

# JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

## Prediksi Penurunan Tanah Menggunakan Prosedur Observasi Asaoka Studi Kasus: Timbunan di Bontang, Kalimantan Timur

**Hasbullah Nawir**

Kelompok Keahlian Rekayasa Geoteknik, Program studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan  
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No. 10 Bandung 40132  
E-mail: hasbullah@si.itb.ac.id; hnawir@yahoo.com

**Dayu Apoji**

Program Magister Rekayasa Geoteknik, Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan - Institut Teknologi Bandung  
Jl. Ganesa No. 10 Bandung 40132, E-mail: dayu.apoji@gmail.com

**Rahmatyar Fatimatuzahro**

Program Magister Rekayasa Geoteknik, Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan - Institut Teknologi Bandung  
Jl. Ganesa No. 10 Bandung 40132, E-mail: rahmatyar.fatimatuzahro@yahoo.com

**M. Dwi Pamudji**

Program Magister Rekayasa Geoteknik, Program Studi Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan - Institut Teknologi Bandung  
Jl. Ganesa No. 10 Bandung 40132, E-mail: dwipamudji@gmail.com

### Abstrak

*Penurunan konsolidasi tanah merupakan masalah geoteknik yang sering ditemukan pada kasus timbunan, terutama pada tanah lunak. Penurunan konsolidasi disebabkan oleh keluarnya air pori dari dalam tanah yang disebabkan oleh peningkatan tegangan pada massa tanah. Untuk memprediksi besar penurunan serta lama waktu konsolidasi umumnya digunakan teori konsolidasi satu dimensi Terzaghi. Prediksi penurunan konsolidasi dengan teori ini, pada banyak kasus, memberikan hasil yang lebih besar dari penurunan aktual. Hal ini, salah satunya, disebabkan adanya pengabaian fenomena perkuatan tanah yang mungkin terjadi akibat proses penimbunan secara bertahap. Selain teori tersebut terdapat pula prediksi penurunan tanah dengan metode elemen hingga yang sudah menganalisis penurunan secara dua dimensi bahkan tiga dimensi. Namun untuk metode ini prediksi penurunan terhadap waktu, terutama untuk kasus perbaikan tanah dengan drainase vertikal, metode ini tidak memberikan hasil yang baik. Observasi Asaoka. Melalui prosedur ini, besarnya penurunan akhir dapat diprediksi dengan menggunakan data observasi penurunan akibat timbunan dengan menggunakan metoda curve fitting. Studi ini juga membahas perbandingan metode perhitungan penurunan dengan menggunakan teori konsolidasi Terzaghi, metode elemen hingga dan metode observasi Asaoka.*

**Kata-kata Kunci:** *Prediksi penurunan, konsolidasi, terzaghi, metode elemen hingga, teori asaoka.*

### Abstract

*Consolidation settlement is a general geotechnical problem found embankment, particularly those founded on soft soil. Consolidation settlement is caused by the discharge of soil pore water induced by the increas of stress in soil mass. Terzaghi one dimensional theory was used to predict the settlement and time rate of consolidation. In many cases, the settlement prediction from this theory provides results much greater than the observed value due to many factors including the neglecton of soil strength gain that may occur during consolidation process. In addition, there is also settlement prediction by using observed settlement data from the site using curve fitting method. This study presents settlement prediction method using Terzaghi consolidation theory, finite element method and Asaoka observational method.*

**Keywords:** *Settlement prediction, consolidation, terzaghi, finite element method, asaoka theory*

### 1. Pendahuluan

Konsolidasi merupakan fenomena dalam mekanika tanah yang sering menimbulkan permasalahan geoteknik. Konsolidasi tanah adalah peristiwa penurunan tanah akibat terdisipasinya eksese air pori yang berlangsung pada waktu yang lama. Tanah merupakan suatu material multifase yang terdiri dari partikel tanah padat, air, serta udara. Pemberian beban pada tanah, akan menyebabkan meningkatnya tegangan yang bekerja pada tanah tersebut. Tegangan tambahan yang bekerja pada tanah pada awalnya akan dipikul oleh air pori karena sifat *incompressible* air. Hal ini akan menyebabkan timbulnya eksese air pori. Eksese air pori ini akan terdisipasi dengan mengalir keluarnya air pori tanah melalui pori-pori tanah, sementara tegangan tambahan yang awalnya dipikul air pori secara gradual ditransfer ke partikel tanah padat. Hal ini akan mengakibatkan berkurangnya volume tanah sehingga menyebabkan terjadinya penurunan konsolidasi.

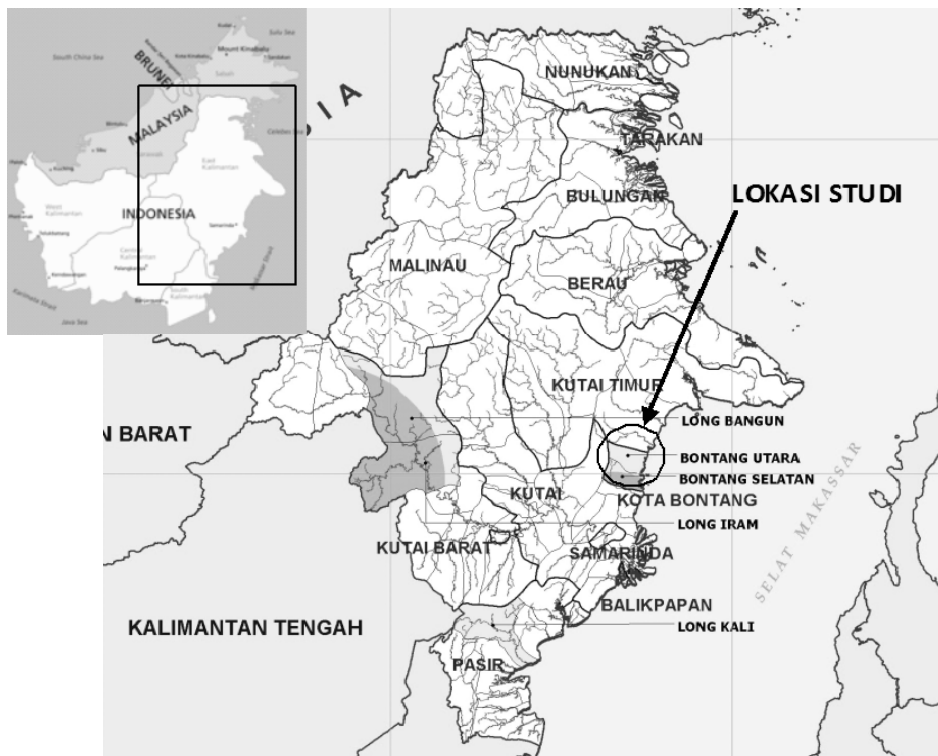
Teori konsolidasi satu dimensi Terzaghi (1943) telah lama dipergunakan untuk memprediksi penurunan serta waktu konsolidasi. Teori ini sudah sangat lazim dipergunakan dan dianggap dapat menjelaskan penurunan akibat kompresi dan drainase satu dimensi pada tanah secara baik. Akan tetapi dalam banyak kasus, estimasi penurunan konsolidasi dengan teori Terzaghi memberikan hasil yang jauh lebih besar daripada penurunan aktual di lapangan. Adanya pengabaian dari beberapa faktor terkait dengan metode pelaksanaan penimbunan adalah penyebab ketidakakuratan ini. Perkuatan tanah (*gained strength*) yang terjadi akibat proses penimbu-

nan bertahap (*stage construction*), perubahan tingkat kejenuhan (*wetting effects*), rangkak (*creep strain*), merupakan faktor-faktor yang kerap tidak diperhitungkan dalam estimasi penurunan konsolidasi.

Selain teori satu dimensi, terdapat pula prosedur dalam analisis penurunan tanah berdasarkan observasi lapangan (Asaoka, 1978). Melalui prosedur 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.

Pada studi ini, besarnya prediksi penurunan tanah akibat suatu kasus timbunan dianalisis dengan menggunakan prosedur observasi Asaoka yang diperoleh setelah data penurunan didapatkan, kemudian dilakukan *curve fitting*. Beberapa parameter yang dipergunakan pada perhitungan konsolidasi satu dimensi Terzaghi akan dikoreksi oleh penurunan konsolidasi aktual yang terjadi di lapangan, yang didapatkan dengan metode observasi Asaoka. Untuk memprediksi lama waktu konsolidasi digunakan persamaan yang dimodifikasi dari Hausmann (1990). Persamaan modifikasi ini merupakan pengembangan dari metode Asaoka untuk kasus tanah yang diberi perbaikan berupa *vertical drain*.

Penimbunan tanah dilakukan di Bontang Utara, Provinsi Kalimantan Timur pada proyek perluasan lahan pabrik dengan luas sekitar 7,1 ha. Elevasi awal lahan berkisar antara +97.800 hingga +102.20 (rata-rata elevasi +98.90). Lahan tersebut dipersiapkan menjadi lahan pabrik dengan elevasi +100.00.



Gambar 1. Peta lokasi studi kasus

## 2. Kondisi Geoteknik Lokasi

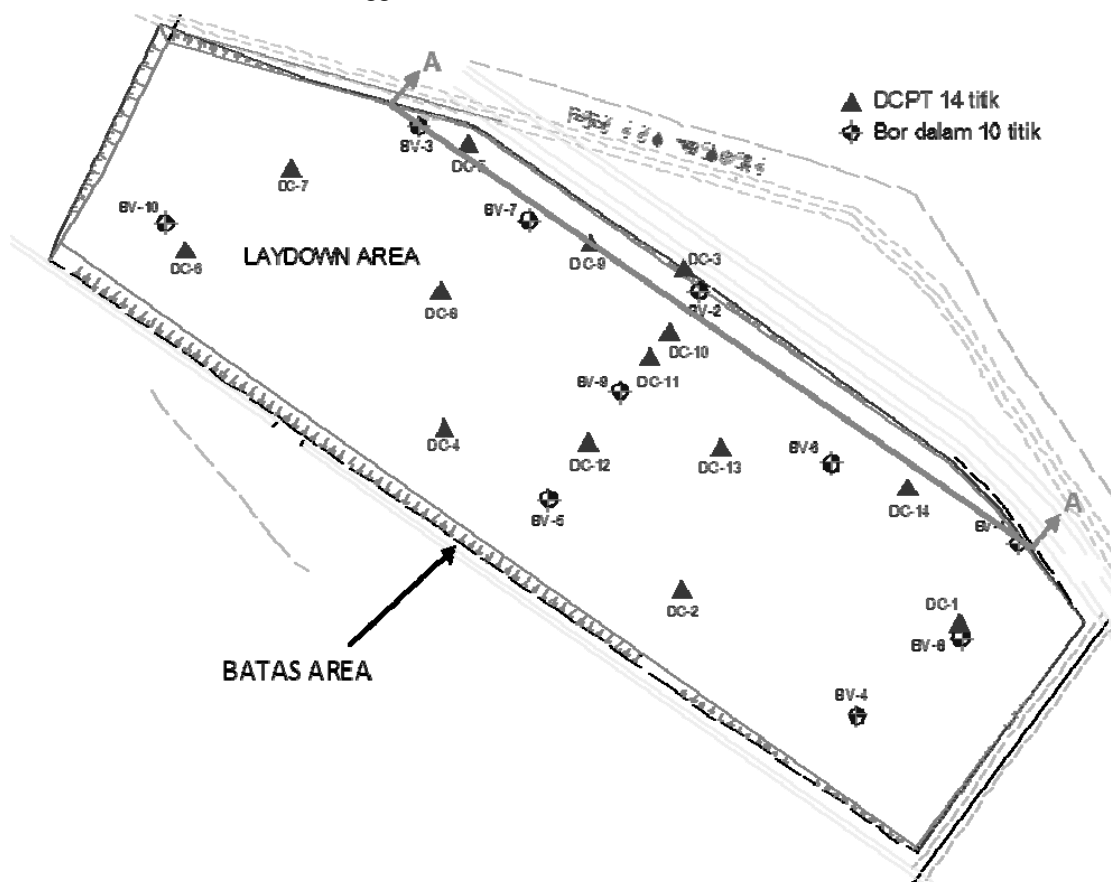
Untuk mendapatkan parameter dan kondisi pelapisan tanah, telah dilakukan penyelidikan tanah di lokasi studi kasus yang terdiri atas pemboran dalam dan *Standard Penetration Test* (SPT) di 10 titik dengan kedalaman bervariasi antara 40.45 m hingga 50.45 m serta *Cone Penetration Test* (CPT) di 14 titik dengan kedalaman bervariasi antara 12 m hingga 30 m. Sementara penyelidikan tanah di laboratorium terdiri dari uji indeks properti tanah, analisis distribusi ukuran butiran tanah, uji kuat geser tanah, dan uji konsolidasi. Lokasi penyelidikan tanah yang dilakukan ditampilkan pada **Gambar 2**.

Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil penyelidikan tanah tersebut, diketahui bahwa lapisan tanah pada lokasi proyek pada umumnya cukup seragam dan terdiri dari tiga lapisan tanah utama (yang ditandai dengan nomor pada **Gambar 3**), yaitu:

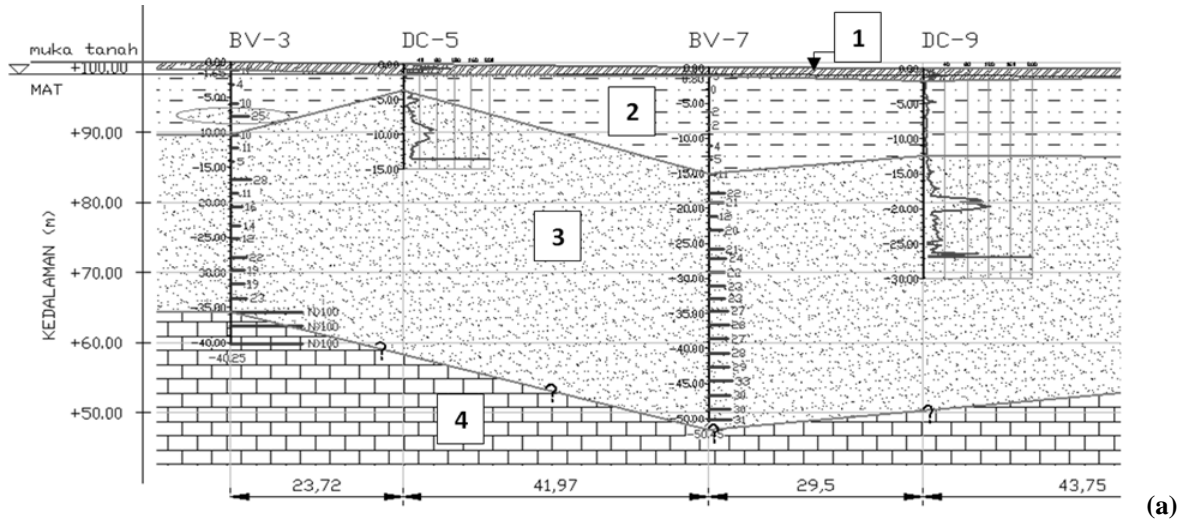
1. Lapisan tanah permukaan pada umumnya berupa *fill material* dengan ukuran butiran serta konsistensi yang bervariasi dari pasir halus dengan konsistensi *loose*, hingga tanah butiran (*coarse grained*) dengan konsistensi semi padat (*medium dense*). Lapisan tanah ini memiliki ketebalan yang bervariasi mulai dari 2 m hingga 5 m dengan variasi nilai N-SPT mulai dari 6 hingga 15.

2. Di beberapa titik bor, dijumpai lapisan lempung organik dengan konsistensi sangat lunak yang terdapat pada lapisan dibawah lapisan permukaan. Dari penyelidikan tanah yang dilakukan, diketahui bahwa tanah di lokasi titik bor BV-2, BV-6, dan BV-7 memiliki lapisan tanah lunak yang mencapai 12 m.
3. Lapisan tanah ketiga umumnya berupa lapisan lempung dengan konsistensi kaku (*stiff*) hingga keras (*hard*). Lapisan tanah ini dijumpai mulai dari kedalaman 6 m di bawah permukaan tanah. Lapisan ini memiliki nilai N-SPT mulai dari 10 hingga 50.
4. Lapisan tanah paling bawah adalah *hard soil* dengan nilai N-SPT > 32.
5. Tinggi muka air tanah sepanjang penampang A-A bervariasi dari kedalaman -0.80 m pada lokasi BV-7 hingga kedalaman -2.1 m pada lokasi BV-1.

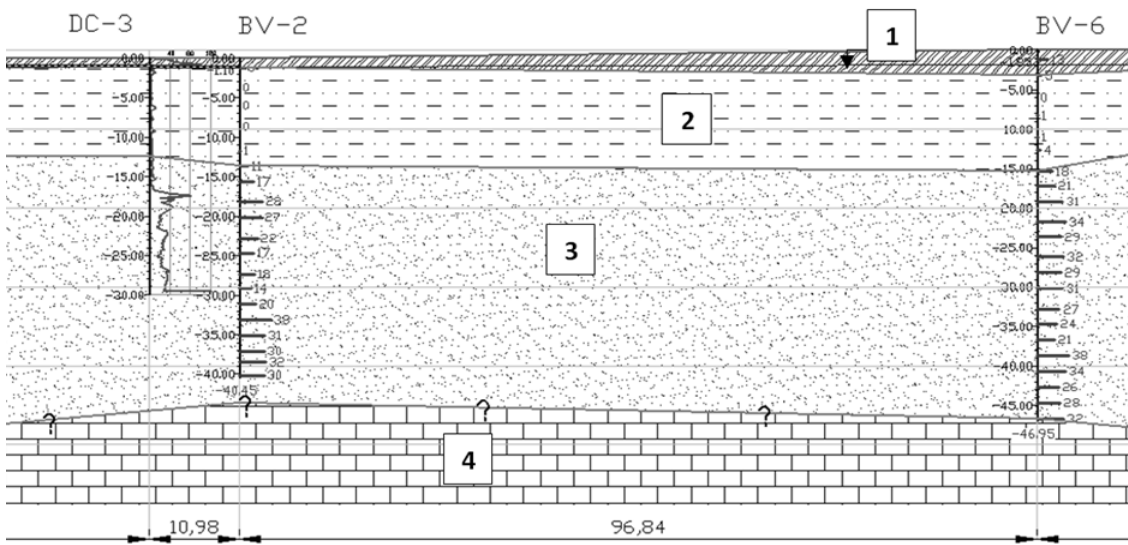
Pada studi ini, analisis penurunan tanah dengan prosedur observasi Asaoka dilakukan di lokasi dengan lapisan tanah lempung lunak yang tebal, yaitu pada sekitar lokasi titik bor BV-2 dan BV-6. Profil per lapisan tanah serta parameter-parameter fisik dan konsolidasi di sepanjang penampang A-A ditampilkan pada **Gambar 3** dan **Tabel 1**.



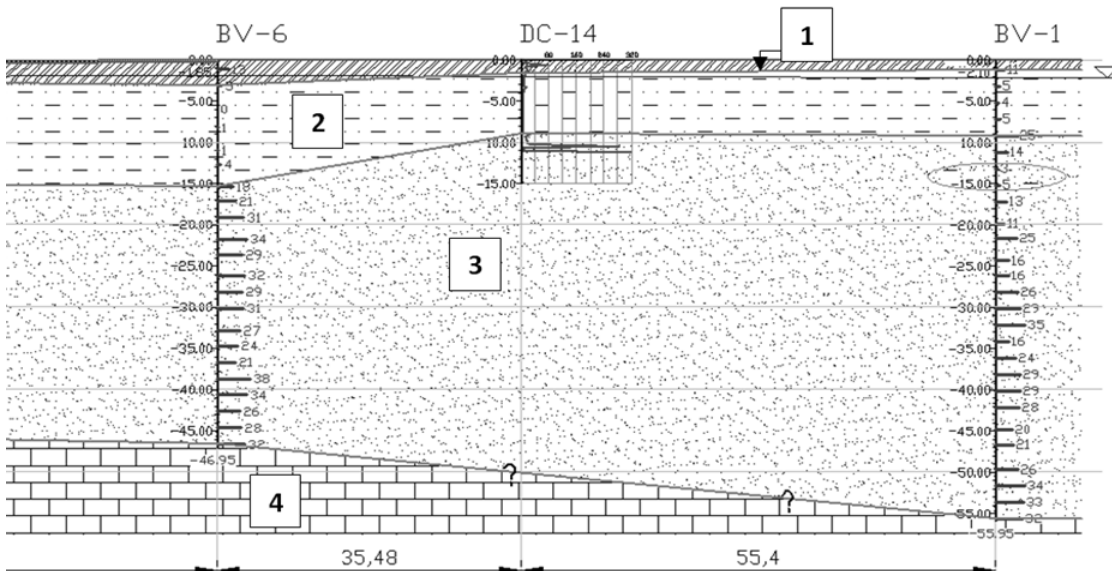
**Gambar 2.** Lokasi titik-titik penyelidikan tanah di lapangan



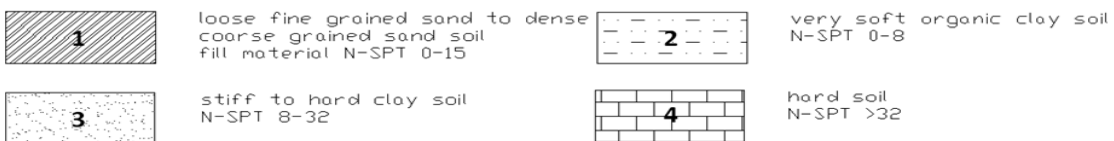
(a)



(b)



(c)



Gambar 3. Profil tanah di sepanjang penampang A-A

Tabel 1. Rangkuman hasil penyelidikan laboratorium dari titik BV-2 dan BV-6

Titik Bor	Kedalaman (m)	Liquid Limit, LL (%)	Plastic Limit, PL (%)	Kadar air, $w_n$ (%)	Angka pori, $e$	Indeks kompresibilitas, $C_c$	Tekanan prakonsolidasi ( $\text{kg/cm}^2$ )
BV-2	3.00 – 3.70	172.0	63.5	148.2	3.65	1.85	0.64
	8.00 – 8.70	83.5	56.7	67.2	1.82	0.78	0.46
	11.00 – 11.70	43.6	15.1	29.6	0.79	0.36	3.67
	22.00 – 22.70	42.7	16.3	24.0	0.64	0.25	5.00
	26.50 – 27.20	40.7	16.9	22.0	0.60	0.29	5.82
BV-6	5.00 – 5.70	178.5	72.8	165.1	4.15	1.83	0.39
	10.00 – 10.70	69.1	24.3	57.9	1.62	0.59	0.44
	14.50 – 15.20	Non Plastic		22.0	0.59	0.06	4.82
	21.00 – 21.60	36.0	15.4	19.7	0.55	0.15	4.85
	32.00 – 32.70	73.3	25.3	32.4	0.85	0.32	6.72

### 3. Penurunan Tanah

Lahan pada lokasi studi kasus akan dipersiapkan menjadi lahan pabrik dengan elevasi +100.00. Untuk mencapai target elevasi setelah proses konsolidasi selesai, maka tinggi timbunan direncanakan bervariasi sesuai kontur lahan. Desain tinggi timbunan pada lokasi rencana ditampilkan pada **Gambar 4**.

Berdasarkan data penyelidikan tanah lapangan dan laboratorium yang telah dilakukan diperoleh data bahwa terdapat tanah lunak dengan kandungan tanah organik yang memiliki ketebalan bervariasi antara 2 m hingga 10 m pada titik bor BV-2 dan BV-6. Lapisan tanah lunak memiliki kekuatan geser yang rendah dan karakteristik kompresibilitas yang tinggi. Hal ini menyebabkan terdapat potensi permasalahan penurunan jangka panjang yang perlu diantisipasi. Lapisan tanah lunak mengakibatkan besar penurunan konsolidasi yang besar dengan waktu penurunan yang terjadi yang lama.

Selain itu, proses biodegradasi yang berpotensi terjadi pada material organik pada tanah juga akan berkontribusi terhadap penurunan tanah. Hal ini menyebabkan bertambahnya variabel yang mempengaruhi besarnya penurunan tanah.

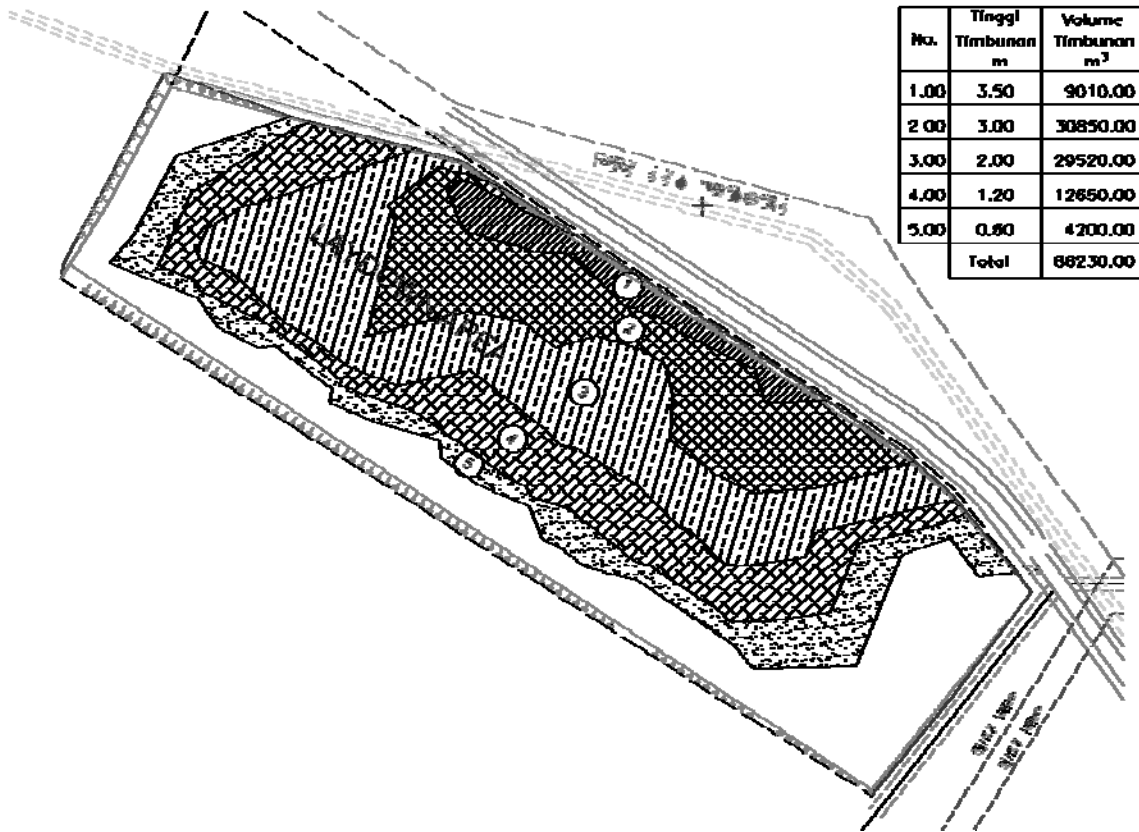
### 4. Perbaikan Tanah

Penurunan konsolidasi yang besar dan terjadi pada waktu yang lama merupakan permasalahan utama pada kasus penimbunan ini. Dengan permeabilitas tanah lempung yang kecil, waktu penurunan tanah hingga konsolidasi selesai terjadi diprediksi mencapai 10 tahun. Perbaikan tanah dibutuhkan untuk memper-

cepat waktu penurunan konsolidasi. Salah satu cara yang dapat diterapkan untuk mempercepat waktu penurunan konsolidasi adalah dengan menggunakan *pre-fabricated vertical drain* (PVD) dan *pre-loading*. Dengan memasang *vertical drain* yang terbuat dari bahan yang sangat *permeable* lintasan drainase dapat diperpendek. Jarak antar masing-masing PVD dalam studi ini adalah 1,0 hingga 1,2 m. Sehingga dengan adanya *vertical drain* ini maka panjang lintasan drainase dalam proses konsolidasi yang tadinya lebih kurang 6 m dapat diperpendek menjadi 0,5 m – 0,6 m.

Untuk mengurangi penurunan tanah akibat konsolidasi, maka pemakaian *vertical drain* ini umumnya disertai dengan *surcharging*, yaitu pemberian beban *pre-loading* yang besarnya melebihi beban akhir pasca konstruksi. Setelah konsolidasi mendekati 100% dan dari hasil-hasil monitoring dengan instrumen-instrumen geoteknik menunjukkan bahwa air pori sudah berdisipasi serta mencapai keseimbangan dengan baik dan penurunan sudah mencapai angka yang telah diharapkan, maka urugan pasir surcharge dapat dipindahkan untuk lokasi lainnya. Setelah mengalami *surcharging* dengan *vertical drain*, maka tanah yang tadinya berperilaku *Normally Consolidated* dengan Indeks Kompresi ( $C_c$ ) yang tinggi akan berubah menjadi tanah yang berperilaku *Over Consolidated* dengan Indeks Kompresi yang jauh lebih rendah dari harga semula, sehingga penurunan tanah yang terjadi akibat pembebanan akan menjadi lebih kecil.

Pada kasus penimbunan ini, waktu penurunan hingga konsolidasi selesai diprediksi berkisar antara 1 hingga 1,5 bulan dari sejak penumpukan terakhir *surcharge*. Waktu penurunan ini dibatasi sesuai dengan waktu persiapan proyek yang telah ditentukan.



Gambar 4. Tinggi timbunan yang diperlukan untuk mencapai elevasi rencana



Gambar 5. Pemasangan Prefabricated Vertical Drain (PVD) pada lokasi timbunan

## 5. Instrumentasi Geoteknik

Keberhasilan pekerjaan perbaikan tanah, terutama dengan teknik penimbunan secara bertahap, sangat bergantung pada data pengamatan perilaku dan kondisi tanah. Data pengamatan memungkinkan bisa diambilnya keputusan yang berkaitan dengan kinerja PVD, perubahan pada desain, dan lain lain selama proses penimbunan berlangsung. Oleh sebab itu, pengamatan perilaku dan kondisi tanah pada saat konstruksi menjadi hal yang penting.

Instrumen-instrumen monitoring geoteknik seperti *inclinometer*, *piezometer*, dan *settlement plate* dipasang pada lokasi lahan untuk mengamati kondisi dan perilaku tanah saat penimbunan berlangsung. Lokasi titik-titik pemasangan instrumen-instrumen tersebut ditampilkan pada **Gambar 6**.

## 6. Analisis Penurunan Konsolidasi Berdasarkan Teori Terzaghi

Penurunan konsolidasi disebabkan karena adanya tambahan tegangan pada tanah akibat timbunan. Dengan adanya perubahan tegangan ini maka terjadi pula perubahan tegangan air pori. Konsolidasi adalah terdisipasinya air pori dari ruang antara butiran tanah sehingga pada akhir konsolidasi tegangan air pori kembali seperti sebelum terjadi pertambahan beban. Akibat keluarnya air dari ruang antara butiran jarak butiran menjadi semakin dekat sehingga tanah mengalami penurunan. Dengan teori konsolidasi 1-D dari Terzaghi dapat diperhitungkan penurunan yang terjadi pada timbunan (*embankment*) seperti yang diberikan pada **Tabel 2**.

Pada metode Terzaghi, beban yang bekerja dan deformasi tanah diasumsikan terjadi pada satu arah vertikal saja, hal ini mempengaruhi hasil perhitungan penurunan yang didapat. Pada kondisi sebenarnya, deformasi dapat terjadi ke segala arah, sehingga deformasi yang terjadi akan terdistribusi yang menyebabkan nilai penurunan akan lebih kecil. Selain itu, banyak faktor-faktor yang tidak dipertimbangkan, seperti adanya perkuatan tanah akibat timbunan yang bertahap. Perkuatan tanah akan memberikan nilai penurunan yang lebih kecil.

**Tabel 2. Prediksi penurunan konsolidasi berdasarkan teori terzaghi**

Zona	Tinggi timbunan (m)	Tebal Lapisan Kompresibel (m)	Penurunan setelah konsolidasi $\pm 90\%$ (m)
BV - 2	3,5	12,5	1,03
BV - 6	3,0	10	0,57

## 7. Analisis dan Pemodelan Penurunan Tanah dengan Metode Elemen Hingga (FEM)

Analisis dan prediksi penurunan konsolidasi tanah dapat dilakukan dengan FEM. Metode elemen hingga yang digunakan pada analisis dengan FEM adalah cara pendekatan solusi analisis struktur secara numerik dimana struktur kontinum dengan derajat kebebasan tak hingga disederhanakan ke dalam elemen-elemen kecil diskrit yang memiliki geometri yang lebih sederhana dengan derajat kebebasan berhingga. Elemen-elemen diferensial ini memiliki asumsi fungsi perpindahan yang dikontrol pada tiap nodal. Pada nodal tersebut diberlakukan syarat keseimbangan dan kompatibilitas. Pada titik lain, diasumsikan perpindahan dipengaruhi oleh nilai nodal. Perpindahan diperoleh dengan menerapkan prinsip energi yang disusun dari matriks kekakuan untuk tiap elemen dan kemudian diturunkan persamaan keseimbangannya untuk setiap nodal dari elemen diskrit sesuai dengan kontribusi elemennya. Jumlah *node* yang digunakan dalam menganalisis elemen adalah *15-nodes* yang merupakan jumlah yang dianggap mencukupi. Semakin banyak jumlah *node* yang dipilih, maka semakin teliti perhitungan yang akan dilakukan, meskipun perbedaan dengan jumlah *15-node* relatif tidak signifikan pada studi ini.

Nilai parameter tanah yang digunakan dalam pemodelan FEM diperoleh dari data laboratorium maupun dari referensi berdasarkan tipe tanah. Referensi parameter yang digunakan meliputi parameter *k* (koefisien permeabilitas), *E* (modulus elastisitas), dan *n* (Poisson's Ratio) seperti terlihat pada **Tabel 3**. Pemodelan material tanah untuk analisis FEM pada studi kasus ini diberikan pada **Tabel 4**.

Untuk jenis tanah pasir non-kohefif, nilai  $c = 0$  dapat digunakan, tetapi beberapa fungsi perhitungan dalam FEM akan berjalan kurang baik. Untuk menghindari hal ini, disarankan untuk memasukkan nilai yang kecil untuk kohesi (digunakan  $c = 0.3$  kPa). Untuk perilaku drained maupun undrained pada tanah lempung, digunakan parameter efektif, sehingga nilai kohesi yang digunakan sangat kecil mendekati nilai nol. Dalam hal ini digunakan nilai kohesi yang sama dengan jenis tanah pasir yaitu  $c = 0.3$  kPa.

Untuk perhitungan dan analisis pada FEM digunakan simulasi perhitungan konsolidasi dengan parameter tekanan air pori minimum sebagai target dari selesainya proses konsolidasi. Pada tahap ini akan dilakukan analisis pembentukan tekanan air pori berlebih terhadap waktu. Deformasi dari jaring elemen hingga (yang berbentuk segitiga) menampilkan deformasi dan regangan secara visual

dalam model elemen hingga. Perpindahan total merupakan akumulasi perpindahan absolut  $|u|$  yang dibentuk oleh komponen perpindahan horizontal dan vertikal pada setiap titik nodal pada akhir langkah perhitungan. Perpindahan ditampilkan pada model geometri. Pada kasus ini, diperoleh perpindahan total maksimum untuk titik BV-2 dan BV-6 masing-masing sebesar 0.712 m dan 0.415 m. Perpindahan total pada akhir konsolidasi tahap timbunan terakhir dapat dilihat pada Gambar 7.

### 8. Analisis Prosedur Observasi Asaoka untuk Prediksi Penurunan Tanah

Metode Asaoka (1978) merupakan metode observasi untuk konsolidasi satu arah yang paling populer, karena selain dapat memprediksi penurunan akhir juga dapat memungkinkan diperolehnya parameter-

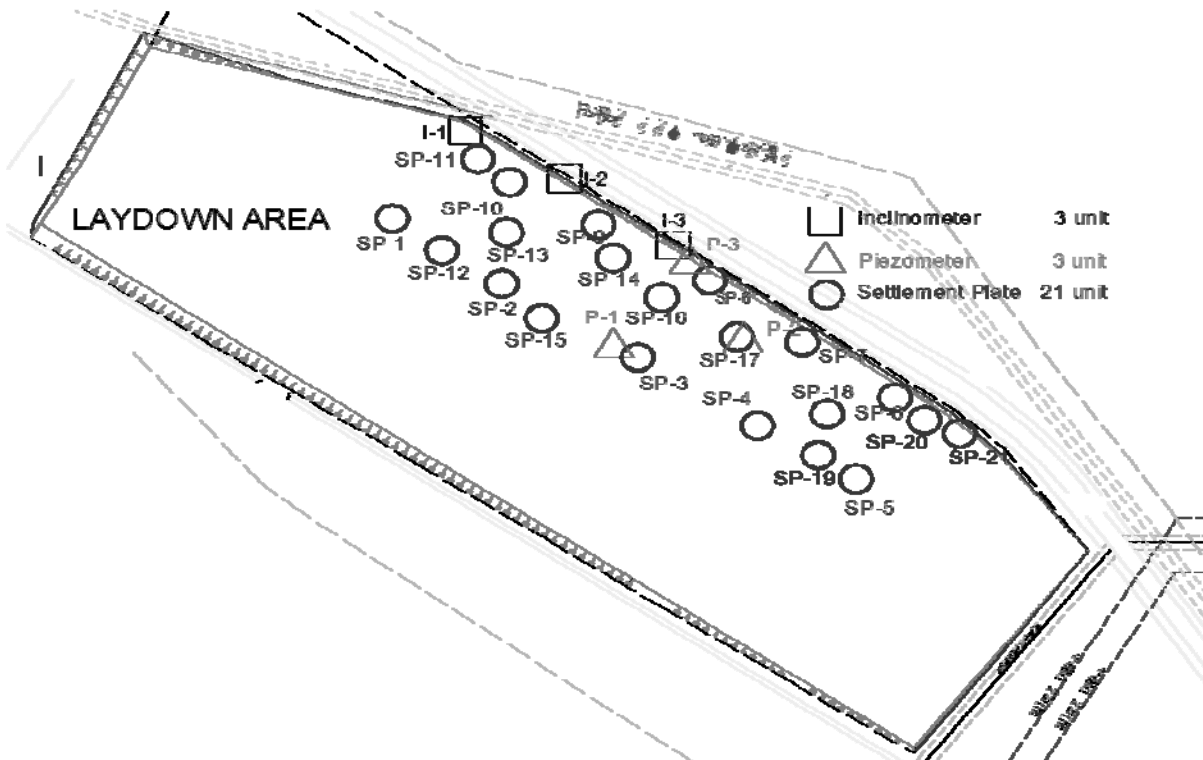
parameter konsolidasi yang lebih akurat. Umumnya analisis penurunan tanah memerlukan data lapangan dan data laboratorium seperti data tekanan air pori, panjang aliran air, regangan maksimum tanah dan koefisien konsolidasi. Metode Asaoka ini merupakan suatu alat bantu untuk memprediksi penurunan tanah dengan menggunakan metode *curve fitting*. Tetapi dengan menggunakan Metode Asaoka, kebutuhan akan data-data tanah tidak diperlukan dan hasil yang diperoleh pun cukup diandalkan.

#### 8.1 Persamaan umum penurunan terhadap waktu

Pada prosedur observasi Asaoka, hubungan antara penurunan tanah dan waktu diturunkan melalui persamaan diferensial berdasarkan persamaan dasar konsolidasi (Mikasa, 1963), yaitu:

Tabel 3. Referensi untuk menentukan parameter tanah [Berdasarkan Casagrande (1967); Fadum (1948); Das (1994) dan Bowles (1988)]

Tipe Tanah	k (cm/detik)	E (kN/m <sup>2</sup> )	m
Pasir lepas	$10 - 10^{-3}$	10000 - 25000	0,2 - 0,4
Pasir medium padat	$10 - 10^{-3}$	25000 - 40000	0,25 - 0,4
Pasir padat	$10 - 10^{-3}$	34500 - 69000	0,3 - 0,45
Pasir kelanauan	$10^{-3} - 10^{-7}$	5000 - 20000	0,2 - 0,4
Lempung lunak	$10^{-7} - 10^{-9}$	1380 - 3450	0,15 - 0,25
Lempung medium	$10^{-7} - 10^{-9}$	15000 - 50000	0,2 - 0,5
Lempung keras	$10^{-7} - 10^{-9}$	50000 - 100000	0,1 - 0,3
Lempung kelanauan	0,001 - 0,00001	25000 - 35000	0,2 - 0,3



Gambar 6. Lokasi titik-titik pemasangan alat monitoring di lapangan



$$e = c_v \varepsilon_{zz} \quad (1)$$

dimana

$e(t,z)$  = regangan vertikal (regangan volum)

$t(\geq 0)$  = waktu

$z$  = kedalaman dari bagian atas lapisan lempung

$c_v$  = koefisien konsolidasi

Walaupun nilai permeabilitas dan koefisien kompresibilitas bervariasi terhadap waktu, persamaan diatas tetap efektif ketika nilai  $c_v$  konstan (Mikasa, 1963).

Persamaan dasar konsolidasi ini dipilih oleh Asaoka (1978) untuk diturunkan menjadi persamaan diferensial linier biasa karena lebih sederhana daripada persamaan konsolidasi Terzaghi. Persamaan akhir untuk menentukan nilai penurunan pada interval waktu ke-j dapat dituliskan sebagai:

$$\rho_j = \frac{\beta_0}{1 - \beta_1} - \left\{ \frac{\beta_0}{1 - \beta_1} - \rho_0 \right\} (\beta_1)^j \quad (2)$$

Dimana  $\rho_j$  adalah besarnya penurunan tanah pada waktu  $t = t_j$ , dan koefisien  $\beta_0$  dan  $\beta_s$  ( $s = 1, 2, \dots, n$ ) adalah parameter yang tidak diketahui.

### 8.2 Metode grafis prediksi penurunan tanah

Pengukuran data penurunan tanah di lapangan dilakukan dengan menggunakan instrumen *settlement plate*. Untuk memperoleh prediksi penurunan akhir tanah, maka data-data penurunan ini harus dipilih,

sehingga diperoleh nilai penurunan  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$  dengan interval waktu  $\Delta t$  yang konstan seperti dilihat pada **Gambar 8**. Kemudian nilai  $\rho_n$  (sumbu-y) dan nilai  $\rho_{n-1}$  (sumbu-x) diplot sehingga akan diperoleh titik-titik yang membentuk garis lurus, seperti ditunjukkan pada **Gambar 9**.  $\beta_0$  adalah waktu titik plot pertama dari regresi linear  $\rho_n$  dan  $\rho_{n-1}$ . 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. Setelah diperoleh penurunan akhir ( $\rho_f$ ) maka dapat dicari nilai  $\beta_1$  yang merupakan kemiringan dari garis  $\rho_n$  vs  $\rho_{n-1}$  sebenarnya, yang memberikan hubungan:

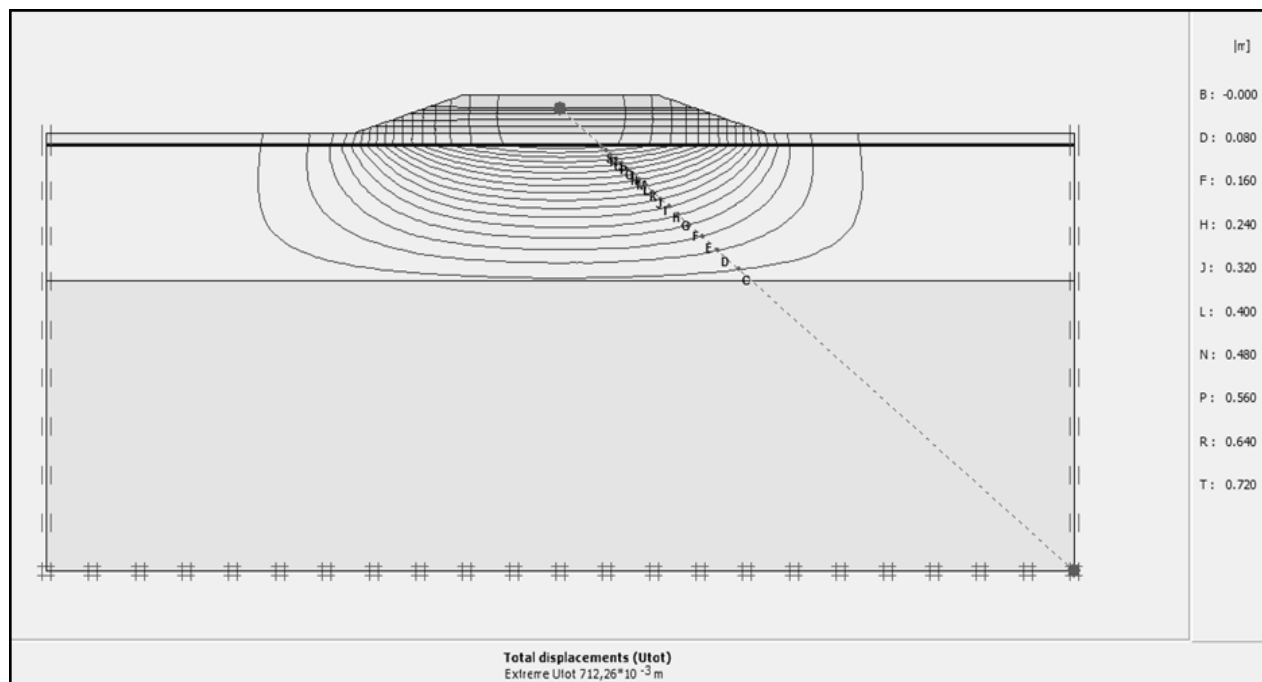
$$\beta_1 = \frac{\rho_f - \beta_0}{\rho_f} \quad (3)$$

### 8.3 Koreksi nilai koefisien konsolidasi

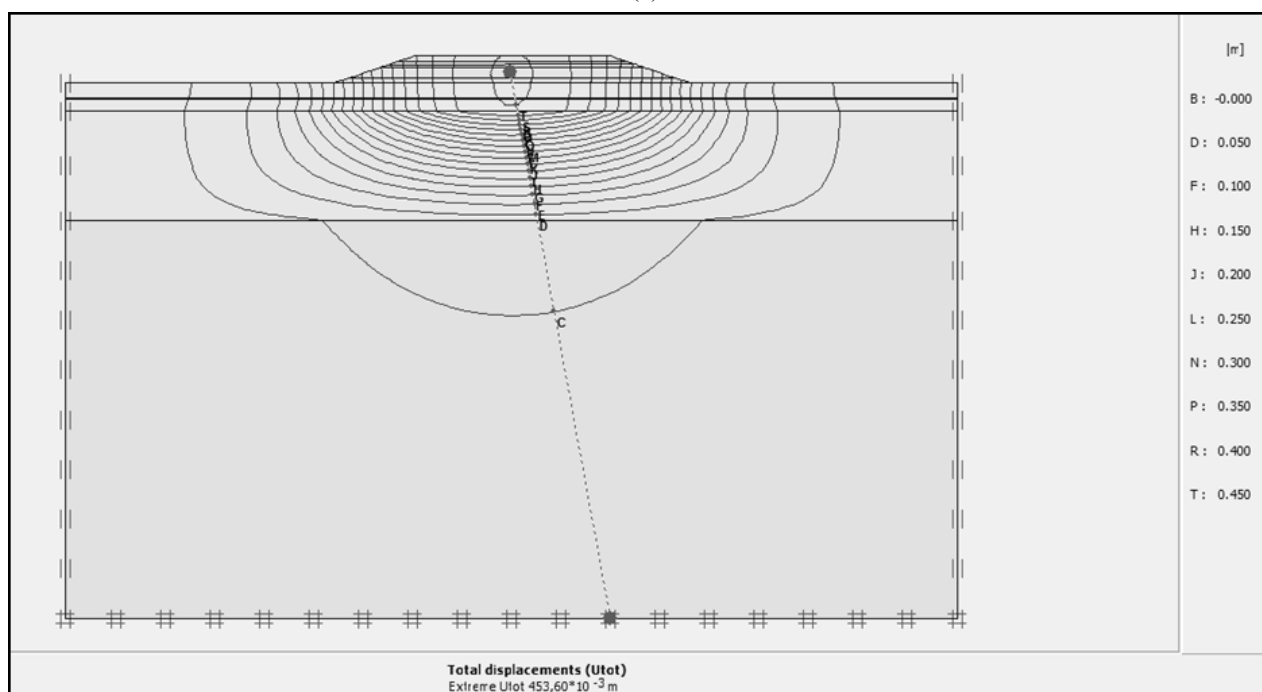
Berdasarkan metode Asaoka, dapat diperoleh koreksi nilai koefisien konsolidasi arah vertikal ( $C_v$ ) dan koefisien konsolidasi arah radial/horizontal ( $C_h$ ). Nilai koreksi koefisien konsolidasi ini berguna untuk mengetahui kecepatan penurunan konsolidasi pada suatu lapisan tanah lempung yang telah diberi perbaikan tanah berupa timbunan dan PVD. Dengan adanya *vertical drain*, maka disipasi tekanan air pori akan dominan terjadi dalam arah radial/horizontal. Dengan demikian, koreksi koefisien konsolidasi hanya dilakukan untuk parameter konsolidasi horizontal ( $C_h$ ) saja, yang diberikan melalui persamaan berikut (Hausmann, 1990):

**Tabel 4. Parameter dan model material tanah pada FEM**

Titik Bor	Material Lapisan	Model	Perilaku	$\gamma_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$k_x$ (m/s)	$k_y$ (m/s)	E (kN/m <sup>2</sup> )	Poisson's Ratio $\nu$	$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ (deg)	$C_c$	$C_s$	$e_0$
BV-2	Fill (Timbunan)	Mohr-Coulomb	Drained	17	20.4	5.0E-05	5.0E-05	20000	0.3	0.3	30			
	Fill Material (Medium Dense Sand)	Mohr-Coulomb	Drained	18	20.88	5.0E-05	5.0E-05	40000	0.35	0.3	30			
	Very Soft to Medium Stiff Clay	Soft Soil	Undrained	14.35	18.73	5.0E-08	3.110E-07			0.3	25	0.342	0.057	0.89
	Stiff to Very Stiff Clay	Mohr-Coulomb	Undrained	20.13	24.58	1.0E-06	1.0E-06	25000	0.3	0.3	30			
BV-6	Fill (Timbunan)	Mohr-Coulomb	Drained	17	20.4	5.0E-05	5.0E-05	20000	0.3	0.3	30			
	Fill Material (Medium Dense Sand)	Mohr-Coulomb	Drained	18	20.88	5.0E-05	5.0E-05	40000	0.35	0.3	30			
	Very Soft to Medium Stiff Clay	Soft Soil	Undrained	13.2	16.1	1.0E-07	3.0E-07			0.3	27	0.325	0.065	1.11
	Stiff to Very Stiff Clay	Mohr-Coulomb	Undrained	20	22	1.0E-06	1.0E-06	25000	0.3	0.3	30			



(a)



(b)

Gambar 7. Penurunan total pada akhir konsolidasi tahap timbunan terakhir hasil analisis FEM untuk titik (a) BV-2 dan (b) BV-6

$$\frac{-\ln \beta_1}{\Delta t} = \frac{8C'_h}{d_e^2 F(n)} + \frac{\pi^2 C_v}{4H^2} \quad (4)$$

dan penurunan pada waktu t dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\frac{S_t}{S_f} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp \left[ - \left( \frac{8C'_h}{d_e^2 F(n)} + \frac{\pi^2 C_v}{4H^2} \right) t \right] \quad (5)$$

dimana:

$c_v$  = koefisien konsolidasi arah vertikal

H = tebal lapisan tanah yang terkonsolidasi

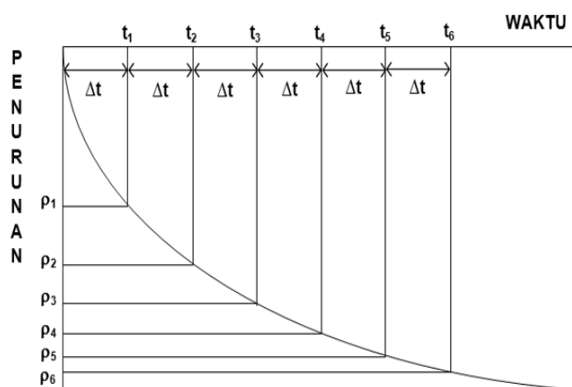
$\beta_1$  = kemiringan kurva  $\rho_n$  vs  $\rho_{n-1}$

$\Delta t$  = selang waktu dalam pengamatan penurunan

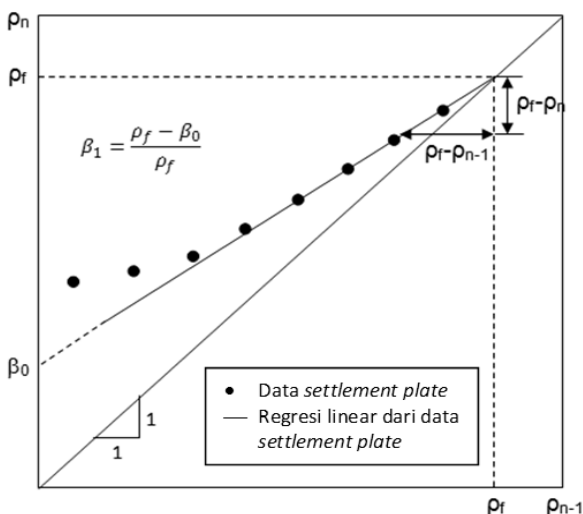
$c_h'$  = koefisien konsolidasi arah radial/horizontal koreksi

$d_e$  = diameter daerah pengaruh PVD

$F(n)$  = fungsi n terhadap waktu akibat PVD



Gambar 8. Prosedur analisis data monitoring penurunan dengan interval waktu yang konstan (Magnan and Deroy, 1980)



Gambar 9. Prediksi penurunan akhir dengan metode Asaoka

## 9. Pengamatan Penurunan

Interpretasi hasil pengamatan tanah memiliki dua sasaran utama, yaitu untuk mengevaluasi perilaku konsolidasi dan untuk menilai stabilitas tanah. Dalam mencapai dua sasaran tersebut, digunakan dua teknik utama dalam analisis, yaitu: 1) perkiraan langsung, misalnya peningkatan laju rata-rata penurunan dan deformasi horizontal akan memberikan indikasi terjadinya kegagalan; atau pengukuran tekanan air pori yang menyediakan data untuk memperkirakan tegangan vertikal pada suatu waktu yang dibutuhkan untuk analisis stabilitas, dan 2) verifikasi parameter desain, misalnya perkiraan koefisien konsolidasi horizontal yang dihitung kembali dari data piezometer dan penurunan.

Gambar 10 dan Gambar 11 menampilkan hasil pengamatan penurunan tanah pada *settlement plate* SP-8 dan SP-18. Titik-titik *settlement plate* tersebut dipilih untuk dianalisis karena terletak di lokasi tanah dengan lapisan lempung lunak yang tebal. Titik-titik SP-8 dan SP-18 masing-masing berlokasi berdekatan dengan titik-titik bor B-2 dan B-6.

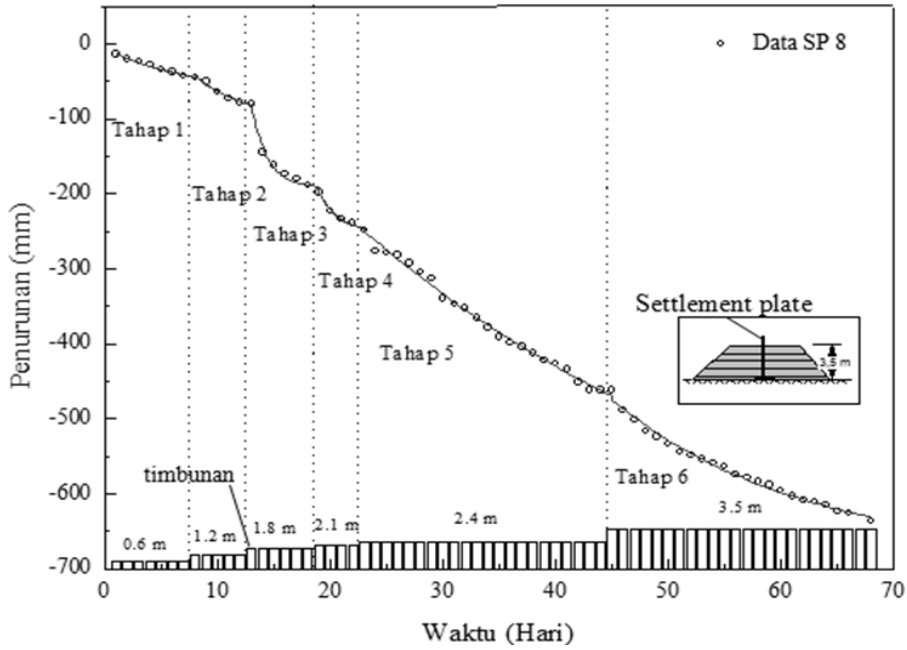
## 10. Analisis Penurunan Tanah Berdasarkan Metode Asaoka

Dari data pengamatan penurunan harian yang diperoleh untuk masing-masing *settlement plate* SP-8 dan SP-18, dapat diplot grafik antara penurunan pada 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* linier dari titik plot grafik dengan garis  $\rho_n = \rho_{n-1}$  merupakan penurunan akhir ( $\rho_f$ ) untuk masing-masing tahap timbunan. Gambar 12 menunjukkan hasil prediksi penurunan dari kedua *settlement plate*

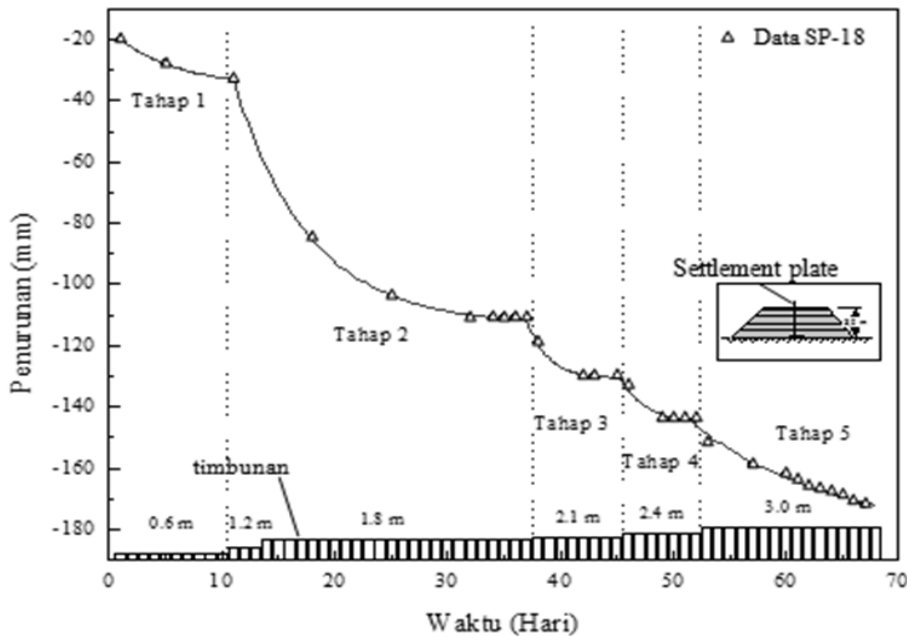
Koefisien  $\beta_1$  dari hasil analisis dengan menggunakan metode Asaoka dapat digunakan untuk mencari koefisien konsolidasi koreksi dengan menggunakan Persamaan (5) menurut Hausmann. Dari koefisien konsolidasi dapat diperoleh lamanya waktu untuk mencapai konsolidasi  $\pm 90\%$  dimana penurunan tanah sudah dianggap tidak bertambah lagi. Nilai  $\beta_1$  dan waktu untuk mencapai konsolidasi  $\pm 90\%$  pada tahap timbunan terakhir diberikan pada Tabel 5.

## 11. Perbandingan Ketiga Metode Prediksi Penurunan

Dari analisis dan perhitungan dengan ketiga metode, yaitu: Terzaghi, elemen hingga dengan FEM, serta metode Asaoka dan Hausmann, maka dapat diperoleh estimasi besar penurunan yang berbeda-beda. Dari hasil analisis diperoleh kurva penurunan terhadap waktu yang diberikan pada Gambar 13.



Gambar 10. Hasil pengamatan penurunan pada *settlement plate* SP-8

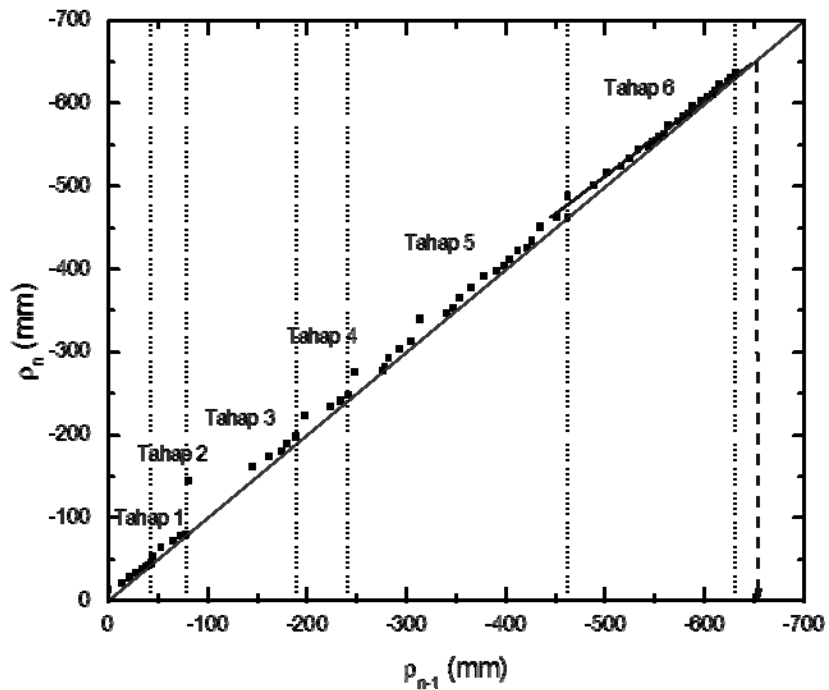


Gambar 11. Hasil pengamatan penurunan pada *settlement plate* SP-18

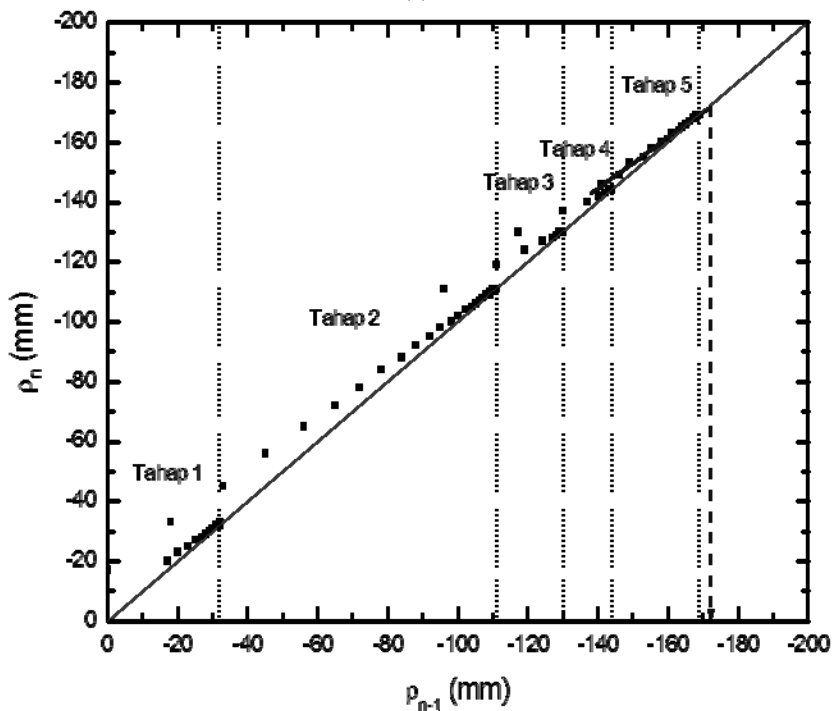
Besar penurunan yang didapat dari metode Terzaghi paling besar dibandingkan dengan kedua metode lain. Hal ini terjadi karena deformasi yang terjadi diasumsikan hanya terjadi pada satu arah saja, yaitu arah vertikal. Selain itu metode Terzaghi tidak memperhitungkan tahapan penimbunan, padahal kondisi tanah setelah mengalami setiap tahapan penimbunan menjadi lebih kuat dikarenakan terjadinya kenaikan kekuatan tanah (*gain strength*).

Pada kondisi sebenarnya, tanah mengalami perkuatan dalam setiap proses penimbunan yang dilakukan. Selain itu, deformasi terjadi ke segala arah, sehingga

besar penurunan yang terjadi lebih kecil. Hal ini dapat didekati dengan metode Asaoka karena metode ini dilakukan berdasarkan data hasil pengamatan lapangan. Pemodelan dengan FEM juga menghasilkan penurunan yang lebih besar dibandingkan dengan metode Asaoka, meskipun penurunan yang didapat lebih kecil dari metode Terzaghi. Hal ini terjadi karena analisis dengan FEM menggunakan pendekatan dua dimensi, sehingga deformasi yang diijinkan hanya pada dua arah, yaitu arah vertikal dan horizontal.



(a)



(b)

Gambar 12. Estimasi penurunan dengan metode Asaoka pada titik (a) SP-8 dan (b) SP-18

Tabel 5. Nilai  $\beta_1$ , penurunan akhir ( $\rho_f$ ), dan  $t_{90}$  untuk tahap timbunan terakhir

	$\beta_1$	$\rho_f$ (mm)	$t_{90}$ (hari)
SP 8	0.91686	-658	24
SP 18	0.85652	-172	25

Tabel 6. Rekapitulasi hasil analisis ketiga metode

Titik	Penurunan Akhir (mm)		
	Terzaghi	FEM	Asaoka
BV-2 & SP-8	1030	712	658
BV-6 & SP-18	565	415	172

Dalam hal prediksi besar penurunan total yang terjadi di lapangan, metode Asaoka lebih baik digunakan dan hasil yang didapat lebih mendekati data penurunan yang ada. Pada kondisi sebenarnya di lapangan, banyak hal yang tidak dapat diduga dan faktor luar yang terjadi dapat mempengaruhi besar penurunan total yang terjadi. Hal ini dikarenakan metode Asaoka dinilai lebih merepresentasikan kondisi sebenarnya di lapangan karena berdasarkan data lapangan yang ada.

### 12. Penyusunan Persamaan Baru

Dengan formula yang diberikan oleh **Persamaan (5)** dapat diperoleh kurva penurunan terhadap waktu yang mendekati kurva penurunan asli di lapangan. Tetapi, hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan ini masih memiliki selisih perbedaan yang cukup besar. Hasil ini mungkin saja disebabkan oleh penggunaan persamaan untuk perhitungan yang belum sempurna. Dari **Persamaan (5)**, dapat dilakukan penyusunan persamaan baru untuk mengurangi selisih perbedaan antara data perhitungan dengan data asli di lapangan. Nilai koefisien  $8/\pi^2$  pada **Persamaan (5)** memberikan hasil perhitungan yang tidak relevan dengan asumsi yang digunakan. Hal ini dapat dilihat dengan memasukkan nilai  $t = 0$  pada persamaan tersebut. Pada saat  $t = 0$ , nilai penurunan pada waktu tersebut memberikan suatu angka, bukan bernilai 0. Hal ini tentu akan memberikan nilai penurunan yang lebih besar dari seharusnya. Dengan mengacu pada hal tersebut, maka nilai koefisien  $8/\pi^2$  dapat dihilangkan.

Berdasarkan pertimbangan tadi, maka dapat disusun suatu persamaan yang baru untuk menghitung penurunan berdasarkan data monitoring di lapangan, yaitu:

$$\frac{S_t}{S_f} = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{8C'_h}{d_e^2 F(n)} + \frac{\pi^2 C_v}{4H^2} \right) t \right] \quad (6)$$

Dengan menggunakan **Persamaan (6)**, diperoleh kurva penurunan terhadap waktu seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 14**.

### 13. Kesimpulan

1. Estimasi penurunan konsolidasi yang didapat dari analisis konsolidasi Terzaghi memiliki hasil yang jauh lebih besar dari penurunan yang diperoleh dari analisis berdasarkan metode Asaoka. Dengan adanya perbedaan antara prediksi penurunan konsolidasi dengan penurunan aktual yang terjadi di lapangan, maka observasi penurunan di lapangan

pada kasus-kasus konsolidasi mutlak diperlukan untuk mengoreksi prediksi konsolidasi yang telah dibuat sehingga kegiatan konstruksi dapat berjalan dengan baik dan sesuai rencana.

2. Analisis dan prediksi penurunan dengan metode elemen hingga sudah memperhitungkan perkuatan tanah yang mungkin terjadi akibat penimbunan bertahap. Kekurangan dari analisis ini adalah masih membutuhkan parameter-parameter tanah yang ketidakpastiannya tinggi, sehingga hasil analisis masih memiliki perbedaan yang signifikan dengan penurunan aktual di lapangan.
3. Dengan menggunakan metode Asaoka dapat diperoleh nilai penurunan akhir yang lebih mendekati penurunan aktual. Nilai penurunan ini diperoleh dari data pengamatan penurunan awal di lapangan, sehingga hasil analisis akan lebih sesuai. Dengan metode ini dapat diperoleh pula nilai  $b_1$  yang dapat digunakan untuk mendapatkan parameter-parameter koreksi untuk konsolidasi yang terjadi di lapangan. Dari parameter koreksi seperti koefisien konsolidasi dapat diperoleh *time-rate* yang berguna sebagai acuan pengambilan keputusan di lapangan.
4. Modifikasi persamaan Hausmann, **Persamaan (6)**, dapat digunakan untuk memprediksi besarnya penurunan terhadap waktu. Persamaan ini memberikan kurva penurunan yang lebih mendekati kurva penurunan di lapangan.
5. Hasil prediksi penurunan akhir dengan menggunakan metode Asaoka sangat bergantung pada data pengamatan penurunan yang ada. Kriteria data penurunan yang dapat digunakan untuk analisis Asaoka adalah:

- Data penurunan yang sudah menunjukkan nilai tetap (asimtotik) terhadap suatu nilai tertentu
- Data yang tidak fluktuatif. Jika data yang tersedia sangat luas sebarannya, maka harus ada penyesuaian terhadap data-data tersebut
- Data dengan interval waktu pengukuran yang sama

### Daftar Pustaka

Asaoka, A., 1978, *Observational Procedure of Settlement Prediction*, Soils and Foundation, No.4.

Bowles, J.E., 1988, *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill International.

Casagrande, A., 1967, Classification and Identification of Soils, New York: *Proc. ASCE, Vol.73, No.6, Part I*.

Das, B.M., 1994, *Principles of Geotechnical Engineering*, Boston: PWS Publishing Company.

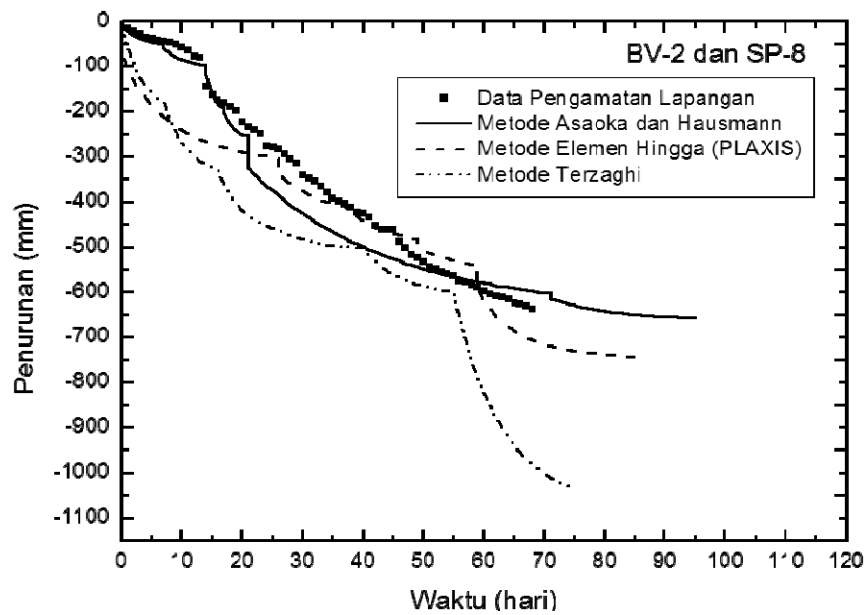
Mikasa, M., 1963, *Consolidation of Soft Clay*, Kajima-shuppan-kai, Tokyo.

Fadum, R.E., 1948, Influence Values for Estimating Stress in Elastic Foundation, *Proc. Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.3.*

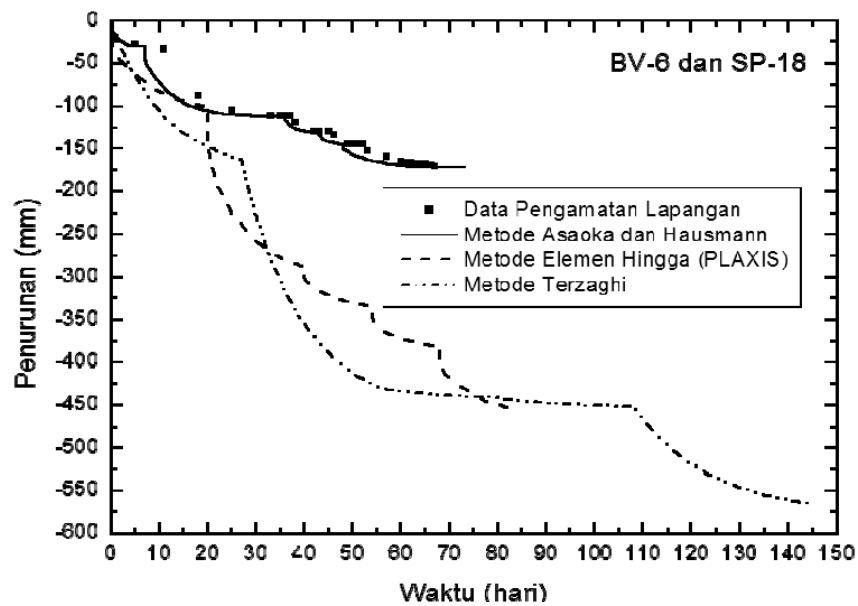
Terzaghi, K., 1943, *Theoretical Soil Mechanics*, New York: Wiley & Sons.

Hausmann, M.R., 1990, *Engineering Principles of Ground Modification*, McGraw-Hill.

Magnan J.P. and Deroy J.M., 1980, *Analyse Graphique Des Tassements Observes Sous Les Ouvrages*, Bull. Liaison Labo. P.&Ch., 109.

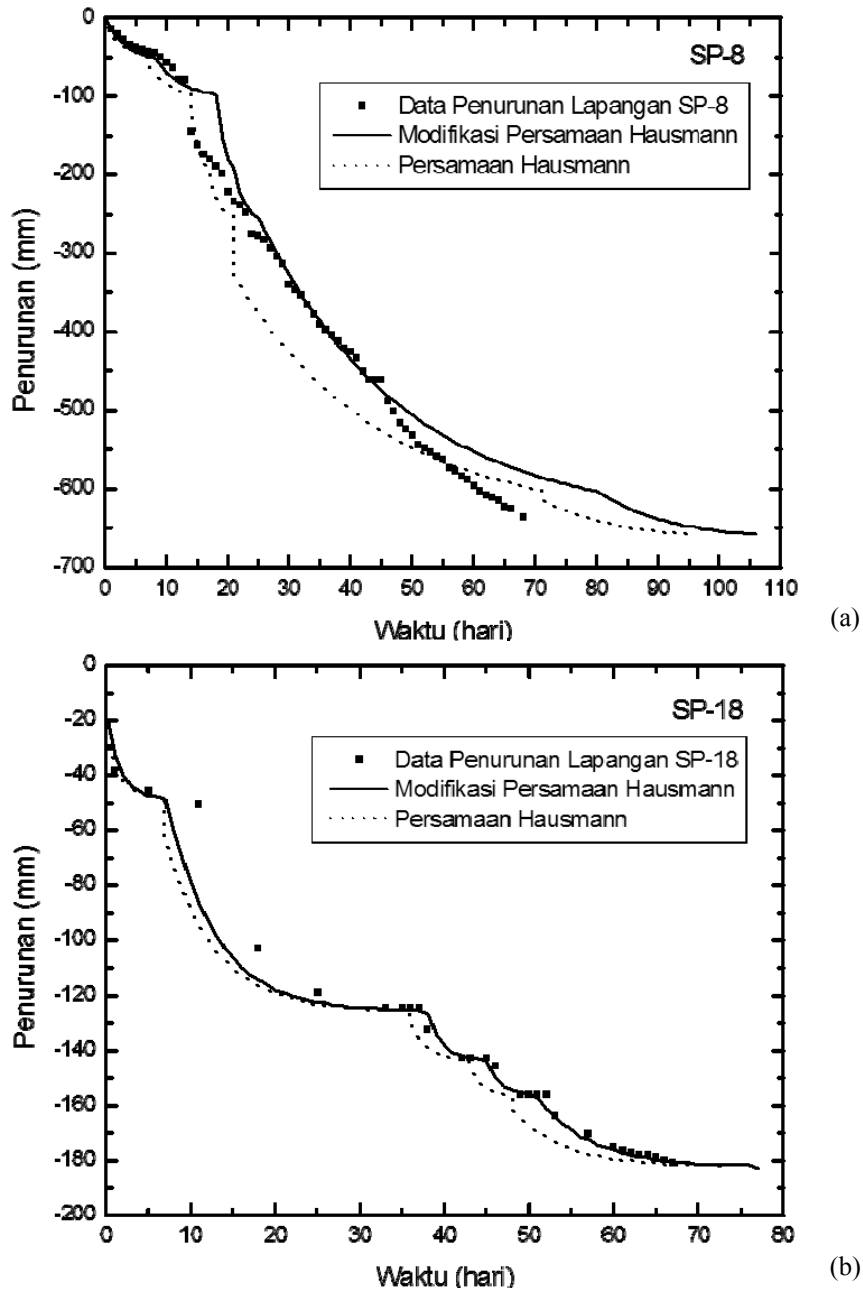


(a)



(b)

Gambar 13. Kurva penurunan terhadap waktu hasil analisis ketiga metode dengan data lapangan



Gambar 14. Perbandingan kurva penurunan terhadap waktu dari persamaan Hausmann dan modifikasi persamaan Hausmann terhadap data penurunan lapangan di titik (a) SP-8 dan (b) SP-18