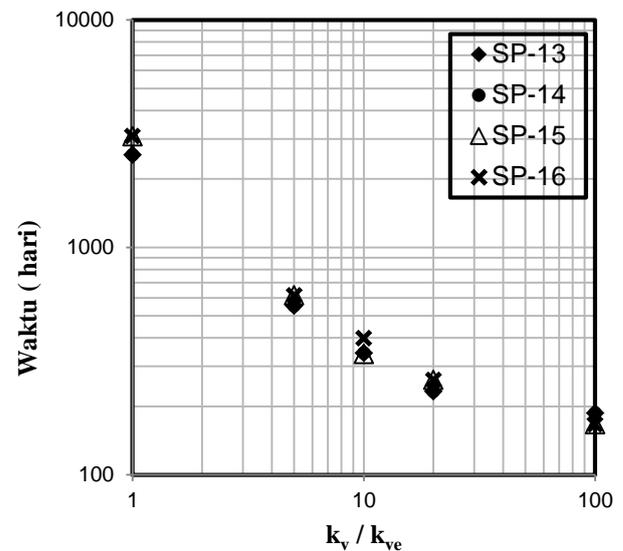
mendekati kondisi lapangan didapatkan pada model 2 (Tabel 9) dan gambar 17.



Gambar 17 Prediksi waktu untuk mencapai tekanan air pori minimum dengan pemodelan numerik di titik SP-13, 14, 15 dan 16



Gambar 18 Hubungan RSMD dengan variasi nilai k



Gambar 19 Hubungan nilai k dengan waktu

Tabel 10 Nilai RMSD pada perilaku penurunan pada tiap variasi k

$k_{ve}/k_v$	RSMD (%)			
	SP-13	SP-14	SP-15	SP-16
1	436.0	584.5	566.8	775.0
5	113.1	295.6	156.2	350.7
10	59.8	163.6	81.5	231.0
20	190.1	33.3	213.0	101.8
100	430.3	262.7	485.6	263.4

Dari perilaku penurunan tanah, nilai penurunan akhir dan waktu untuk mencapai tekanan air pori minimum, pemodelan yang paling menunjukkan kedekatan data yaitu model 2 dengan nilai  $k_{ve} = 10 k_v$  dengan nilai RSMD sebesar 59,8% dan 81,5% untuk masing-masing data di titik SP-13 dan SP-15.

### Pengaruh nilai permeabilitas tanah dalam pemodelan

Dalam pemodelan variasi nilai permeabilitas ( $k$ ) memberikan hasil yang berbeda-beda untuk setiap nilai  $k$ . Gambar 19, menunjukkan pengaruh nilai  $k$  terhadap waktu sangat signifikan. Semakin besar nilai permeabilitas, maka waktu untuk mencapai tekanan air pori minimum semakin kecil. Sesuai gambar 17, waktu untuk mencapai tekanan air pori minimum yang mendekati kondisi lapangan terdapat pada model 2.

## 7 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis penurunan tanah dengan metode numerik dan metode Asaoka, dapat disimpulkan bahwa :

1. Estimasi penurunan akhir yang didapatkan dari metode Asaoka menunjukkan kedekatan dengan penurunan aktual di lapangan dengan persentase hampir 100% dengan perbedaan  $<5\%$ . Nilai penurunan akhir diperoleh dari pengamatan penurunan awal di lapangan sampai pada timbunan mencapai *top preload*. Hasil prediksi sangat bergantung pada data pengamatan penurunan yang ada. Hasil prediksi pemodelan numerik juga menunjukkan kedekatan, ditunjukkan dari besarnya estimasi penurunan akhir dan waktu untuk mencapai tekanan air pori minimum mendekati data aktual, dengan persentase perbandingan besar penurunan akhir (*final settlement*) sebesar 96,5% dan 102,6% untuk masing-masing titik SP-13 dan SP-15 dengan perbedaan  $<5\%$ . Persentase perbandingan waktu untuk mencapai tekanan air pori minimum sebesar 98% dan 101,2% untuk masing-masing titik SP-13 dan SP-15.
2. Perilaku penurunan hasil pemodelan numerik menunjukkan kedekatan dengan kondisi lapangan untuk model 2 dengan nilai  $k_{ve} = 10 k_v$ , di titik SP-13 dan SP-15 disebabkan letak kedua titik yang dekat dengan penyelidikan tanah di titik BM-03 dan BM-04 sehingga parameter yang

- digunakan dianggap cukup akurat sehingga perilaku penurunan tanah pada titik SP-13 dan SP-15 menunjukkan kecocokan dengan perilaku penurunan aktual dibandingkan dengan titik SP-14 dan SP-16.
3. Variasi nilai permeabilitas tanah ( $k$ ) pada pemodelan memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap waktu untuk tanah mencapai tekanan air pori minimum, namun tidak begitu memberikan pengaruh terhadap besarnya nilai penurunan akhir (*final settlement*). Pada pemodelan nilai  $k$  yang digunakan lebih besar dari pada nilai  $k$  laboratorium yaitu 10 kali nilai  $k$  laboratorium, hal ini menunjukkan dengan adanya PVD waktu untuk tanah mencapai tekanan air pori minimum relatif lebih cepat dibandingkan dengan tanpa PVD.
- Improvement-Case Histories Book (Volume 3), Edited by Indraratna, B. and Chu, J., Elsevier, London, Chapter 2. pp. 61-106
- Muntohar, A.S, 2009, *Mekanika Tanah*, LP3M, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
- Nawir, H., Apoji, D., Fatimatuzahro, R., Pamudji, M.D., 2012, *Prediksi Penurunan Tanah Menggunakan Prosedur Observasi Asaoka Studi Kasus : Timbunan di Bontang, Kalimantan Timur*, Jurnal Teknik Sipil, Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil, Vol. 19, pp 133-148
- Russell, D., 1992, *Finite Element Analysis of Soil Containing Vertical Drains*, Ground Engineering, pp. 20-24
- Sathananthan, I., 2005, *Modeling of Vertical Drains with Smear Installed in Soft Clay*, Doctor of Philosophy thesis, School of Civil, Mining, and Environmental Engineering, University of Wollongong

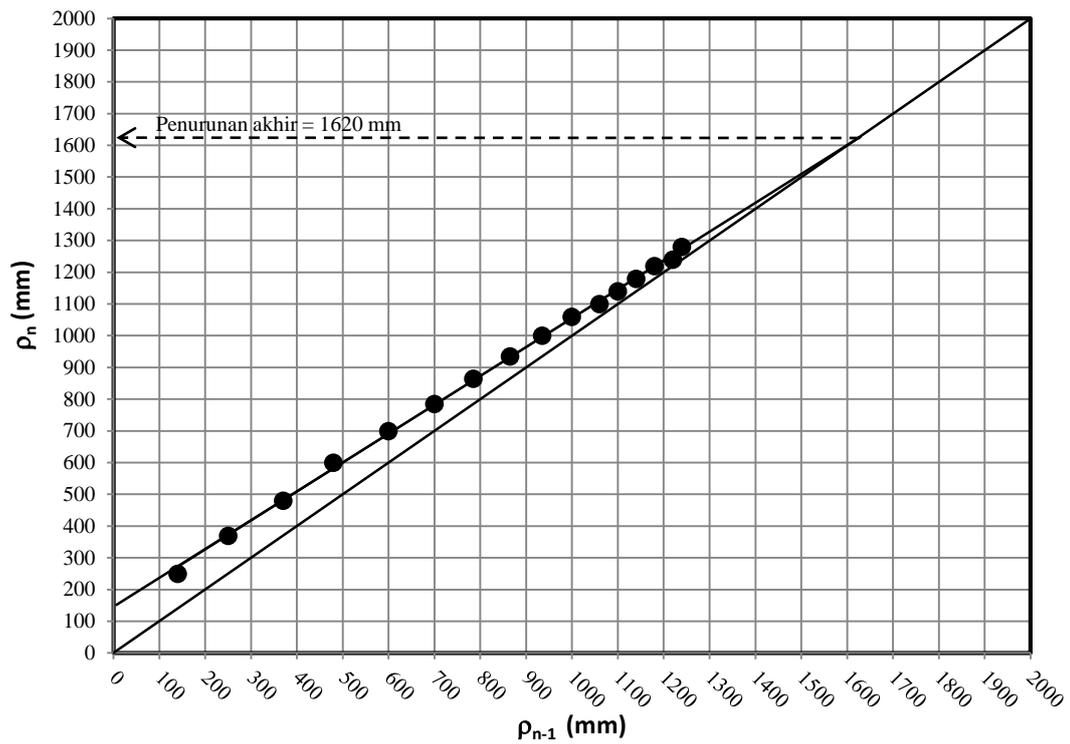
### UCAPAN TERIMA KASIH

Data pada naskah yang disajikan merupakan data proyek dari *PT. Teknindo Geosistem Unggul* yang berperan sebagai kontraktor di bidang geoteknik pada proyek perluasan Bandar udara Ahmad Yani Semarang, tahun 2012-2013. Terima kasih disampaikan kepada *Ir. Wahyu P. Kuswanda* yang telah mendukung penelitian ini dengan memberikan data proyek yang lengkap.

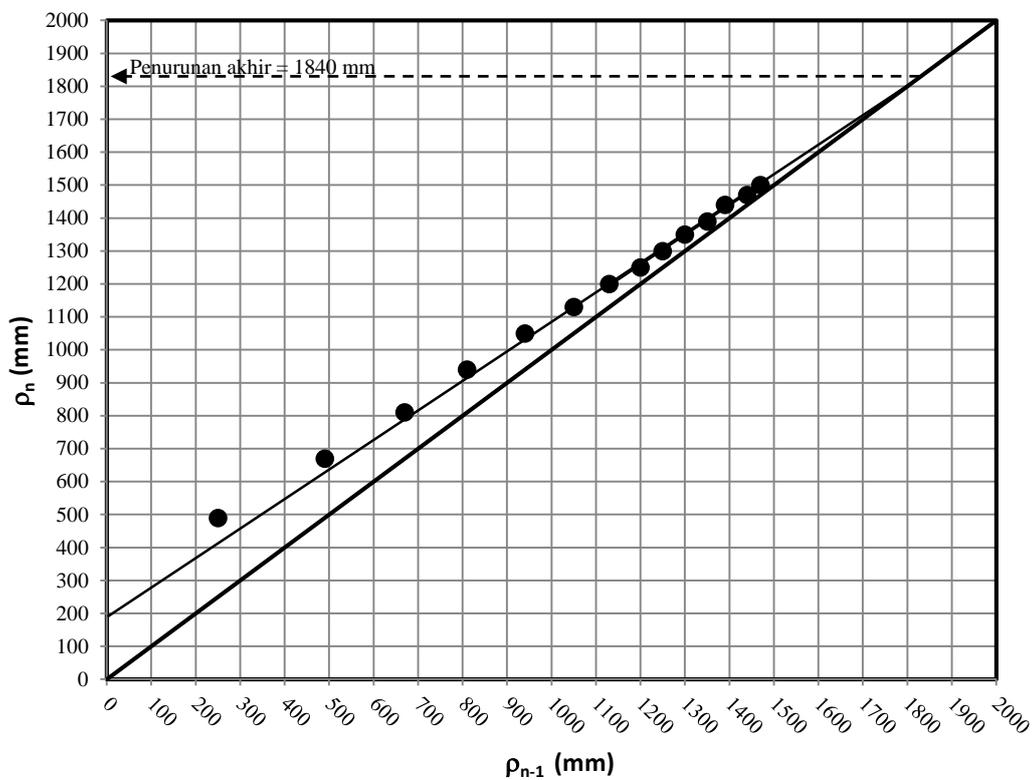
### 7 DAFTAR PUSTAKA

- Asaoka, A., 1978, *Observational Procedure of Settlement Prediction*, Soil and Foundation, No.4.
- Hansbo, S., 1981, *Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains*, In Proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Balkema, Rotterdam, 3, pp. 677-682
- Indraratna, B., Redana, I.W., 2000, *Numerical modeling of vertical drains with smear and well resistance installed in soft clay*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 37, pp. 132-145
- Indraratna, B., Sathananthan, I., Bamunawita, C., Balasubramaniam, 2005, *Theoretical and Numerical Perspectives and Field Observations for the Design and Performance Evaluation of Embankments Constructed on Soft Marine Clay*, Ground

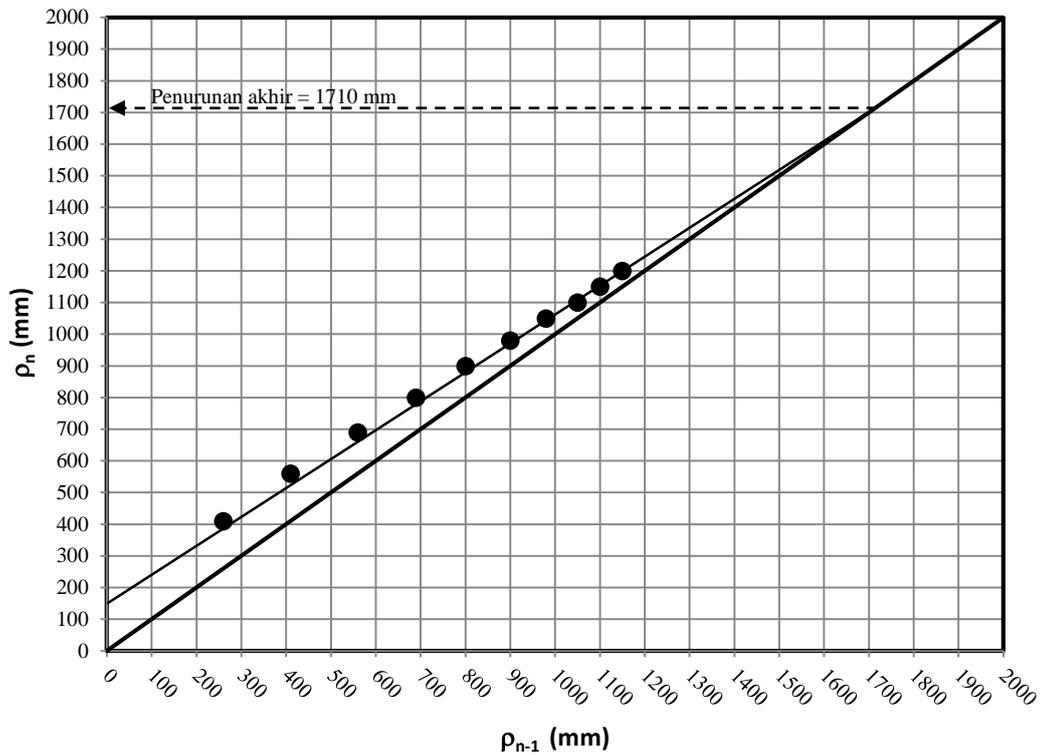
Lampiran A:



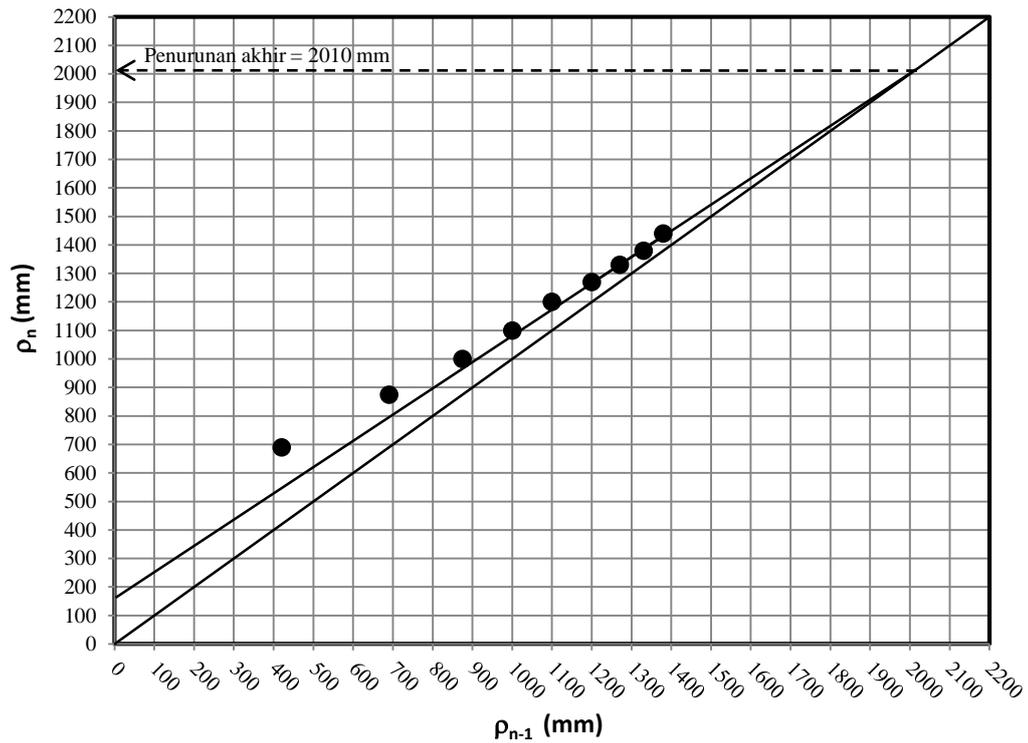
Gambar A.1 Estimasi penurunan dengan metode Asaoka pada titik SP-13



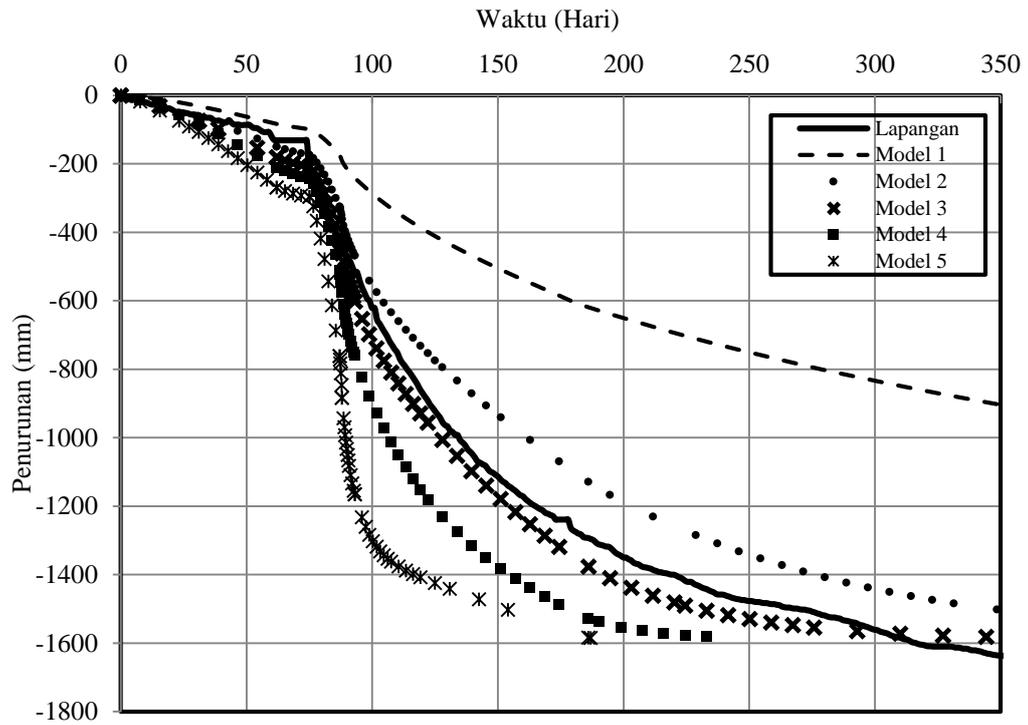
Gambar A.2 Estimasi penurunan dengan metode Asaoka pada titik SP-14



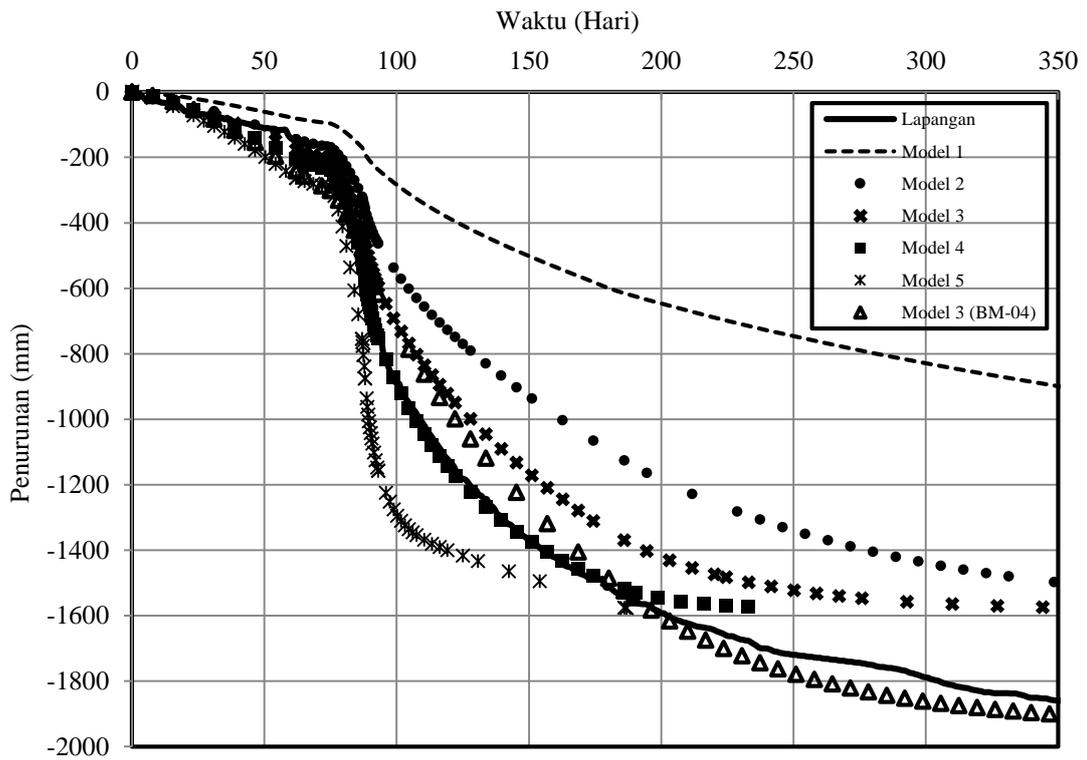
Gambar A.3 Estimasi penurunan dengan metode Asaoka pada titik SP-15



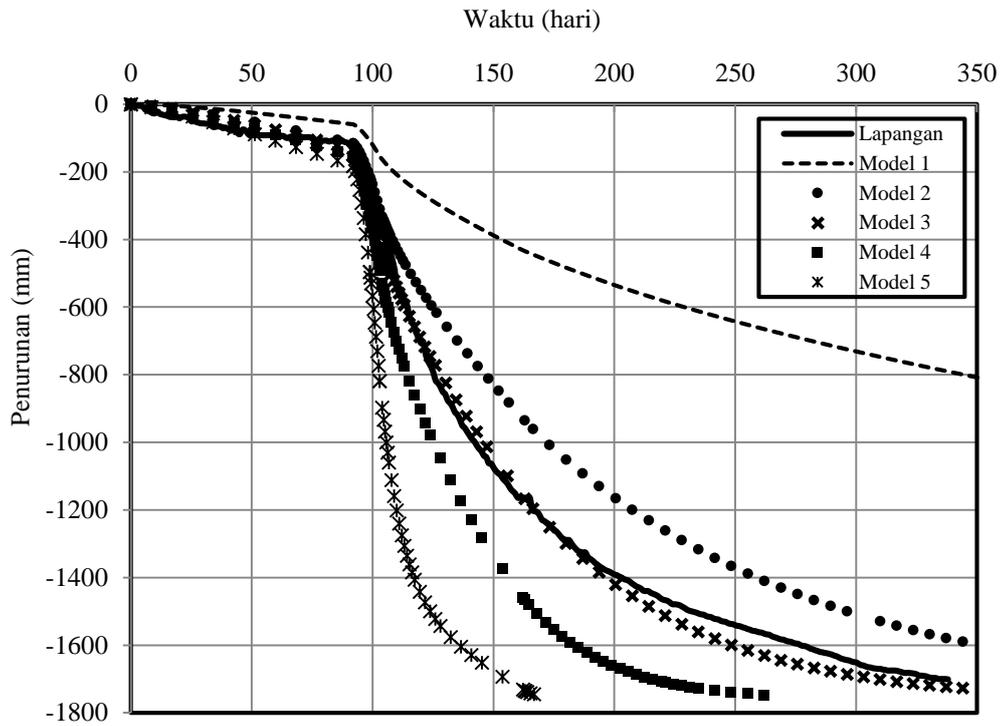
Gambar A.4 Estimasi penurunan dengan metode Asaoka pada titik SP-16



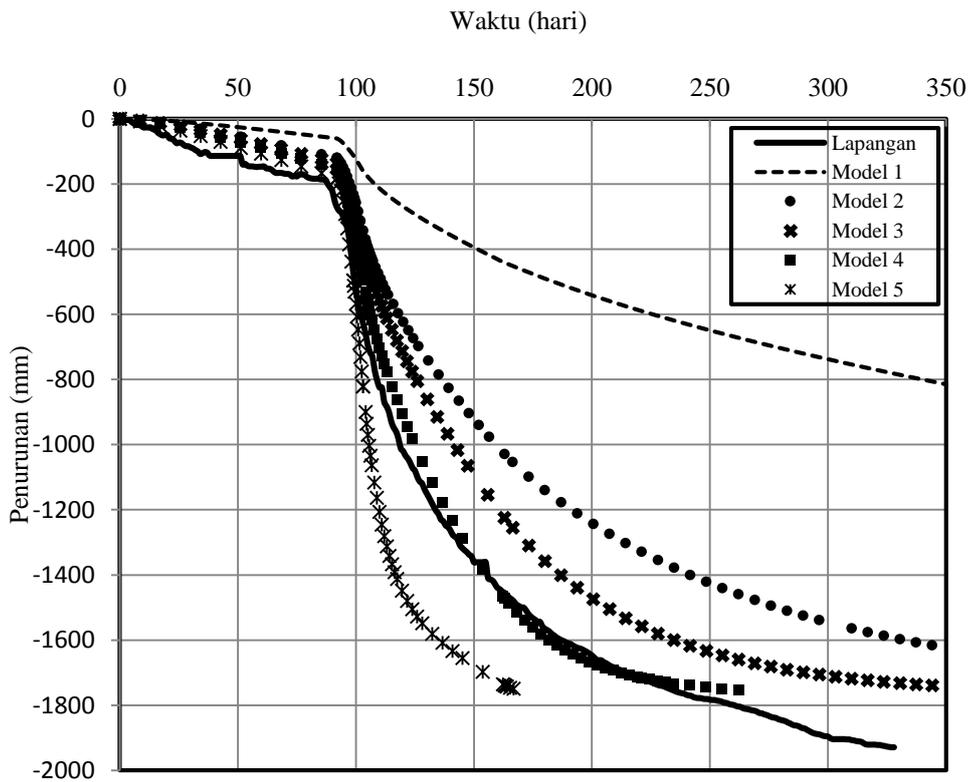
Gambar A.5 Kurva penurunan terhadap waktu hasil pemodelan pada titik SP-13



Gambar A.6 Kurva penurunan terhadap waktu hasil pemodelan pada titik SP-14



Gambar A.7 Kurva penurunan terhadap waktu hasil pemodelan pada titik SP-15



Gambar A.8 Kurva penurunan terhadap waktu hasil pemodelan pada titik SP-16