

ANALISIS KONSOLIDASI TANAH LUNAK AKIBAT PEKERJAAN PVD-PHD DI AREA RUNWAY BANDARA SUPADIO

Kharisma Dewi¹⁾, Eka Priadi²⁾, Ahmad Faisal³⁾

¹⁾ Mahasiswa S1 Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura, Pontianak

^{2,3)} Dosen Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura, Pontianak

Email: kharismad55@gmail.com

ABSTRAK

Landasan pacu Bandara Internasional Supadio dilakukan perpanjangan agar bisa melayani penerbangan pesawat berbadan lebar. Berdasarkan hasil uji *standart penetration test*, lokasi perpanjangan *runway* memiliki karakteristik tanah lempung lunak yang dikenal dapat menyebabkan masalah ketidakstabilan dan penurunan jangka panjang, maka dilakukan perbaikan tanah dengan metode *preloading* kombinasi *prefabricated vertical drain*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis besar dan waktu penurunan akibat dari proses konsolidasi dengan penggunaan PVD dan tanpa penggunaan PVD. Analisis dilakukan secara manual dengan teori konsolidasi satu dimensi oleh Terzaghi dan secara numerik dengan program *Plaxis CE V.20*. Selain itu dilakukan prediksi penurunan akhir dengan metode Asaoka. Besar penurunan konsolidasi 90% dengan metode *preloading* (tanpa PVD) yang dianalisis secara manual adalah 0,363 meter selama 13222 hari, sedangkan untuk analisis secara numerik adalah 0,862 meter selama 7502 hari. Besar penurunan dengan metode *preloading* kombinasi PVD+*vacuum* yang dianalisis secara manual adalah 1,236 meter selama 190 hari, sedangkan untuk analisis secara numerik adalah 1,260 meter selama 190 hari. Berdasarkan hasil *monitoring instrument settlement plate* penurunan selama 190 hari adalah 0,996 meter. Prediksi penurunan akhir dengan metode asaoka adalah 1,146 meter. Dari hasil analisis secara manual dan analisis secara numerik disimpulkan bahwa perbaikan tanah dengan metode *preloading* kombinasi PVD+*vacuum* terbukti dapat mempercepat proses konsolidasi.

Kata kunci: *Konsolidasi, Metode Asaoka, Metode Preloading+Prefabricated Vertical Drain (PVD), Plaxis CE V.20, Tanah Lempung Lunak.*

ABSTRACT

Runway of Supadio International Airport carried out an extension in order to serve widebody aircraft. Based on the results of the standard penetration test, the location of the runway's extension has the characteristics of soft clay soils are known to cause instability and long-term settlement, so soil improvement was carried out using a preloading methods combined with prefabricated vertical drain. This study aims to analyze the value and time of settlement as a result of the consolidation process with the use of PVD and without the use of PVD. The analysis was done manually with the theory of one-dimensional consolidation by Terzaghi and numerically using the Plaxis CE V.20 program. It also be analyzed the final settlement prediction with Asaoka method. The 90% settlement of consolidation using preloading method only (without PVD) which was analyzed manually was 0.363 meters for 13222 days, while for numerical analysis was 0.862 meters for 7502 days. The value of settlement with preloading method combination PVD+vacuum which was analyzed manually was 1.236 meters for 190 days, while for numerical analysis was 1.260 meters for 190 days. Based on the results of monitoring the settlement plate instrument, settlement for 190 days was 0.996 meters. The final settlement prediction using the Asaoka method is 1.146 meters. From the results of manual analysis and numerical analysis, it is concluded that soil improvement using preloading method combine with PVD+vacuum proven to accelerate increase speed of soil consolidation settlement process.

Key words: *Asaoka Method, Consolidation, Plaxis CE V.20, Preloading Method+Prefabricated Vertical Drain (PVD), Soft Clay Soil.*

I. PENDAHULUAN

Pertumbuhan transportasi di seluruh dunia dan juga di Indonesia mengalami perkembangan yang cukup pesat, salah satunya adalah transportasi udara. Fakta bahwa Indonesia merupakan negara kepulauan menjadikan transportasi udara sebagai transportasi yang sangat diminati. Karena besarnya

peminat transportasi udara, maka harus diimbangi dengan infrastruktur pendukung yaitu bandar udara.

Sebuah bandara yang paling sederhana minimal memiliki sebuah landasan pacu (*runway*) yang merupakan komponen utama sebagai tempat pendaratan maupun lepas landas bagi pesawat serta sebagai tempat peralihan moda transportasi dari darat ke udara maupun sebaliknya. Panjang

landasan pacu (*runway*) ini tergantung dari jenis pesawat yang akan dilayani oleh bandara tersebut. Bandara Internasional Supadio memiliki panjang *runway* sebesar 2.250 meter dan lebar 45 meter. Dengan panjang landasan pacu tersebut, Bandara Internasional Supadio belum bisa melayani penerbangan pesawat berbadan lebar (*widebody*) seperti pesawat Airbus A330 atau yang sekelas. Oleh karena itu, dilakukan perpanjangan landasan pacu sebesar 350 meter menjadi 2.600 meter.

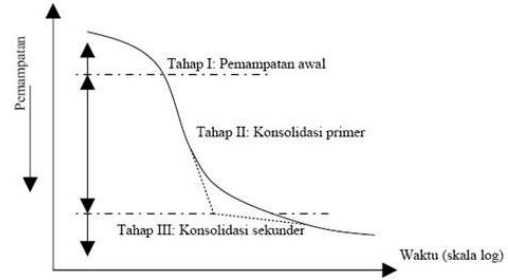
Bandara Supadio ini berada di lokasi yang mempunyai karakteristik tanah lempung lunak yang dikenal sebagai tanah yang bermasalah sehingga menyebabkan ketidakstabilan dan penurunan jangka panjang karena tanah lempung lunak mempunyai kuat geser yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi. Oleh karena itu dilakukan perbaikan tanah dengan metode konsolidasi atau pemampatan, yaitu dengan cara menempatkan beban yang bersifat sementara (*preloading*) secara bertahap. Untuk mempercepat waktu konsolidasi dan mengurangi volume timbunan (*preloading*), metode ini kemudian dikombinasikan dengan pemasangan PVD (*Prefabricated Vertical Drain*), PHD (*Prefabricated Horizontal Drain*), *perforated pipe*, ditambah dengan pemasangan *Geotextile* dan *Geomembrane* sebagai pendukung proses kerja dari *Vaccum*.

Pada penelitian ini, peneliti akan mengkaji pengaruh dari proses perbaikan tanah pada area proyek penambahan panjang *runway* Bandara Internasional Supadio terhadap besar dan waktu penurunan dengan meninjau salah satu titik tinjauan yaitu pada *module-2 STA 2+575*. Analisis akan dilakukan secara manual menggunakan rumus-rumus dari teori konsolidasi satu dimensi oleh Terzaghi dan analisis secara numerik menggunakan program *Plaxis CE V.20 (finite element method)* Selain itu juga dilakukan prediksi penurunan akhir (*final*) dengan metode Asaoka. Hasil analisis secara manual dan secara numerik ini kemudian akan dibandingkan dengan hasil *monitoring instrument (settlement plate)* di lapangan.

II. METODOLOGI DAN PUSTAKA

Konsolidasi dan Penurunan

Konsolidasi merupakan proses berkurangnya volume rongga pori dari dalam tanah akibat adanya proses pengeluaran air dan udara. Umumnya proses konsolidasi dilakukan dengan cara pembebanan yang bersifat sementara (*preloading*) dan dikombinasikan dengan metode lain seperti sistem drainase air tanah yaitu dengan pemasangan *prefabricated vertical drain* yang bertujuan untuk mempercepat waktu konsolidasi. Proses ini akan mengakibatkan terjadinya penurunan karena terjadi pemampatan pada lapisan tanah. Penurunan tanah terdiri dari 3 tahapan, yaitu pemampatan awal, konsolidasi primer dan konsolidasi sekunder.



Gambar 1. Grafik Hubungan Antara Penurunan dan Waktu Penurunan. (Sumber: Braja M. Das, 1995)

Sebagian besar penurunan terjadi saat tahap konsolidasi primer. Ada 2 jenis konsolidasi pada tahap konsolidasi primer, yaitu:

a. Konsolidasi Normal (*Normally Consolidated*)

Tanah dikatakan terkonsolidasi secara normal dimana tekanan *overburden* efektif pada saat ini adalah tekanan maksimum yang pernah dialami oleh tanah itu (tanah tidak pernah mengalami tekanan yang lebih besar dari tekanan pada waktu sekarang).

b. Konsolidasi Berlebih (*Over Consolidated*)

Tanah dikatakan terkonsolidasi secara berlebih dimana tekanan *overburden* efektif pada saat ini lebih kecil dari tekanan yang pernah dialami oleh tanah itu sebelumnya (*preconsolidation pressure*).

2 jenis konsolidasi diatas tergantung dari nilai *Over Consolidation Ratio* (OCR) yang didefinisikan oleh persamaan berikut:

$$OCR = \frac{P'_c}{P'_o} \quad (1)$$

$$P'_c = P'_o + h_{fluktuasi} \times \gamma_w \quad (2)$$

Dimana:

P'_c = Tekanan Prakonsolidasi

P'_o = Tekanan *Overburden* Efektif

$h_{fluktuasi}$ = Perubahan tinggi muka air

γ_w = Berat Volume Air

NC-Soil mempunyai angka OCR=1 dan OC-Soil mempunyai angka OCR>1

Berdasarkan teori Terzaghi dalam Braja M. Das (1995: 194-195), tentang konsolidasi satu dimensi, penurunan konsolidasi untuk konsolidasi *normally consolidated* dan *over consolidated* dapat dihitung dengan persamaan 3 dan persamaan 4 berikut:

$$S_c = \frac{C_c}{1+e_o} H \log \frac{P'_o + \Delta p}{P'_o} \quad (3)$$

$$S_c = \frac{C_s}{1+e_o} H \log \frac{P'_c}{P'_o} + \frac{C_c}{1+e_o} H \log \frac{P'_o + \Delta p}{P'_o} \quad (4)$$

S_c = Penurunan Konsolidasi/Primer

C_c = Indeks Pemampatan

C_s = Indeks Pemuai/Mengembang

e_o = Angka Pori

H = Tebal Lapisan Tanah

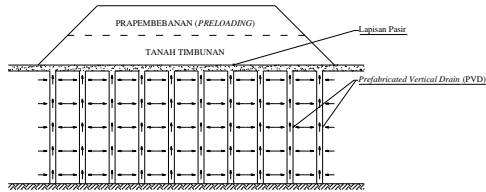
P'_c = Tekanan Prakonsolidasi

P'_o = Tekanan *Overbuden* Efektif

Δp = Distribusi Tekanan

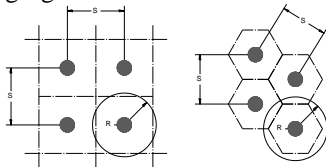
Prefabricated Vertical Drain (PVD)- Prefabricated Horizontal Drain (PHD)

PVD dan PHD merupakan salah satu metode perbaikan tanah dengan cara mengalirkan air ke permukaan tanah (drainase air tanah) dengan tujuan mempercepat waktu konsolidasi (*time of consolidation settlement*).



Gambar 2. Struktur Drainase Vertikal-preloading+PVD (Sumber: Hary Christady Hardiyatmo, 2010)

Pola Pemasangan *prefabricated vertical drain* (PVD) terdiri dari 2 macam, yaitu pola segi empat dan pola segitiga.



Gambar 3 Pola Pemasangan PVD (Sumber: Hary Christady Hardiyatmo, 2010)

Parameter Perhitungan Penurunan Konsolidasi

Penurunan pada tanah asli akibat beban timbunan dapat dihitung berdasarkan rumus konsolidasi satu dimensi Terzaghi (1943) dengan parameter perhitungan sebagai berikut.

a. Tekanan Overburden Efektif (Po')

Dalam Winner (2017), tekanan overburden efektif merupakan tekanan vertikal efektif tanah asli akibat beban lapisan tanah di atas titik tanah asli yang ditinjau. Tekanan overburden efektif dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Po' = \gamma \cdot H \tag{5}$$

Dimana:

- γ' = berat volume tanah efektif ($\gamma_{sat} - \gamma_w$) (gr/m^3)
- H = tebal lapisan tanah yang terkonsolidasi (m)

b. Distribusi Tegangan Tanah (Δp)

Dalam Winner (2017), distribusi tegangan tanah merupakan tambahan tegangan akibat pengaruh beban tambahan (timbunan) di atas tanah. Distribusi tegangan tanah dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\Delta p = q_0 \cdot I \tag{6}$$

$$q_0 = \gamma_{Timbunan} \cdot H_{Preloading} \tag{7}$$

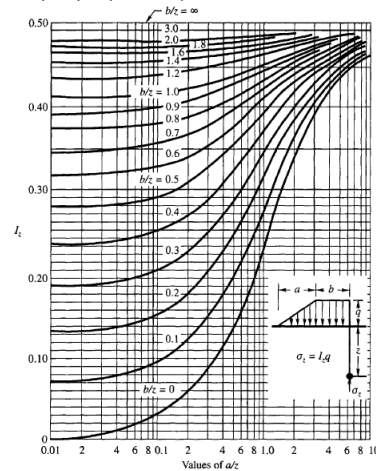
Dimana:

- Δp = distribusi tegangan
- q_0 = beban ekuivalen
- $\gamma_{timbunan}$ = berat volume tanah timbunan (gr/m^3)
- $H_{preloading}$ = tinggi timbunan *preloading* (m)
- I = faktor pengaruh (Gambar 4)

$$I = \frac{(a+b)}{a} (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{b}{a} (\alpha_2) \tag{8}$$

Dimana:

- a = panjang horizontal kemiringan timbunan (m)
- b = lebar setengah timbunan (m)
- $\alpha_1 = [\tan^{-1}\{(a+b)/z\} - \tan^{-1}(b/z)]$ (radian)
- $\alpha_2 = [\tan^{-1}(b/z)]$ (radian)



Gambar 2. Faktor Pengaruh Akibat Beban Timbunan (Sumber: Osterberg,1957)

c. Koefisien Konsolidasi (Cv)

Kecepatan penurunan konsolidasi dihitung dengan menggunakan koefisien konsolidasi (Cv). Untuk tanah yang memiliki banyak lapisan dengan ketebalan yang berbeda - beda, harga Cv gabungan dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$Cv \text{ gabungan} = \frac{(H_1+H_2+\dots+H_n)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{Cv_1}} + \frac{H_2}{\sqrt{Cv_2}} + \dots + \frac{H_n}{\sqrt{Cv_n}}\right)^2} \tag{9}$$

dimana :

- H_n = tebal lapisan ke-n (cm)
- Cv_n = nilai Cv pada lapisan ke-n ($cm^2/detik$)

d. Kecepatan Waktu Konsolidasi (t)

Kecepatan waktu konsolidasi menurut Terzaghi (1943) dalam Braja M. Das (1995:206) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$t = \frac{T_v \times H_{dr}^2}{C_v} \tag{10}$$

- t = waktu konsolidasi
- H_{dr} = jarak air pori (m)
- T_v = faktor waktu

Tabel 1. Faktor Waktu Terhadap Derajat Konsolidasi (Braja M. Das, 1995)

Derajat Konsolidasi (U%)	Faktor Waktu (Tv)
0	0
10	0,008
20	0,031
30	0,071
40	0,126
50	0,197
60	0,287
70	0,403
80	0,567
90	0,848
100	∞

Parameter Perhitungan Penurunan Konsolidasi dengan PVD

Penurunan tanah dengan PVD dapat dihitung dengan metode Hansbo (1981) dalam Pasaribu

(2012) dengan parameter perhitungan sebagai berikut.

a. Koefisien konsolidasi horizontal (Ch)

$$C_h = (1 \text{ s/d } 2) \cdot C_v \quad (11)$$

Dimana:

Ch = koefisien konsolidasi horizontal (m²/tahun)

Cv = koefisien konsolidasi vertikal (m²/tahun)

b. Derajat konsolidasi vertikal (Uv)

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H_d^2} \quad (12)$$

$$U_v = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot T_v}{\pi}}}{\left(1 + \left(4 \cdot \frac{T_v}{\pi}\right)^2\right)^{0,179}} \quad (13)$$

Dimana:

Tv = faktor waktu vertikal

Cv = koefisien konsolidasi vertikal (m²/tahun)

t = waktu ke-n (hari)

Hd = jarak air pori (m)

Uv = derajat konsolidasi arah vertikal (%)

c. Faktor waktu horizontal (Th)

$$T_h = \frac{C_h \cdot t}{d^2} \quad (14)$$

Dimana:

Th = faktor waktu horizontal

Ch = koefisien konsolidasi horizontal (m²/tahun)

t = waktu ke-n (hari)

d = diameter jangkauan (m)

d. Derajat konsolidasi horizontal (Uh)

$$U_h = 1 - \exp\left(-\frac{8 \cdot T_h}{F}\right) \quad (15)$$

$$F = F_n + F_s \quad (16)$$

$$F_n = \left(\frac{n^2}{(n^2-1)}\right) \cdot \ln(n) - \left(\frac{3n^2-1}{(4n^2)}\right) \quad (17)$$

$$n = \frac{D}{d_w} \quad (18)$$

$$d_w = \frac{2 \cdot (a+b)}{\pi} \quad (19)$$

$$F_s = \left(\frac{kh}{k_s} - 1\right) \cdot \ln\left(\frac{d_s}{d_w}\right) \quad (20)$$

Dimana:

Uh = derajat konsolidasi horizontal (%)

Th = faktor waktu horizontal

F = faktor hambatan

Fn = faktor hambatan disebabkan karena jarak antar PVD

Fs = faktor hambatan tanah yang terganggu

D = diameter jangkauan PVD (m)

1,13 × S ; untuk pola segiempat

1,05 × S ; untuk pola segitiga

dw = diameter lingkaran ekuivalen PVD (m)

kh/ks = diasumsikan bernilai 2, menurut Hansbo (2004) dalam Pasaribu (2012)

ds/dw = diasumsikan bernilai 4, menurut Hansbo (2004) dalam Pasaribu (2012)

e. Derajat konsolidasi (U)

$$U = 1 - [(1 - U_v) \cdot (1 - U_h)] \quad (21)$$

Dimana:

U = Derajat Konsolidasi Total (%)

Uv = Derajat Konsolidasi Arah Vertikal (%)

Uh = Derajat Konsolidasi Arah Horizontal (%)

f. Besar penurunan (Sc) pada waktu ke-n

$$S_c = U \cdot S_{ult} \quad (22)$$

Dimana:

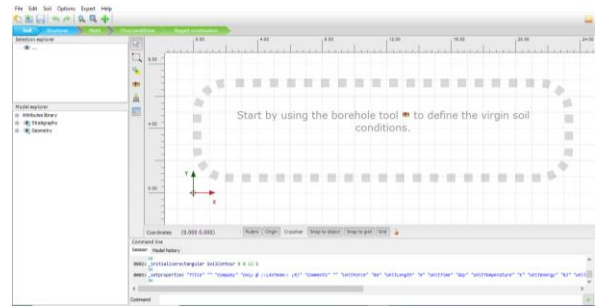
U = derajat konsolidasi (%)

Sc_{ult} = penurunan total (*ultimate*)

Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah suatu metode penyederhanaan elemen kontiniu menjadi elemen yang lebih kecil yang digunakan untuk mengetahui deformasi atau tegangan yang disebabkan oleh distribusi beban atau gaya. Salah satu program aplikasi yang menggunakan metode ini adalah *Plaxis CE V.20*.

Pemodelan tanah pada *Plaxis CE V.20* terdiri dari 8 jenis, yaitu model *Linear Elastic* (LE), model *Mohr-Coulomb* (MC), model *Hardening Soil* (HS), model *Hardening Soil with Small-Strain Stiffness* (HSsmall), model *Soft Soil Creep* (SSC), model *Soft Soil* (SS), model *Jointed Rock* (JR) dan model *Modified Cam-Clay* (MCC). Kemudian terdapat 2 kondisi, yaitu kondisi *drained* untuk tanah berpermeabilitas kecil dan kondisi *undrained* untuk tanah berpermeabilitas besar.



Gambar 3. Tampilan Utama Program *Plaxis CE V.20*

Observasi Asaoka

Metode observasi Asaoka merupakan metode yang dapat memprediksi penurunan akhir menggunakan data hasil *monitoring settlement plate* di lapangan. Langkah-langkah dari metode Asaoka secara grafis akan diuraikan sebagai berikut.

1. Dari data hasil *monitoring settlement plate* dipilih penurunan ($\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$) dengan interval waktu konstan $\Delta t = t_n - t_{n-1}$, sehingga ρ_n adalah penurunan pada waktu t_n .
2. Plot titik-titik (ρ_n, ρ_{n-1}) yang kemudian akan membentuk garis lurus, sehingga:

$$\rho_n = \rho_0 + \beta \rho_{n-1} \quad (23)$$

$$\beta = \frac{\rho_n - \rho_{n-1}}{\rho_{n-1} - \rho_{n-2}} \quad (24)$$

$$\rho_f = \frac{\rho_0}{1 - \beta} \quad (25)$$

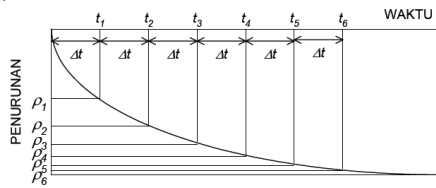
Dimana:

ρ_n = penurunan pada waktu ke-n

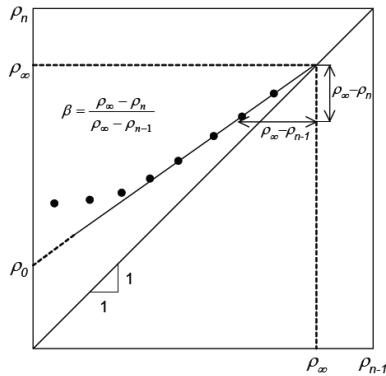
ρ_0 = penurunan awal

β = gradien kemiringan dari kurva garis lurus

ρ_f = penurunan akhir (*final*)



Gambar 4. Kurva Waktu Terhadap Penurunan (Sumber: Pedoman Perencanaan Konstruksi Timbunan)



Gambar 5. Perkiraan Penurunan Akhir Metode Asoka (1978) (Sumber: Pedoman Perencanaan Konstruksi Timbunan)

Lokasi Penelitian

Penelitian berada di area proyek perpanjangan runway Bandara Supadio yang berlokasi di Jalan Arteri Supadio Km. 17, Kecamatan Sungai Raya, Kabupaten Kubu Raya, Kalimantan Barat.



Gambar 6. Lokasi Penelitian

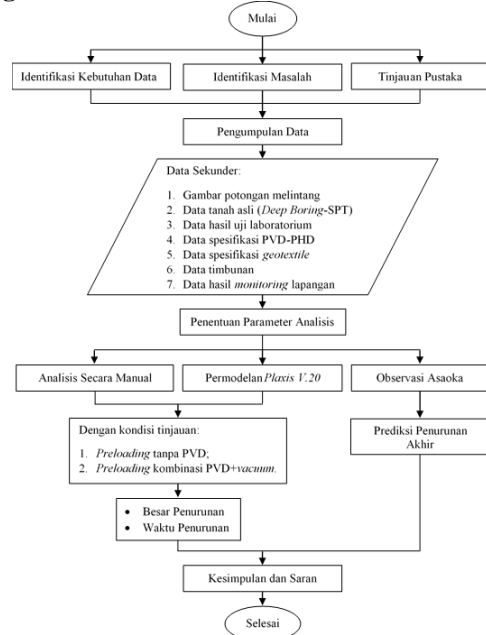
Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan untuk menunjang proses penelitian yang dimana dari data-data tersebut akan diolah sesuai dengan teori-teori yang ada sehingga tujuan dari suatu penelitian tersebut dapat tercapai. Adapun data-data yang diperoleh berupa data sekunder dari PT. Nindya Karya sebagai berikut.

- a. Gambar potongan melintang.
- b. Data tanah dasar:
 - Data hasil pengujian lapangan (*Deep Boring – Standard Penetration Test*);
 - Data hasil pengujian laboratorium.
- c. Data timbunan.

- d. Data spesifikasi *prefabricated vertical drain* (PVD) dan *prefabricated horizontal drain* (PHD).
- e. Data spesifikasi *geotextile*.
- f. Data *monitoring* lapangan.

Bagan Alir Penelitian



Gambar 7. Bagan Alir Penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Geoteknik Tanah Dasar

Analisis parameter data tanah dilakukan dengan cara korelasi berdasarkan nilai N-SPT dan perhitungan dengan rumus empirik yang ada.

Tabel 2. Rekapitulasi Korelasi dan Perhitungan Parameter Tanah Perlapisan

Parameter	Satuan	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Lapisan 6
Kedalaman (H)	m	0,8	7,2	2	2	3	3
Berat Volume (γ)	gr/c m ³	1,480	1,483	1,525	1,537	1,589	1,651
Kohesi (c)	gr/c m ²	56,300	56,300	92,500	99,220	127,46	169,41
Sudut Geser (ϕ)	°	3,422	3,470	4,581	4,978	5,179	5,363
Koefisien Konsolidasi (Cv)	cm ² / det	0,0002	0,0002	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003
Koefisien Kompresi (Cc)	-	6	8	0	0	7	5
Angka Pori (e)	-	0,5883	0,5894	0,5875	0,5836	0,5690	0,5599
Specific Gravity (Gs)	-	1,467	1,453	1,355	1,344	1,296	1,259
Plasticity Index (PI)	-	2,480	2,505	2,630	2,625	2,649	2,700
Plastic Limit (PL)	%	16,710	16,852	16,910	16,579	16,740	17,872
γ_{sat}	%	33,020	32,866	31,930	31,883	30,906	29,229
Koefisien Permeabilitas (k)	gr/c m ³	1,600	1,613	1,692	1,693	1,702	1,753
Sudut Dilatasi (ψ)	m/ha	0,0006	0,0006	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002
Swell Index (Cs)	ri	799	240	936	959	332	875
	°	0	0	0	0	0	0
	-	0,1177	0,1179	0,1175	0,1167	0,1152	0,1120

Analisis Konsolidasi Primer pada Tanah Asli dengan Metode *Preloading*

Pada tahap awal analisis secara manual dilakukan perhitungan konsolidasi primer pada tanah asli sebelum penggunaan PVD+*vacuum*.

- Perhitungan tekanan *overburden* efektif (P_o')
- Perhitungan tekanan *overburden* efektif dilakukan pada setiap lapisan yang berbeda spesifikasinya. Tekanan *overburden* efektif dapat

dihitung dengan menggunakan persamaan (5) dan direkapitulasi pada tabel berikut.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Perhitungan Tekanan *Overburden* Efektif

Lapisan (m)	H (cm)	γ (gr/cm ³)	Gs	e _o	γ_w (gr/cm ³)	γ_{sat} (gr/cm ³)	γ' (gr/cm ³)	Po (gr/cm ²)
0,00 - 0,40	40,00	1,480	2,480	1,467	-	-	-	59,20
0,40 - 0,80	40,00	1,480	2,480	1,467	1,00	1,600	0,600	83,20
0,80 - 8,00	720,00	1,483	2,505	1,453	1,00	1,613	0,613	524,88
8,00 - 10,00	200,00	1,525	2,630	1,355	1,00	1,692	0,692	663,31
10,00 - 12,00	200,00	1,537	2,625	1,344	1,00	1,693	0,693	801,97
12,00 - 13,00	100,00	1,562	2,629	1,321	1,00	1,702	0,702	872,14

- Perhitungan tegangan akibat beban timbunan (Δp)

Perhitungan tegangan akibat beban timbunan dilakukan pada setiap lapisan yang berbeda spesifikasinya. Berikut perhitungan beban ekuivalen: $q_o = q_o$ (*sandblanket*) + q_o (tanah pilihan)

$$q_o = \gamma_{\text{timbunan}} \cdot H_{\text{preloading}} + \gamma_{\text{timbunan}} \cdot H_{\text{preloading}}$$

$$q_o = (1,70 \cdot 90) + (1,444 \cdot 90)$$

$$q_o = 282,960 \text{ gr/cm}^2$$

Tegangan akibat beban timbunan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (6) dan direkapitulasi pada tabel berikut.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Perhitungan Tegangan Akibat Beban Timbunan

q _o (gr/cm ²)	a/z	b/z	I	Δp (gr/cm ²)
282,960	3,500	76,625	0,5	141,480
282,960	1,750	38,313	0,5	141,480
282,960	0,175	3,831	0,5	141,480
282,960	0,140	3,065	0,5	141,480
282,960	0,117	2,554	0,485	137,236
282,960	0,108	2,358	0,483	136,670

- Perhitungan besar penurunan (S_c)

Perhitungan besar penurunan dilakukan pada setiap lapisan menggunakan persamaan (3) karena tanah berada pada kondisi *normally consolidated* ($P_c = P_o$) dan direkapitulasi pada tabel berikut.

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Perhitungan Besar Penurunan

Lapisan	H (cm)	Cc	e _o	Po (gr/cm ²)	Δp (gr/cm ²)	S _c (cm)	(m)
0,00 - 0,40	40,00	0,5883	1,467	59,20	141,480	5,057	0,051
0,40 - 0,80	40,00	0,5883	1,467	83,20	141,480	4,115	0,041
0,80 - 8,00	720,00	0,5894	1,453	524,88	141,480	17,931	0,179
8,00 - 10,00	200,00	0,5875	1,355	663,31	141,480	4,189	0,042
10,00 - 12,00	200,00	0,5836	1,344	801,97	137,236	3,416	0,034
12,00 - 13,00	100,00	0,5762	1,321	872,14	136,670	1,569	0,016
Σ						36,278	0,363

- Perhitungan waktu penurunan (t)

Pada BM-03 (STA 2+575) tiap lapisan memiliki nilai koefisien konsolidasi (C_v) yang berbeda, maka nilai C_v yang digunakan ialah nilai C_v gabungan yang diperoleh dari persamaan (9). Untuk derajat konsolidasinya adalah 90% dengan faktor waktu 0,848 yang diperoleh dari Tabel 1. Berikut adalah perhitungan waktu penurunan.

$$C_v \text{ gabungan} = \frac{(H_1 + H_2 + \dots + H_n)^2}{\left(\frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}} + \frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}} + \dots + \frac{H_n}{\sqrt{C_{vn}}}\right)^2}$$

C_v gabungan =

$$\frac{(40 + 40 + 720 + 200 + 200 + 100)^2}{\left(\frac{40}{\sqrt{0,00026}} + \frac{40}{\sqrt{0,00026}} + \frac{720}{\sqrt{0,00028}} + \frac{200}{\sqrt{0,0004}} + \frac{200}{\sqrt{0,0004}} + \frac{100}{\sqrt{0,00039}}\right)^2}$$

C_v gabungan = 0,00032 cm²/detik

$$t = \frac{T_v \times H_{dr}^2}{C_v}$$

$$t = \frac{0,848 \times 650^2}{0,00032}$$

$$t = 1126764080,997 \text{ detik} = 1126764080,997 / 3600 / 24 / 30 / 12 = 36,226 \text{ tahun}$$

Analisis Konsolidasi Primer pada Tanah Asli dengan Metode *Preloading* Kombinasi PVD+*Vacuum*

Perhitungan penurunan konsolidasi dengan metode *preloading* kombinasi PVD+*vacuum* terdapat penambahan tekanan hisap pompa sebesar 80 kPa (800 gr/cm²) yang digunakan sebagai tegangan tambahan ($\Delta p'$) (Puspita, 2017). Sehingga perhitungan besarnya penurunan menggunakan tegangan total (Δp_{total}). Rekapitulasi hasil perhitungan besar penurunan setelah ditambah tekanan pompa ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 6. Rekapitulasi Hasil Perhitungan Besar Penurunan Setelah Ditambah Tekanan Pompa

Lapisan	H (cm)	Cc	e _o	Po (gr/cm ²)	Δp (gr/cm ²)	$\Delta p'$ (gr/cm ²)	Δp_{total} (gr/cm ²)	S _c (cm)	S _{c total} (m)
0,00 - 0,40	40,00	0,5883	1,467	59,20	141,48	800	941,48	11,713	0,117
0,40 - 0,80	40,00	0,5883	1,467	83,20	141,48	800	941,48	10,402	0,104
0,80 - 8,00	720,00	0,5894	1,453	524,88	141,48	800	941,48	77,189	0,772
8,00 - 10,00	200,00	0,5875	1,355	663,31	141,48	800	941,48	19,143	0,191
10,00 - 12,00	200,00	0,5836	1,344	801,97	137,24	800	937,24	16,740	0,167
12,00 - 13,00	100,00	0,5762	1,321	872,14	136,67	800	936,67	7,864	0,079
Σ								143,050	1,431

Total besar penurunan diatas merupakan besar penurunan *ultimate* (akhir) yakni ketika derajat konsolidasi telah mencapai 100%, sedangkan derajat konsolidasi yang ditargetkan adalah 90% (Das, 1995 dalam Pasaribu, 2012). Perhitungan besar penurunan dengan PVD menggunakan pola segiempat dengan jarak 1 meter akan diuraikan sebagai berikut.

- Perhitungan Koefisien Konsolidasi Horizontal (Ch)

$$C_v = 0,00032 \text{ cm}^2/\text{detik}$$

$$Ch = 2 \cdot C_v = 2 \cdot 0,00032 = 0,00064 \text{ cm}^2/\text{detik}$$

Diambil nilai $Ch = 2 \cdot C_v$ (karena setelah pemasangan PHD ditimbun dengan pasir setebal 40 cm, sehingga diasumsikan aliran arah horizontal lebih cepat daripada aliran arah vertikal).

- Perhitungan Derajat Konsolidasi Vertikal (U_v)

Kedalaman PVD = 13 meter

$$H_d = 13 / 2 = 6,5 \text{ meter} = 650 \text{ cm}$$

Misalkan pada waktu (t) = 190 hari = 16416000 detik

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H_d^2} = \frac{0,00032 \cdot 16416000}{650^2} = 0,01235$$

$$U_v = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot T_v}{\pi}}}{\left(1 + \left(4 \cdot \frac{T_v}{\pi}\right)^{0,179}\right)} = \frac{\sqrt{\frac{4 \cdot 0,01235}{\pi}}}{\left(1 + \left(4 \cdot \frac{0,01235}{\pi}\right)^{0,179}\right)} = 0,125\%$$

- Perhitungan Perhitungan Faktor Waktu Horizontal (Th)

$$s \text{ (jarak antar PVD)} = 100 \text{ cm}$$

$$d \text{ (diameter jangkauan)} = 1,13 \cdot s = 1,13 \cdot 100 = 113 \text{ cm}$$

$$\text{Misalkan pada waktu (t)} = 190 \text{ hari} = 16416000 \text{ detik}$$

$$T_h = \frac{C_{h.1}}{d^2} = \frac{0,00064 \cdot 16416000}{113^2} = 0,818$$

- Perhitungan Derajat Konsolidasi Horizontal (Uh)

$$s \text{ (jarak antar PVD)} = 100 \text{ cm}$$

$$d \text{ (diameter jangkauan)} = 1,13 \cdot s = 1,13 \cdot 100 = 113 \text{ cm}$$

$$a \text{ (lebar PVD)} = 9,795 \text{ cm}$$

$$b \text{ (tebal PVD)} = 0,334 \text{ cm}$$

$$dw \text{ (diameter lingkaran ekivalen PVD)} = \frac{2 \cdot (a+b)}{\pi^2} =$$

$$\frac{2 \cdot (9,795 + 0,334)}{3,14^2} = 6,452 \text{ cm}$$

$$n = \frac{d}{dw} = \frac{113}{6,452} = 17,515$$

$$F_n = \left(\frac{n^2}{(n^2-1)} \right) \cdot \ln(n) - \left(\frac{3n^2-1}{(4n^2)} \right) = \left(\frac{17,515^2}{(17,515^2-1)} \right) \cdot \ln$$

$$(17,515) - \left(\frac{3 \cdot 17,515^2 - 1}{(4 \cdot 17,515^2)} \right) = 2,123$$

Menurut Hansbo (2004) dalam Pasaribu (2012), untuk pemasangan mandrel yang non-bundar $d_s/d_w = 4$ dan $k_h/k_s = 2$, maka:

$$F_s = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1 \right) \cdot \ln \left(\frac{d_s}{d_w} \right) = (2 - 1) \cdot \ln(4) = 1,386$$

$$F = F_n + F_s = 2,123 + 1,386 = 3,510$$

$$U_h = 1 - \exp \left(\frac{-8 \cdot T_h}{F} \right) = 1 - \exp$$

$$\left(\frac{-8 \cdot 0,818}{3,510} \right) = 0,845 \%$$

- Perhitungan Derajat Konsolidasi

$$U = 1 - [(1 - U_v) \cdot (1 - U_h)] = 1 - [(1 - 0,125) \cdot (1 - 0,845)] = 0,864 \%$$

- Perhitungan Besar Penurunan (Sc) pada waktu ke-n

$$S_c = U \cdot S_{ult} = 0,864 \% \cdot 1,431 = 1,236 \text{ meter}$$

Tabel 7. Rekapitulasi Perhitungan Besarnya Penurunan dengan Metode *Preloading* kombinasi PVD+*Vacuum*

hari	t detik	Tv	Uv %	Th	Uh %	U %	Sc m
0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	432000	0,000	0,020	0,022	0,048	0,067	0,096
10	864000	0,001	0,029	0,043	0,093	0,120	0,171
...
150	12960000	0,010	0,111	0,645	0,770	0,796	1,139
155	13392000	0,010	0,113	0,667	0,781	0,806	1,153
160	13824000	0,010	0,115	0,688	0,792	0,816	1,167
165	14256000	0,011	0,117	0,710	0,802	0,825	1,180
170	14688000	0,011	0,119	0,732	0,811	0,834	1,193
175	15120000	0,011	0,120	0,753	0,820	0,842	1,204
180	15552000	0,012	0,122	0,775	0,829	0,850	1,216
185	15984000	0,012	0,124	0,796	0,837	0,857	1,226
190	16416000	0,012	0,125	0,818	0,845	0,864	1,236
195	16848000	0,013	0,127	0,839	0,852	0,871	1,246
200	17280000	0,013	0,129	0,861	0,859	0,877	1,255
205	17712000	0,013	0,130	0,882	0,866	0,884	1,264
210	18144000	0,014	0,132	0,904	0,873	0,889	1,272
215	18576000	0,014	0,133	0,925	0,879	0,895	1,280
220	19008000	0,014	0,135	0,947	0,884	0,900	1,288

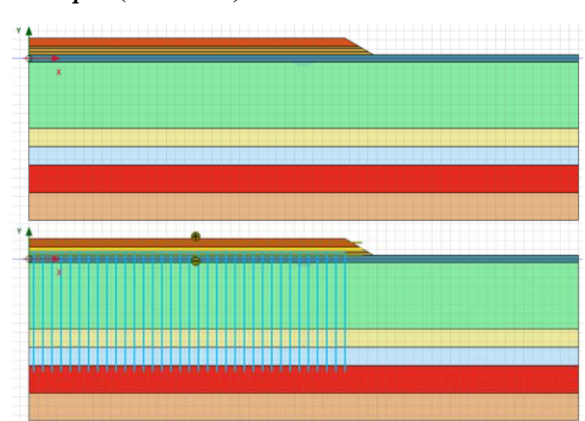
Analisis Konsolidasi Primer pada Tanah Asli dengan Metode Numerik (FEM)

Analisis konsolidasi primer dengan metode numerik akan menggunakan program plaxis V.20 dengan 2 kondisi, yaitu kondisi tanah asli dengan metode *preloading* saja (tanpa PVD) dan kondisi tanah asli dengan metode *preloading* kombinasi PVD+*vacuum consolidation*. Analisis dengan program ini akan menggunakan 2 model, yaitu model *Soft-Soil* untuk lapisan tanah asli dan model *Mohr-Coulomb* untuk lapisan tanah timbunan. Sedangkan tipe material akan digunakan tipe *undrained* dan tipe *drained* sesuai dengan jenis lapisan tanah. Untuk data input parameter tanahnya ditunjukkan pada tabel berikut ini.

Tabel 8. Parameter Data *Input Plaxis*

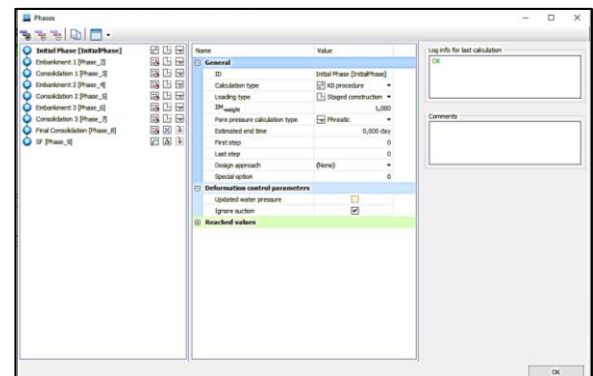
Parameter Tanah	Satuan	Tanah Asli						Timbunan	
		Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Lapisan 6	Sand/Market	Preloading
Jenis Tanah	-	Clayey Silt	Clayey Silt	Sandy Clay	Silty Clay	Clay	Sandy Clay	Sand	Sandy Clay
Konsistensi	-	Soft	Soft	Soft	Soft	Soft	Medium dense	Medium	Medium dense
Material Model	-	Soft-Soil	Soft-Soil	Soft-Soil	Soft-Soil	Soft-Soil	Soft-Soil	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Material Tipe	-	Undrained	Undrained	Drained	Undrained	Undrained	Drained	Drained	Drained
Kedalaman (H)	m	0,8	7,2	2	2	3	3	0,9	0,9
γsat	kN/m ³	14,800	14,831	15,250	15,367	15,893	16,506	17,000	14,440
γsub	kN/m ³	15,999	16,135	16,921	16,933	17,017	17,526	19,167	22,157
Koefisien Permeabilitas (ks)	m/hari	0,0004320	0,0004320	0,0004320	0,0004320	0,0004320	0,0002875	0,012942	0,0001859
Koefisien Permeabilitas (ky)	m/hari	0,0006799	0,0006240	0,0000936	0,0000936	0,0003332	0,0002875	0,012942	0,0001859
Modulus Young (E)	kN/m ²	-	-	-	-	-	-	10000	2000
Angka Poisson (ν)	-	-	-	-	-	-	-	0,25	0,30
Kohesi (c)	kN/m ²	5,63	5,63	9,25	9,92	11,31	16,94	0,00	7,00
Sudut Geser (φ)	°	3,422	3,470	4,581	4,978	5,556	5,363	30	30
Sudut Dilatasi (ψ)	°	0	0	0	0	0	0	0	0
Koefisien Kompresi (Cc)	-	0,5883	0,5894	0,5875	0,5836	0,5762	0,5599	-	-
Swell Index (Cs)	-	0,1177	0,1179	0,1175	0,1167	0,1152	0,1120	-	-
Angka Pori (e)	-	1,467	1,453	1,355	1,344	1,296	1,259	-	0,551

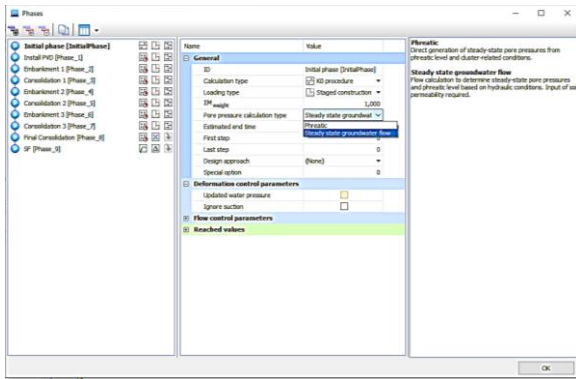
a. Input (Masukan)



Gambar 8. Model Geometri: tanpa PVD (atas), dengan PVD (bawah)

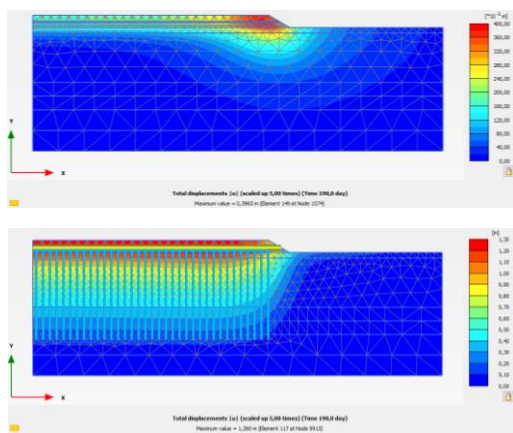
b. Calculate (Perhitungan)





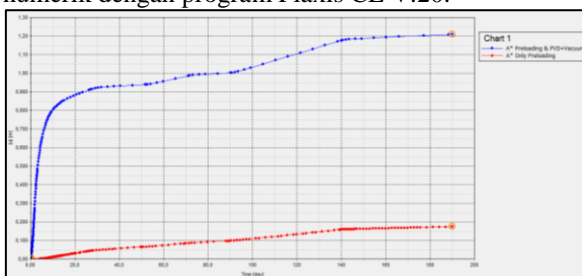
Gambar 9. Jendela Perhitungan: tanpa PVD (atas), dengan PVD (bawah)

c. **Output (Keluaran)**



Gambar 10. Defomasi Total (190 hari): tanpa PVD (atas), dengan PVD (bawah)

Berikut grafik perbandingan besar penurunan terhadap waktu antara metode *preloading* saja dan metode *preloading* PVD+*vacuum* hasil analisis numerik dengan program Plaxis CE V.20.



Grafik 1. Perbandingan Besar Penurunan vs Waktu – Metode *Preloading* Saja dan Metode *Preloading* Kombinasi PVD+*Vacuum*

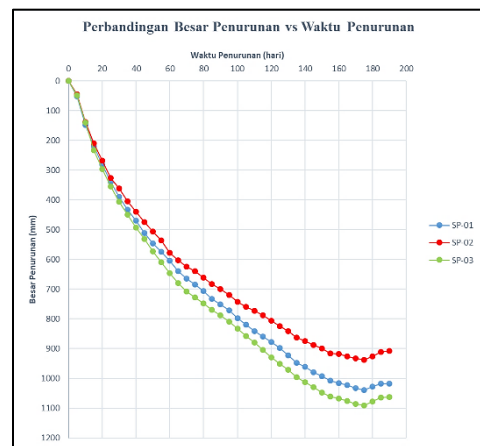
Prediksi Penurunan Akhir Metode Observasi Asaoka (1978)

Pada STA 2+575 *module-02* terdapat 3 *settlement plate* yaitu SP-01, SP-02 dan SP-03. Maka akan dilakukan prediksi penurunan akhir pada ketiga data *monitoring settlement plate* ini yang dimulai dari hari ke-0 sampai hari ke-190 dengan interval waktu (Δt) 5 hari yang ditunjukkan oleh tabel berikut.

Tabel 9. Besar Penurunan Hari ke-n SP-01, SP-02 dan SP-03

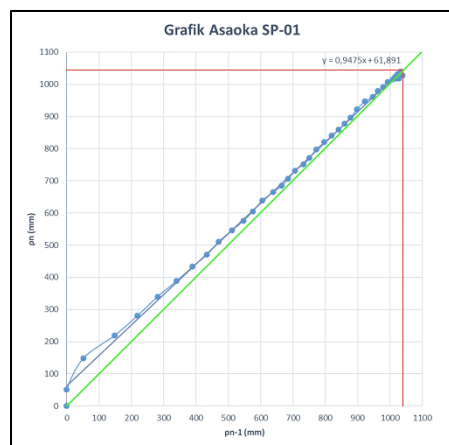
Hari ke-	SP-01		SP-02		SP-03	
	ρ_n (mm)	ρ_{n-1} (mm)	ρ_n (mm)	ρ_{n-1} (mm)	ρ_n (mm)	ρ_{n-1} (mm)
0	0	0	0	0	0	0
5	51	0	45	0	48	0
10	148	51	139	45	140	48
...
150	992	979	900	888	1048	1029
155	1007	992	915	900	1060	1048
160	1015	1007	917	915	1067	1060
165	1023	1015	925	917	1076	1067
170	1032	1023	933	925	1085	1076
175	1039	1032	937	933	1090	1085
180	1028	1039	925	937	1078	1090
185	1018	1028	911	925	1064	1078
190	1018	1018	908	911	1062	1064

Perbandingan besar penurunan vs waktu penurunan masing-masing *settlement plate* ditunjukkan oleh grafik berikut.

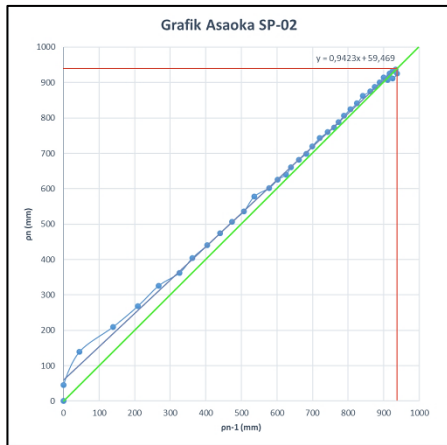


Grafik 2. Perbandingan Besar Penurunan vs Waktu Penurunan

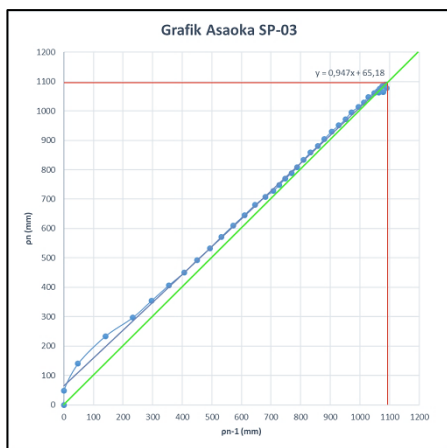
Kemudian dilakukan prediksi penurunan akhir (*final*) metode Asaoka dengan membuat grafik hubungan ρ_n (sumbu-y) dan nilai ρ_{n-1} (sumbu-x) berdasarkan Tabel 9. sehingga membentuk garis linear yang akan berpotongan dengan garis 45°. Dari titik potong ini akan didapat nilai x untuk kemudian dilakukan prediksi penurunan akhir menggunakan persamaan regresi dari setiap grafik. Berikut grafik asaoka dari setiap *settlement plate*.



Grafik 3. Grafik Asaoka SP-01



Grafik 4. Grafik Asaoka SP-02



Grafik 5. Grafik Asaoka SP-03

Berdasarkan hasil regresi maupun perhitungan dengan persamaan (25), penurunan akhir setiap settlement plate ditunjukkan oleh tabel berikut.

Tabel 10. Hasil Penurunan Akhir Metode Asaoka

Settlement Plate	Penurunan hari ke-190 (mm)	Penurunan Final (mm)
SP-01	1018	1178,876
SP-02	908	1030,667
SP-03	1062	1229,820
Rata-rata	996	1146,454

Rekapitulasi Hasil Perhitungan

a. Metode *Preloading* saja (tanpa PVD+vacuum)

Rekapitulasi hasil analisis manual dan hasil analisis numerik metode *preloading* saja untuk derajat konsolidasi 90% ditunjukkan oleh tabel berikut.

Tabel 11. Rekapitulasi Hasil Perhitungan dan Hasil *Monitoring Lapangan* Metode *Preloading* Saja

Penurunan Konsolidasi	Analisis Manual		Analisis Numerik	
	Waktu (hari)	Besar Penurunan (m)	Waktu (hari)	Besar Penurunan (m)
Metode <i>Preloading</i> (tanpa PVD+Vacuum)	13222	0,363	7502	0,862

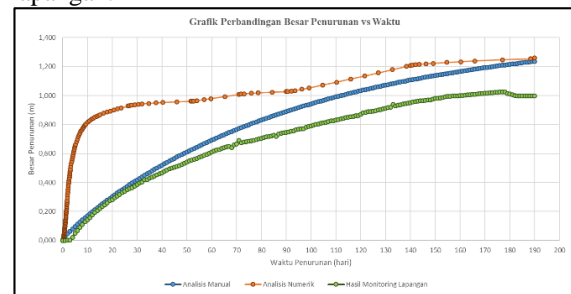
b. Metode *Preloading* kombinasi PVD+vacuum

Rekapitulasi hasil analisis manual dan hasil analisis numerik metode *preloading* kombinasi PVD+vacuum ditunjukkan oleh tabel berikut.

Tabel 12. Rekapitulasi Hasil Perhitungan dan Hasil *Monitoring Lapangan* Metode *Preloading* Kombinasi PVD+Vacuum

Penurunan Konsolidasi	Waktu (hari)	Besarnya Penurunan		Hasil <i>Monitoring Lapangan</i> (m)
		Analisis Manual (m)	Analisis Numerik (m)	
Metode <i>Preloading</i> (dengan PVD+Vacuum)	190	1,236	1,260	0,996

Berikut grafik perbandingan besar penurunan terhadap waktu metode PVD+vacuum *preloading* antara hasil analisis secara manual, hasil analisis secara numerik dengan program *Plaxis CE V.20*, dan hasil *monitoring instrument settlement plate* di lapangan.



Grafik 6. Perbandingan Besar Penurunan vs Waktu – Analisis Secara Manual, Analisis Secara Numerik, dan Hasil *Monitoring Lapangan*

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

1. Besar penurunan dengan metode *preloading* saja (tanpa prefabricated vertical drain+vacuum consolidation) yang dianalisis dengan perhitungan manual menggunakan teori konsolidasi satu dimensi Terzaghi (1943) untuk derajat konsolidasi 90% adalah sebesar 0,363 meter dengan lama waktu penurunan 13222 hari. Lamanya waktu penurunan ini dipengaruhi oleh nilai koefisien konsolidasi (C_v) yang relatif kecil karena hanya parameter tanah tersebut yang digunakan dalam rumus empirik untuk mencari waktu penurunan tersebut. Sedangkan untuk analisis numerik menggunakan program *plaxis V.20* untuk derajat konsolidasi 90% (*final consolidation phase*) adalah sebesar 0,862 meter dengan lama waktu penurunan 7502 hari.
2. Besar penurunan dengan metode *preloading* kombinasi *prefabricated vertical drain+vacuum* yang dianalisis dengan perhitungan manual menggunakan teori persamaan konsolidasi satu dimensi Terzaghi (1943) adalah sebesar 1,236 meter dengan lama waktu penurunan 190 hari. Sedangkan untuk analisis numerik menggunakan program *Plaxis CE V.20* adalah sebesar 1,260 meter dengan lama waktu penurunan 190 hari.
3. Besar penurunan hasil *monitoring settlement plate* di lapangan pada STA 2+575 *module-02*

- adalah sebesar 0,996 meter dengan lama waktu penurunan 190 hari.
4. Berdasarkan hasil analisis manual maupun analisis numerik dari kedua metode yaitu metode *preloading* saja dan metode *preloading* kombinasi PVD+*vacuum*, dapat disimpulkan bahwa metode *preloading* kombinasi PVD+*vacuum* terbukti dapat mempercepat waktu konsolidasi dan penurunan yang terjadi merata sepanjang pemasangan PVD. Sedangkan perbaikan dengan metode *preloading* saja menghasilkan penurunan yang relatif kecil dan dalam waktu yang cukup lama serta penurunan yang tidak merata.
 5. Prediksi penurunan akhir (*final*) dengan metode Asaoka yang ditinjau dari 3 *settlement plate* pada STA 2+575 adalah sebesar 1,146 meter.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Bapak Dr. Ing. Ir. Eka Priadi, M.T. dan Bapak Ir. Ahmad Faisal, DEA. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dalam menyelesaikan penelitian ini serta kepada Bapak Ir. Abubakar Alwi, M.T., Ph.D. dan Bapak Ir. Aprianto, M.Sc. selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan masukan sehingga dapat menyempurnakan hasil akhir penelitian ini. Terima kasih pula kepada teman-teman seperjuangan dan keluarga besar Laboratorium Mekanika Tanah yang telah banyak membantu dan memberi dukungan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ameratunga, Jay, Nagaratnam Sivakugan dan Braja M. Das. 2016. *Correlation of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. India: Springer.
- Asaoka, A. 1978. Observations Procedure of Settlement Prediction. *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 18 No.4.
- Atmadjati, Arista. 2014. *Manajemen Operasional Bandar Udara*. Edisi 1, Cetakan ke-2. Yogyakarta: Deepublish.
- Ashari, Fahmi N. 2019. *Studi Pemampatan Tanah Lunak Pelabuhan Kijing Yang Dianalisis Dengan Metode Numerik*. Pontianak: Fakultas Teknik Untan. Darwis. 2017. *Dasar-dasar Teknik Perbaikan Tanah*. Yogyakarta: Pustaka AQ.
- Das, B. M., Noor Endah dan Indrasurya B. Mochtar. 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Jilid 1. Jakarta: Erlangga.
- Das, B. M., Noor Endah dan Indrasurya B. Mochtar. 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Jilid 2. Jakarta: Erlangga.
- Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah. 2004. *Pedoman Konstruksi dan Bangunan: Perencanaan Konstruksi Timbunan Jalan Di Atas Gambut Dengan Metode Prapembebanan*.
- Hardiyatmo, H. C. 2010. *Mekanika Tanah 1*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, H. C. 2010. *Mekanika Tanah 2*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Nawir, Hasbullah. 2012. Prediksi Penurunan Tanah Menggunakan Prosedur Observasi Asaoka (Studi Kasus: Timbunan Di Bontang, Kalimantan Timur). *Jurnal Teknik Sipil ITB*, Vol. 19, No. 2.
- Pasaribu, T.H., 2012. Analisa Penurunan Pada Tanah Lunak Akibat Timbunan (Studi Kasus Runway Bandara Medan Baru). *Jurnal Teknik Sipil USU*. Vol. 1 No. 2.
- PLAXIS 2D Connect Edition V.20. 2020.
- PLAXIS b. v. 2007. *PLAXIS Version 8 Material Models Manual*. Netherlands: A. A. Balkema Publishers.
- Puspita, N, dan Capri, A, 2017. Analisa Penurunan Tanah Lunak dengan Beberapa Metode Konsolidasi pada Proyek Jalan Tol Palindra. *Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil*. Vol.6 No.1, Hal 20 dan Hal 22.
- Satindra, S. K. 2018. *Analisa Penurunan Konsolidasi Metode Preloading Dengan Dan Tanpa Prefabricated Vertical Drain (PVD) Pada Proyek Jalan Tol Balikpapan-Samarinda Segmen Lima STA 20+375*. Samarinda: Kementerian Riset Teknologi Dan Pendidikan Tinggi Politeknik Negeri Samarinda Jurusan Teknik Sipil Program Studi Rekayasa Jalan Dan Jembatan.
- Terzaghi, Karl dan Peck Ralph B. 1987. *Mekanika Tanah dalam Praktek Rekayasa, Edisi Kedua*. Jakarta: Erlangga.
- Winner, D. (2017). *Perbaikan Tanah Dasar Menggunakan Prefabricated Vertical Drain Dengan Variasi Kedalaman Dan Perkuatan Lereng Dengan Turap*. Surabaya: Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Sepuluh Nopember.