

Analisis Penurunan Dan Tekanan Air Pori Berlebih Pasca PVD Berdasarkan Data Settlement Plate Dan Piezometer*Analysis of Post PVD Settlement and Excess Pore Water Pressure Based on Settlement Plate and Piezometer Data***Larissa Adwitya Laili¹, Galuh Chrismaningwang^{2*}, Niken Silmi Surjandari³, Pria Ardhana⁴**

^{1,2,3}Program Studi Teknik Sipil -Fakultas Teknik-Universitas Sebelas Maret Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia
Alamat korespondensi: Jl. Halilintar No.52, Jebres, Kec. Jebres, Kota Surakarta, Jawa Tengah 57126
email: galuh@ft.uns.ac.id*

⁴ PT Tetrasa Geosinindo-Jakarta, Indonesia
Alamat korespondensi: Roxy Mas Business Center Blok C4 No.18-20, Jl. K.H. Hasyim Ashari, Cideng, RW.8, Cideng, Kecamatan Gambir, Kota Jakarta Pusat, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10150

Abstract

Prefabricated Vertical Drain (PVD) is an artificial drainage system installed into soft soil layers and an element used to accelerate the consolidation process of soft soil. This study aims to determine the difference in subsidence between empirical calculations, modeling with Plaxis and actual data based on settlement plate instruments, and to determine the difference excess pore water pressure values between modeling with Plaxis and actual data based on CPTu data processing and piezometer data. Empirical analysis of soil consolidation uses Terzaghi's one-dimensional consolidation method, and numerical analysis uses PLAXIS 2D V8.6 software. This research uses soil data from a reclamation project on the north coast of Jakarta. The results of the settlement value by analysis using Plaxis and empirical results show a relatively small difference compared to field measurements. The largest difference between field measurements and Plaxis analysis is 1,67%, while the largest difference between field measurements and empirical is 0,26%. The results of the analysis of excess pore water pressure at 7m and 12m from CPTu data compared to piezometer readings has the largest difference of 4,5%, but the output results from Plaxis when compared to piezometer readings show a significant difference of 57,98%.

Keywords: *Excess_Pore_Pressure; Plaxis; PVD; Settlement*

Abstrak

*Prefabricated Vertical Drain (PVD) yaitu sistem drainase buatan yang dipasang ke dalam lapisan tanah lunak dan sebuah elemen yang digunakan untuk mempercepat proses konsolidasi tanah lunak. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besar perbedaan penurunan antara perhitungan empiris, pemodelan dengan Plaxis dan data aktual berdasarkan instrumen *settlement plate*, serta mengetahui besar perbedaan nilai tekanan air pori berlebih antara pemodelan dengan Plaxis dan data aktual berdasarkan olah data CPTu dan data piezometer. Analisis empiris konsolidasi pada tanah menggunakan metode konsolidasi satu dimensi Terzaghi, dan analisis numeris menggunakan *software* PLAXIS 2D V8.6. Penelitian ini menggunakan data tanah pada Proyek reklamasi salah satu pantai utara Jakarta. Hasil nilai penurunan dengan analisis menggunakan Plaxis maupun hasil empiris menunjukkan perbedaan yang relatif kecil dibandingkan dengan pengukuran lapangan. Perbedaan terbesar antara pengukuran lapangan dan analisis Plaxis adalah 1,67%, sedangkan perbedaan terbesar antara pengukuran lapangan dan hasil empiris adalah 0,26%. Hasil analisis tekanan air pori berlebih pada 7m dan 12m dari data CPTu dibandingkan bacaan piezometer memiliki perbedaan terbesar 4,5%, tetapi hasil output dari Plaxis jika dibandingkan dengan bacaan piezometer menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan yaitu sebesar 57,98%.*

Kata Kunci: *Air_Pori_Berlebih; Plaxis; PVD; Penurunan*

Please cite this article as:

Laili, L.A., Chrismaningwang, G., Surjandari, N.S., & Ardhana, P. (2024). Analisis Penurunan dan Tekanan Air Pori Berlebih Pasca PVD Berdasarkan Data Settlement Plate Dan Piezometer. *Media Teknik Sipil*, 22(2), 75-89. <https://doi.org/10.22219/jmts.v22i2.35653>

PENDAHULUAN

Reklamasi merupakan upaya pembuatan lahan kering yang biasanya dilakukan oleh negara atau kota dengan laju pertumbuhan dan kebutuhan penduduk yang meningkat pesat tetapi memiliki keterbatasan lahan (Tumbel et al., 2020). Area reklamasi dalam proses pembuatannya akan membutuhkan timbunan tanah. Adanya timbunan ini akan mengakibatkan terjadinya penurunan tanah. Penurunan yang terjadi pada tanah yaitu saat air maupun udara dalam tanah keluar akibat tanah tersebut diberi beban (Utami et al., 2022). Beban timbunan yang digunakan harus direncanakan dengan melihat pemampatan dan daya dukung tanahnya. Daya dukung tanah dasar yang rendah misalnya pada tanah lempung lunak akan memerlukan perbaikan sebelum dilakukannya proses reklamasi. Perbaikan tanah dasar ini bertujuan untuk menyelesaikan masalah yang utama yaitu mengurangi bahkan menghilangkan pemampatan yang akan terjadi pada tanah serta meningkatkan daya dukung tanah. Metode perbaikan tanah dasar ini biasanya dilakukan dengan penggunaan *preloading*. *Preloading* merupakan cara yang paling sederhana dan ekonomis untuk mempercepat konsolidasi dengan memberikan beban sementara sebesar beban rencana bangunan pada tanah berupa timbunan (Anwarrizqika, 2023). *Preloading* untuk perbaikan tanah dasar terbagi atas dua jenis yaitu *preloading* konvensional dan *vacuum preloading*.

Metode konvensional dilakukan dengan menerapkan beban gravitasi (beban vertikal) di atas struktur konstruksi. Metode vakum menggunakan tekanan negatif di bawah permukaan tanah. Kedua metode *preloading* ini baik metode konvensional maupun metode vakum sering dikombinasikan dengan *vertical drain* atau drainase vertikal. Cara penggunaan drainase vertikal yaitu dengan membentuk saluran drainase pada arah vertikal agar terjadi proses konsolidasi satu dimensi, sehingga diperoleh lintasan pengaliran di dalam tanah sehingga pori pada tanah yang berupa air maupun udara akan keluar (Wicaksana et al., 2019). *Preloading* sering dikombinasikan dengan drainase vertikal yang dikenal sebagai *Prefabricated Vertical Drain* (PVD). (et al., 2021) mengemukakan bahwa metode

preloading yang dikombinasikan dengan PVD dapat mengurangi material untuk pra pembebanan, mengurangi material timbunan, dapat mempercepat waktu konsolidasi, dan menaikkan stabilitas tanah. PVD merupakan metode populer yang dilakukan dengan tujuan membuat proses konsolidasi cepat selesai dengan mengurangi panjang jalur drainase sehingga kelebihan air pori dalam tanah dapat menyebar dalam waktu yang lebih singkat (Chrismaningwang et al., 2020).

Sistem drainase vertikal pracetak yang pertama kali diperkenalkan oleh Kjellman pada tahun 1936 adalah *Prefabricated Vertical Drain* (PVD). PVD digunakan dengan memancang pada lapisan yang merupakan tanah lunak dan berasal dari bahan sintesis buatan untuk membantu memperbaiki tanah lunak. PVD dipancang ke dalam tanah sesuai dengan kedalaman tertentu melalui proses penetrasi mandrel menggunakan drum rotasi (*rotating drum*). Pemasangan PVD biasanya bertujuan untuk menurunkan nilai koefisien permeabilitas (k) tanah, sehingga proses konsolidasi tanah lunak atau bahkan tanah berair misalnya tanah pada area reklamasi dapat lebih cepat selesai.

Penggunaan PVD untuk metode dalam memperbaiki tanah jenis tanah lunak ini biasanya digabungkan dengan *preloading*, yang dapat dilakukan dengan metode pembebanan seperti tekanan vakum atau beban timbunan. Pada tahun 1952, Kjellman mengusulkan metode pembebanan vakum yang dilakukan dengan menggunakan tekanan negatif sebagai prabeban. Penggunaan *preloading* vakum memiliki beberapa keuntungan, seperti material timbunan berupa tanah tidak diperlukan, perbaikan tanah lebih cepat selesai, dan tanah dasar menjadi stabil selama proses perbaikan tanah tersebut. *Preloading* dengan vakum akan menciptakan kondisi tekanan air pori negatif, yang berarti tegangan efektif pada tanah akan meningkat dan menjadi lebih kukuh daripada pembebanan dengan material timbunan (Ding et al., 2019).

Pemasangan PVD dengan pembebanan vakum untuk perbaikan tanah dasar di area reklamasi akan menyebabkan penurunan tanah di daerah tersebut. Alat yang dapat digunakan untuk mengukur besarnya penurunan tanah salah satunya adalah *settlement plate*, sedangkan alat lain yang

digunakan untuk mengukur tekanan air pori dalam tanah adalah piezometer. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besar perbedaan penurunan tanah antara perhitungan empiris metode Terzaghi, hasil pemodelan numeris dengan bantuan Plaxis dan data aktual berdasarkan instrumen *settlement plate*, serta mengetahui besar perbedaan nilai tekanan air pori berlebih antara hasil pemodelan dengan Plaxis dan aktual berdasarkan data CPTu dan data piezometer. Pemodelan dan analisis numeris menggunakan bantuan *software* Plaxis V8.6 dengan *Finite Element Method* (FEM).

(Gunawan et al., 2020) melakukan analisis konsolidasi tanah, yang merupakan tanah timbunan dengan perbaikan tanah menggunakan PVD dari data uji CPTu di lapangan. Hasil dari analisis ini hasil nilai penurunan dari pengukuran alat *settlement plate* (SP) yang dibandingkan dengan keluaran pemodelan bantuan program dengan metode elemen hingga mendapatkan perbedaan sebesar 16 persen dengan penurunan total pada bacaan alat SP sebesar 164mm serta hasil pemodelan dengan menggunakan program metode beda hingga menunjukkan hasil 191mm.

(Purba et al., 2022) melakukan analisis penurunan dengan metode pembebanan dengan kombinasi PVD berdasarkan hasil perhitungan analitis dibandingkan dengan Plaxis 2D. Hasil penelitian ini menunjukkan hasil hitungan memiliki besaran penurunan tanah sebesar 6,801 meter, hasil survey penurunan aktual di lapangan sebesar 6,718 meter, dan hasil dari *software* Plaxis 2D sebesar 6,673 m dengan pemodelan 6 titik nodal pada Plaxis.

(Gofar, 2023) melakukan penelitian tentang percepatan konsolidasi tanah lunak dengan aplikasi metode tekanan vakum dikombinasikan dengan drainase vertikal. Hasil dari pembacaan *settlement plate* pada penelitian ini menunjukkan penurunan aktual pada saat tekanan vakum dihentikan antara 10 cm dan 84,64 cm, sedangkan prediksi penurunan total bervariasi antara 10 cm dan 76,24 cm.

(Sukiman & Yakin, 2017) melakukan penelitian mengenai deformasi dan eksese tekanan air pori pada jenis tanah lempung lunak akibat pemberian timbunan di atasnya. Hasil dalam penelitian ini menunjukkan

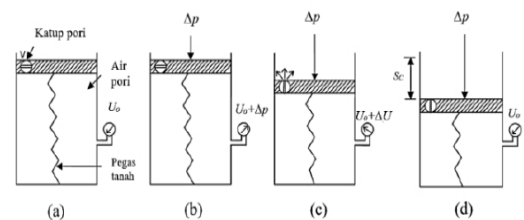
penurunan dan eksese air pori pada model numeris Plaxis memiliki hasil yang lebih kecil dibanding nilai aktual di lapangan.

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengidentifikasi seberapa besar perbedaan nilai penurunan pada area reklamasi antara perhitungan empiris, hasil pemodelan dengan Plaxis dan data aktual di lapangan berdasarkan data alat *settlement plate*, serta mengetahui besar perbedaan nilai tekanan air pori berlebih pada area reklamasi antara hasil pemodelan menggunakan Plaxis dengan aktual di lapangan berdasarkan data CPTu dan alat piezometer.

Penurunan 1-D Terzaghi

(Hardiyatmo, 2010) menyatakan bahwa penurunan tanah akibat adanya beban dapat digolongkan menjadi dua, yaitu penurunan segera (*immediate settlement*) serta penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*). Teori konsolidasi satu dimensi Terzaghi ini memodelkan proses konsolidasi pada tanah yang diakibatkan tekanan yang diberikan akan lebih optimal terjadi dengan adanya saluran pori yang dapat mengeluarkan air pori dari dalam tanah, saluran pori dapat diasumsikan di lapangan seperti halnya pipa PVD (Borsalino et al., 2022).

Mekanisme konsolidasi satu dimensi menurut Terzaghi dapat dianalogikan dengan pegas dan piston seperti pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Analogi Konsolidasi Satu Dimensi (Hardiyatmo, 2010)

Gambar 3(a) menunjukkan kondisi sistem dalam keadaan seimbang, dimana katup tertutup dan belum ada beban yang diberikan di atasnya. Gambar 3(b) menunjukkan sistem yang diberikan beban sebesar Δp di atas silinder dengan kondisi katup yang masih tertutup, sehingga air tidak dapat keluar dari silinder dan semua beban akan ditahan oleh air, sehingga kondisi pada gambar ini menggambarkan kondisi tak terdrainasi (*undrained*) yang terjadi di dalam tanah.

Gambar 3(c) menunjukkan sistem yang diberikan beban sebesar Δp dengan kondisi katup terbuka, sehingga air keluar melewati lubang piston dan pegas akan menahan beban yang diberikan di atasnya. Kondisi ini akan menunjukkan tekanan air pori yang berkurang dengan pembacaan alat ukur hidrostatis sebesar $u_0 + \Delta u$ dan pada proses ini menunjukkan proses konsolidasi sedang terjadi. Gambar 3(d) menggambarkan air pori di dalam tanah sudah keluar semua sehingga tanah sudah dalam kondisi terdrainasi (*drained*) dan proses konsolidasi telah selesai.

Penurunan konsolidasi terbagi menjadi dua yaitu *normally consolidated* dan *over consolidated*. Penentuan jenis konsolidasi ini didapatkan dari nilai OCR dan akan memengaruhi penggunaan rumus penurunannya. Perhitungan konsolidasi akan membutuhkan nilai koefisien perubahan volume (m_v). Nilai m_v pada tanah tertentu dapat diambil nilai tipikal sesuai dengan nilai pada Tabel 1. di bawah ini.

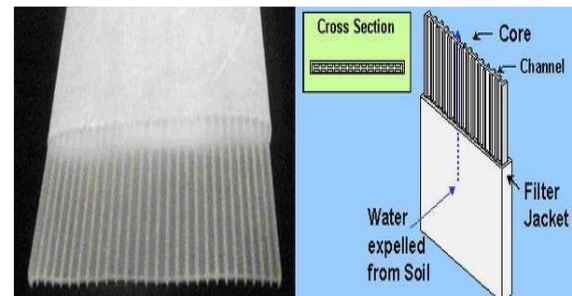
Tabel 1. Nilai tipikal m_v sesuai dengan jenis tanah (Ameratunga et al., 2016)

Jenis tanah	m_v (m^2/kN)	Kompresibilitas
Lempung <i>heavily overconsolidated</i>	< 0,05	sangat rendah
Lempung sangat kaku	0,05 – 0,1	rendah
Lempung kaku	0,1 – 0,3	sedang
Lempung terkonsolidasi normal	0,3 – 1,5	tinggi
Lempung organik atau gambut	>1,5	sangat tinggi

PVD dengan Pembebanan Vakum

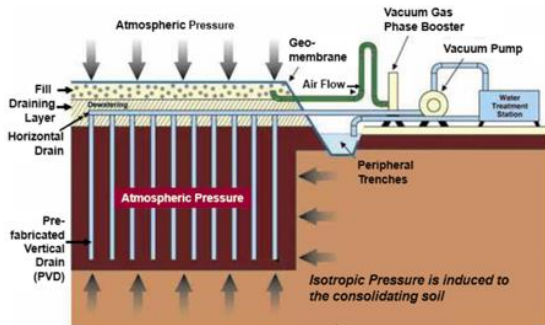
Prefabricated Vertical Drain (PVD) menurut (Indonesia & Nasional, 2017) yaitu material geosintetik komposit yang akan baik digunakan dalam tujuan perbaikan tanah lunak dengan jenis tanah yang memiliki nilai permeabilitas rendah, nilai kompresibilitas tinggi dan pada umumnya sangat berkaitan dengan tambahan prapembebanan (*preloading*) berupa tanah timbunan. Material PVD dibuat dari inti yang berupa semacam plastik berbentuk sedotan dengan fungsi untuk mengalirkan air dari dalam tanah keluar

(Lilabsari et al., 2018). PVD dapat dilakukan pemasangan dengan pola segitiga atau bujursangkar, tetapi pola bujursangkar lebih mudah diaplikasikan di lapangan (Indraratna et al., 2014). Bagian-bagian PVD ditunjukkan pada Gambar 2. berikut.



Gambar 2. Bagian Prefabricated Vertical Drain (PVD) (Zhafirah & Amalia, 2019)

Metode pra-pembebanan terbagi menjadi dua yaitu konvensional dengan tanah timbunan dan metode pembebanan vakum. Metode vakum pada dasarnya mirip dengan metode preloading konvensional, di mana perbaikan tanah dengan metode pembebanan vakum yang dibantu dengan adanya drainase vertikal memiliki tujuan dalam mempercepat waktu penyelesaian konsolidasi saat masa konstruksi berlangsung, sehingga sesaat setelah bangunan selesai, penurunan tanah akan terjadi sangat kecil (Hardiyatmo, 2017). Sistem pembebanan vakum ini memiliki tujuan untuk membuat proses konsolidasi cepat selesai tanpa menambah tinggi timbunan yang dapat mengakibatkan keruntuhan geser pada tanah (Efendi et al., 2019). Keunggulan metode pembebanan vakum yang dibantu dengan adanya PVD adalah proses konsolidasi yang selesai cepat karena aliran rembesan air pori pada arah horizontal akan terjadi akibat adanya tekanan negatif. Tekanan air negatif berupa isapan yang menyebar pada drainase vertikal dan lapisan pasir pada permukaan tanah akan mempercepat selesainya konsolidasi, mengurangi perpindahan tanah secara vertikal, serta meningkatkan tegangan efektif tanah. Skema konsolidasi vakum dapat dilihat pada Gambar 3. berikut.



Gambar 3. Skema konsolidasi vakum (Masse et al., 2001)

Tekanan Air Pori Berlebih dari Data CPTu

Tekanan air pori berlebih (*excess pore water pressure*) adalah tekanan air yang melebihi tekanan air jenuh dalam tanah atau batuan. Ekses tekanan air pori biasanya terjadi dalam kondisi saat tanah atau batuan berada pada kondisi jenuh air dan memiliki kemampuan untuk mengalirkan air dari dalam porinya. Pengujian disipasi pada tanah yang terkonsolidasi normal, akan menyebabkan kelebihan tekanan air pori akan hilang dan tekanan air pori pada akhirnya akan menjadi tekanan air hidrostatik pada disipasi akhir ($u=100\%$, $u=u_0$), sedangkan pada tanah yang terkonsolidasi, nilainya akan lebih tinggi daripada tekanan air hidrostatik karena mengandung sisa tekanan air pori berlebih (u_f) ($u=100\%$, $u=u_f$).

Instrumen *Settlement Plate* dan Piezometer

Settlement plate merupakan instrumen yang dipasang di lapangan untuk memonitoring besarnya penurunan yang terjadi, sedangkan piezometer adalah alat yang digunakan untuk memonitoring besarnya tekanan air pori yang terjadi di lapangan. *Settlement plate* akan dapat menunjukkan nilai penurunan yang terjadi aktual di lapangan tetapi harus diolah terlebih dahulu dengan analisis balik menggunakan metode asaoka, sedangkan piezometer adalah alat yang langsung menunjukkan nilai tekanan air pori aktual.

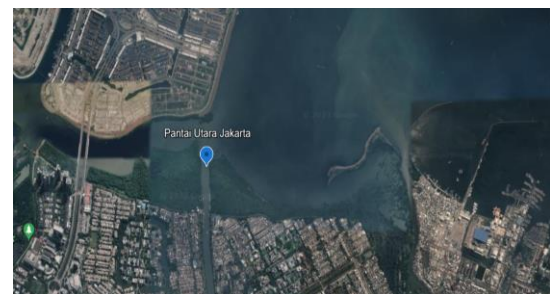
Analisis balik (*back analysis*) dilakukan dari bacaan instrumen *settlement plate* di lapangan yang kemudian diolah dengan metode (Asaoka, 1978). Metode asaoka ini dikembangkan berdasarkan teori konsolidasi satu dimensi Terzaghi. Nilai pada bacaan *settlement plate* penurunan hari ini jika diplotkan dengan penurunan hari kemarin

pada grafik regresi linear asaoka. Garis yang berpotongan dari hasil plot ini dengan garis 45° merupakan perkiraan besar penurunan total.

Tekanan air pori berlebih (ekses) yang terjadi di lapangan dapat diketahui dengan data bacaan alat piezometer. Piezometer digunakan untuk memonitoring perubahan air pori pada tanah dasar yang terjadi secara aktual di lapangan. Piezometer ini dapat dipasang pada kedalaman tertentu yang ingin ditinjau. Bacaan piezometer ini akan menunjukkan nilai tegangan air pori.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini meninjau satu lokasi proyek yaitu pada proyek reklamasi salah satu pantai utara di Jakarta. Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Lokasi Proyek Reklamasi Di Pantai Utara Jakarta (Sumber: Google Earth)

Data yang digunakan untuk pengolahan pada penelitian ini didapatkan dari data sekunder dari laporan hasil pengujian tanah untuk proyek reklamasi dari PT Tetrasa Geosinindo. Data yang digunakan untuk perhitungan dan pemodelan antara lain data uji CPTu dari lapangan, data hasil uji laboratorium sampel tanah, data bacaan instrumen yaitu instrumen *settlement plate* dan piezometer, serta data penunjang yang lainnya seperti data spesifikasi PVD.

Tahapan penelitian dilakukan dalam beberapa tahapan yaitu pengumpulan data-data sekunder dari PT Tetrasa Geosinindo, analisis empiris penurunan dengan metode konsolidasi satu dimensi Terzaghi, perhitungan tekanan air pori berlebih dengan olah data hasil CPTu di lapangan, analisis numeris dengan pemodelan menggunakan bantuan *software* Plaxis. Hasil analisis empiris penurunan dan *output* penurunan dari

Plaxis tersebut akan dibandingkan dengan pembacaan instrumen di lapangan, yaitu bacaan instrumen *settlement plate* (SP) untuk bacaan penurunan aktual di lapangan. Hasil hitungan tekanan air pori berlebih dari data CPTu dan *output excess pore water pressure* dari Plaxis akan dibandingkan dengan bacaan instrumen piezometer untuk bacaan tekanan air pori aktual di lapangan. Bacaan alat SP ini nantinya harus diolah terlebih dahulu dengan metode (Asaoka, 1978). Besar perbedaan antara hitungan, pemodelan dan aktual di lapangan yang akan dibahas pada penelitian ini.

Perhimpunan Data Sekunder

Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa data uji CPTu dari lapangan dan data uji tanah di laboratorium dari PT Tetrasa Geosinindo. Data lain yang digunakan yaitu data instrumen SP dan piezometer serta data spesifikasi PVD, yang kemudian data-data tersebut akan digunakan sesuai dengan kebutuhan penelitian ini.

Analisis Empiris Penurunan 1-D Terzaghi

Penurunan secara empiris dihitung dengan metode konsolidasi satu dimensi Terzaghi menurut (Das, 1985) menjelaskan bahwa penurunan akibat konsolidasi dari data uji lapangan dapat dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$S_c = m_v \cdot H \cdot \Delta P \quad (1)$$

dengan,

- S_c : pemampatan konsolidasi (m)
- H : tinggi lapisan tanah *compressible* (m)
- ΔP : tambahan tegangan (kN/m^2)
- m_v : koefisien perubahan volume (m^2/kN)

Perhitungan penurunan secara empiris ini dilakukan dengan cara mengkorelasikan data CPTu untuk parameter-parameter yang dibutuhkan pada perhitungan.

Perhitungan Tekanan Air Pori Berlebih dari Olah Data CPTu

Hasil uji CPTu di lapangan akan mendapatkan grafik tekanan air pori yang terjadi dan diukur dari titik pengambilan. Grafik ini akan diolah untuk mendapatkan nilai tekanan air pori berlebih menurut (Rahardjo et al., 2016) dapat dibuat Persamaan (2) berikut.

$$u_2 = u_0 + \Delta u + u_f \quad (2)$$

dengan,

- u_2 : tekanan ar pori diukur
- u_0 : tekanan air pori hidrostatik
- Δu : tekanan air pori berlebih
- u_f : sisa tekanan air pori berlebih (nilai = 0, pada tanah NC)

Dengan tekanan air pori hidrostatik dapat dihitung menggunakan Persamaan (3) berikut.

$$u_0 = \rho + g + h \quad (3)$$

dengan,

- u_0 : tekanan ar pori hidrostatik (Pa)
- ρ : massa jenis air (kg/m^3)
- g : percepatan gravitasi (m/s^2)
- h : tinggi kolom air (m)

Analisis Numeris dengan Plaxis

Analisis secara numeris dilakukan dengan pemodelan bantuan *software* PLAXIS untuk mengetahui deformasi struktur berupa penurunan dan tekanan air pori berlebih pasca model dipasang PVD dengan pembebanan vakum. Pemodelan pada PLAXIS V8.6 melalui beberapa tahapan.

Pengaturan Awal

Pemodelan pada PLAXIS V8.6 dimodelkan dengan *axisymetry* dengan jumlah titik nodal yaitu *15-node*.

Input geometri model

Penelitian ini hanya terbatas pada daerah yang dilakukan pemancangan PVD hanya dengan beban vakum. Pemodelan hanya dimodelkan satu cell dengan *axisymetry* karena satu cell ini sudah mewakili untuk cell yang terdampak tekanan baik dari atas, samping kanan, dan samping kiri yang mana menunjukkan bahwa tekanan vakum dan *preloading* sudah terwakili oleh satu cell ini. Analisis pada penelitian ini menggunakan model *axisymetry* dengan pola susunan PVD segiempat yang digunakan karena pemodelan dianggap sebagai satu buah sumuran dan menyesuaikan data yang didapat dari lapangan.

Pemodelan geometri ini diberikan model PVD pada bagian kiri model yaitu berupa *input drain* pada Plaxis dan geometri dimodelkan tanpa timbunan dan beban dimasukkan sebesar beban vakum karena batasan penelitian hanya meninjau PVD

dengan beban vakum 100%. *Mesh* dibuat dengan tingkat distribusi elemen yaitu *fine* (halus) setelah geometri tanah diinput. Batas aliran drainase diberikan pada bagian kanan saja, bagian bawah tidak diberikan karena merupakan drainase dua arah. Batas konsolidasi pun hanya diberikan pada bagian kanan karena merupakan konsolidasi satu dimensi. *Input Ground Water Level (GWL)* diberikan sesuai dengan data *GWL* titik yang ditinjau.

Input parameter tanah

Pemodelan material tanah pada pemodelan penelitian ini bahwa tanah diasumsikan sebagai soft soil dengan material tanah yairu undrained, dan beban vakun diasumsikan sebagai beban merata di atas dan samping kanan kiri PVD.

Calculation

Tahapan analisis secara model dibagi menjadi dua fase yaitu :

- a. Fase *plastic analysis*, yaitu fase yang dilakukan pertama di Plaxis dan merupakan gambaran tahapan konstruksi yang terjadi di lapangan. Tahap ini belum terjadi penurunan dan tekanan air pori di dalam tanah masih dalam kondisi awal.

- b. Fase *consolidation analysis*, yaitu fase konsolidasi tanah akibat beban yang diberikan pada tanah. Plaxis akan menghitung penurunan yang terjadi dan tekanan air pori total pada dalam tanah dari fase konsolidasi ini.

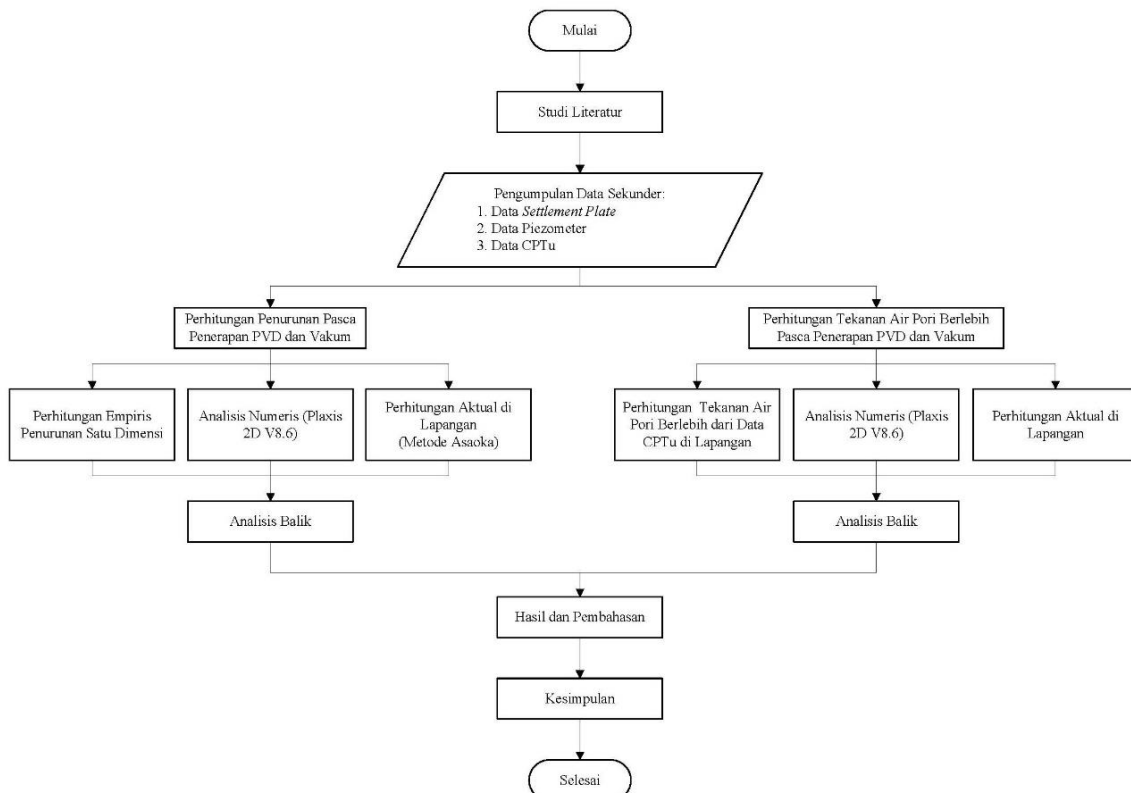
Output

Analisis Plaxis V8.6 menghasilkan *output* berupa besar penurunan tanah dan tekanan air pori berlebih yang terjadi dari kedua fase perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya.

Analisis Balik (Back Analysis)

Analisis balik (*back analysis*) dilakukan dari bacaan instrumen, baik SP maupun piezometer. Bacaan instrumen SP di lapangan akan mendapatkan banyak data yang harus diolah menggunakan metode Asaoka untuk mendapatkan nilai penurunan, Grafik asaoka akan didapatkan nilai alfa dan beta ($y = \beta x + \alpha$) yang dapat digunakan untuk menghitung penurunan total dengan Persamaan (4).

$$S = \frac{\alpha}{1-\beta} \tag{4}$$



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

Analisis balik untuk tekanan air pori berlebih menggunakan bacaan instrumen piezometer di lapangan akan langsung didapatkan nilai tekanan air pori berlebih yang terjadi aktual. Tahapan penelitian jika disajikan dalam diagram alir dapat dilihat pada Gambar 5.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang digunakan meliputi data uji CPTu dan hasil pengujian tanah di laboratorium. Data yang dipakai untuk pengolahan hitungan pada penelitian ini

merupakan data sekunder dari PT Tetrasa Geosinindo. Kawasan yang digunakan untuk analisis yaitu daerah yang dilakukan pemancangan PVD hanya dengan beban vakum 100%, yaitu pada daerah ROW 30 Distrik 27 yang terdiri dari tiga *cell* dan Jl. Letjen Sudirman yang terdiri dari tiga *cell*.

Hasil Rekapitulasi Penurunan

Hasil rekapitulasi perhitungan konsolidasi total pada tiap-tiap titik dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Total Penurunan Pada Tiap Titik

Titik	No Cell	Lapangan (SP)	Analisis Numeris (Plaxis)	Penurunan		
				Error Analisis Numeris	Analisis Empiris	Error Analisis Empiris
		(m)	(m)	(%)	(m)	(%)
ROW 30	Cell 1	0,963	0,962	0,10%	0,966	0,26%
	Cell 2	0,968	0,952	1,67%	0,968	0,02%
	Cell 3	0,858	0,863	0,61%	0,856	0,17%
Letjen Sudirman	Cell 1	0,773	0,775	0,19%	0,774	0,05%
	Cell 2	0,778	0,782	0,54%	0,780	0,22%
	Cell 3	0,700	0,700	0,06%	0,699	0,12%

Tabel 2. menunjukkan besarnya nilai penurunan dari hasil analisis perhitungan empiris menggunakan teori konsolidasi satu dimensi Terzaghi, pemodelan dengan bantuan Plaxis, dan dibandingkan dengan bacaan instrumen SP pembacaan aktual di lapangan pada keenam cell yang ditinjau. Nilai penurunan aktual di lapangan berkisar antara 0,7 meter hingga 0,96 meter. Analisis dengan Plaxis menunjukkan nilai penurunan berkisar antara 0,7 meter hingga 0,96 meter. Analisis dengan empiris metode konsolidasi satu dimensi Terzaghi menunjukkan nilai yang berkisar antara 0,69 meter hingga 0,97 meter. Berdasarkan hasil dari analisis empiris maupun numeris menunjukkan hasil yang tidak berbeda jauh dengan pengukuran instrumen di lapangan, meskipun terdapat selisih perbedaan tapi nilai perbedaannya sangatlah kecil. Baik analisis empiris dengan metode konsolidasi satu dimensi Terzaghi maupun analisis numeris dengan pemodelan

Plaxis dapat digunakan dan dikatakan baik untuk memprediksi penurunan yang terjadi aktual di lapangan

Hasil Rekapitulasi Tekanan Air Pori Berlebih

Hasil rekapitulasi analisis tekanan air pori berlebih (Δu) dengan olah data CPTu dan numeris dengan Plaxis, serta bacaan instrumen piezometer di lapangan. Perbandingan tekanan air pori berlebih hanya ditinjau pada kedalaman 7 meter dan 12 meter menyesuaikan dengan data yang ada yaitu bacaan instrumen piezometer di lapangan. Rangkuman terkait tekanan air pori berlebih ini menunjukkan kondisi awal di mana proses vakum belum terjadi dan kondisi akhir di mana saat tekanan vakum sudah dimatikan. Rekapitulasi tekanan air pori berlebih untuk kedalaman 7 meter dan 12 meter disajikan berturut-turut dalam Tabel 3. dan Tabel 4. berikut.

Tabel 3. Rekapitulasi Nilai Tekanan Air Pori Berlebih Kedalaman 7 Meter

Titik	No Cell	Kondisi	Lapangan (Piezometer)	Analisis Data Lapangan (Data CPTu)	Eror Analisis Data CPTu	Analisis Numeris (Plaxis)	Eror Analisis Numeris
			(kPa)	(kPa)	(%)	(kPa)	(%)
ROW 30	Cell 1	<i>Initial</i>	89,86	88		114,42	
		<i>Final</i>	12,24	163		4,87	
		<i>Excess Pore Pressure</i>	77,62	75	3,38%	109,55	41,14%
	Cell 2	<i>Initial</i>	88,54	118		114,42	
		<i>Final</i>	10,56	193		2,69	
		<i>Excess Pore Pressure</i>	77,98	75	3,82%	111,73	43,28%
	Cell 3	<i>Initial</i>	66,89	88		113,6	
		<i>Final</i>	-11,04	163		5,32	
		<i>Excess Pore Pressure</i>	77,93	75	3,76%	108,28	38,95%
Letjen Sudirman	Cell 1	<i>Initial</i>	71,11	8		114,48	
		<i>Final</i>	-6,61	83		6,14	
		<i>Excess Pore Pressure</i>	77,72	75	3,50%	108,34	39,40%
	Cell 2	<i>Initial</i>	61,1	58		114,49	
		<i>Final</i>	-17,43	133		6,2	
		<i>Excess Pore Pressure</i>	78,53	75	4,50%	108,29	37,90%
	Cell 3	<i>Initial</i>	71,98	8		114,49	
		<i>Final</i>	-6,08	83		6,98	
		<i>Excess Pore Pressure</i>	78,06	75	3,92%	107,51	37,73%

Tabel 4. Rekapitulasi Nilai Tekanan Air Pori Berlebih Kedalaman 12 Meter

Titik	No Cell	Kondisi	Lapangan (Piezometer)	Analisis Data Lapangan (Data CPTu)	Eror Analisis Data CPTu	Analisis Numeris (Plaxis)	Eror Analisis Numeris
			(kPa)	(kPa)	(%)	(kPa)	(%)
ROW 30	Cell 1	<i>Initial</i>	128,62	113		115,07	
		<i>Final</i>	53,13	188		2,69	
		<i>Excess Pore Pressure</i>	75,49	75	0,65%	112,38	48,87%
	Cell 2	<i>Initial</i>	125,17	138		115,07	
		<i>Final</i>	50,56	213		1,09	
		<i>Excess Pore Pressure</i>	74,61	75	0,52%	113,98	52,77%
	Cell 3	<i>Initial</i>	128,62	113		115,19	
		<i>Final</i>	53,02	188		1,18	
		<i>Excess Pore Pressure</i>	75,6	75	0,79%	114,01	50,81%
Letjen Sudirman	Cell 1	<i>Initial</i>	122,21	88		119,29	
		<i>Final</i>	47,38	163		1,61	
		<i>Excess Pore Pressure</i>	74,83	75	0,23%	117,68	57,26%
	Cell 2	<i>Initial</i>	133,67	83		119,29	
		<i>Final</i>	59,13	158		1,53	
		<i>Excess Pore Pressure</i>	74,54	75	0,62%	117,76	57,98%
	Cell 3	<i>Initial</i>	124,74	33		119,27	
		<i>Final</i>	49,59	108		0,94	
		<i>Excess Pore Pressure</i>	75,15	75	0,20%	118,33	57,46%

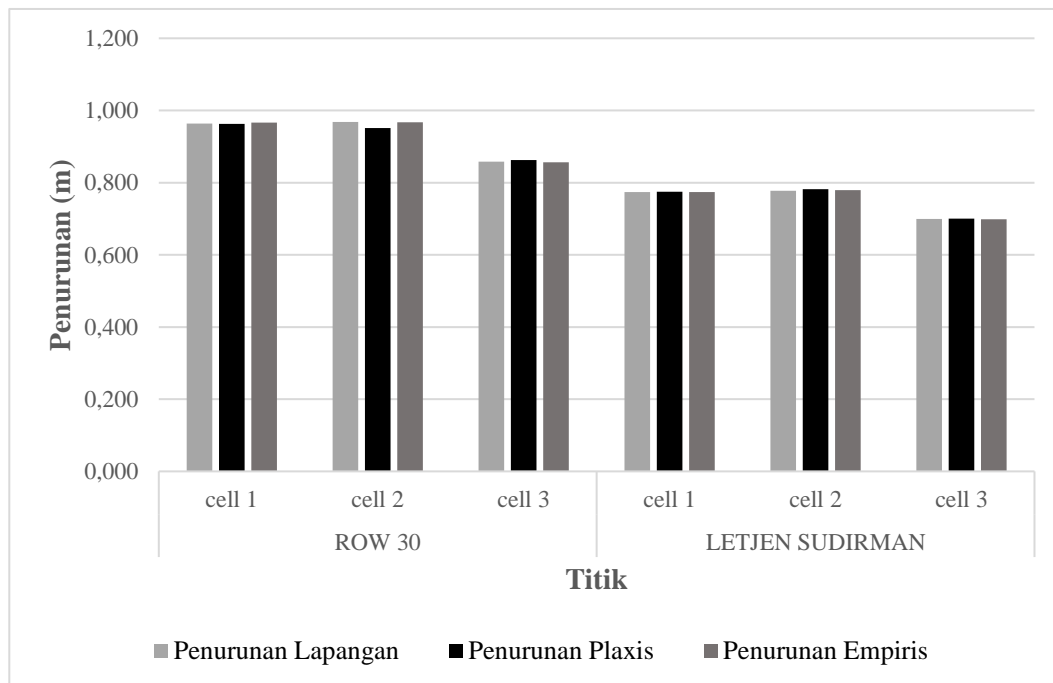
Tabel 3 menyajikan hasil rekapitulasi perhitungan tekanan air pori berlebih di dua lokasi pengamatan, yaitu ROW 30 dan Letjen Sudirman dari hasil perhitungan olah data CPTu, pemodelan dengan Plaxis dan bacaan instrumen piezometer di lapangan pada kedalaman 7 meter, sedangkan Tabel 4 menunjukkan pada kedalaman 12 meter. Perhitungan dan pemodelan ini dilakukan pada dua kedalaman, yaitu 7 meter dan 12 meter. Tekanan air pori dalam kondisi *initial* menunjukkan nilai dengan perbedaan yang tidak signifikan, sedangkan dalam kondisi *final* menunjukkan nilai negatif di beberapa cell pada bacaan instrumen piezometer yang mungkin karena adanya pengaruh perubahan kondisi tanah dalam kurun waktu pengamatan yang dilakukan. Tekanan air pori berlebih (Δu) dihitung dari selisih antara tekanan awal dan tekanan akhir pada masing-masing kedalaman. Tekanan air pori berlebih dari

hasil olah data CPTu dan bacaan instrumen piezometer di lapangan berada di kisaran 75 kPa hingga 80 kPa, sedangkan pada keluaran Plaxis menunjukkan hasil yang cukup jauh yaitu pada kisaran 110 kPa hingga 120 kPa. Keseragaman antara olah data CPTu dan bacaan piezometer ini dapat disimpulkan bahwa hasil data di lapangan menunjukkan kondisi tanah yang relatif konsisten di kedua lokasi tersebut, sedangkan pemodelan dengan Plaxis memiliki keterbatasan data untuk *input* parameter tanah pada Plaxis sehingga selisihnya cukup jauh.

Perbandingan Perhitungan, Pemodelan, dan Data Aktual Lapangan

• **Perbandingan Penurunan**

Grafik perbandingan hasil penurunan dapat dilihat pada Gambar 6. berikut.



Gambar 6. Perbandingan Penurunan Hasil Analisis Dan Data Lapangan

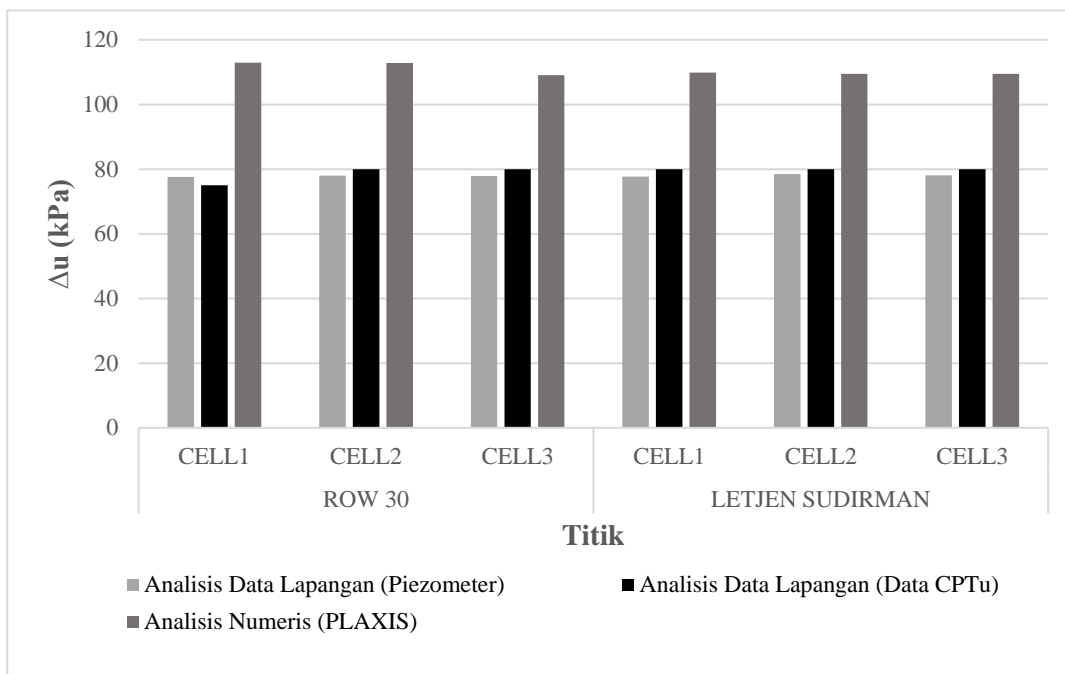
Gambar 5 menunjukkan grafik perbedaan penurunan tanah dari data lapangan, analisis numeris dengan Plaxis, dan analisis empiris. Analisis pada titik ROW 30 dan Letjen Sudirman, perbedaan hasil dari ketiganya tidak signifikan dengan selisih yang terjadi relatif kecil, sehingga menunjukkan kesesuaian yang baik dari ketiga metode analisis. Perbedaan penurunan tanah menunjukkan hasil yang tidak jauh baik dari

hasil data bacaan *settlement plate* yang menunjukkan penurunan aktual di lapangan, analisis empiris dengan metode konsolidasi satu dimensi Terzaghi dan analisis numeris dengan Plaxis. Grafik ini memberikan gambaran yang jelas bahwa analisis numeris dengan Plaxis dan analisis empiris mampu memberikan prediksi penurunan tanah yang mendekati nilai hasil aktual pengukuran lapangan berdasarkan bacaan instrumen

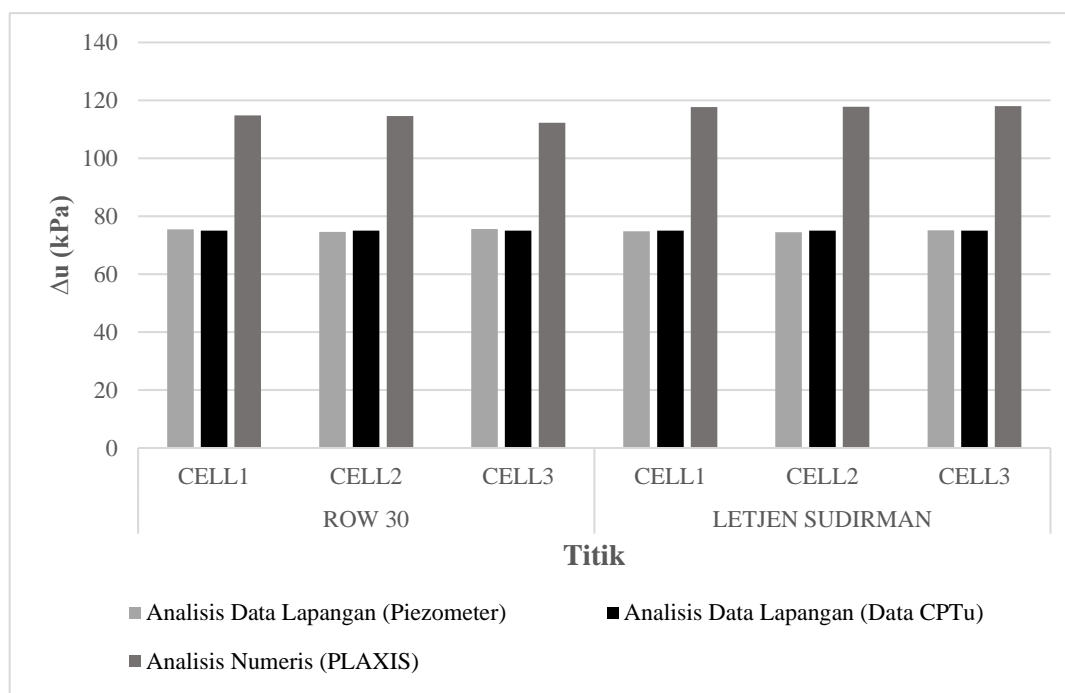
settlement plate. Variasi selisih hasil yang ada masih dalam batas yang wajar, hal tersebut menunjukkan bahwa analisis empiris dan pemodelan numeris tersebut dapat diandalkan untuk analisis penurunan tanah di area yang ingin diteliti.

Perbandingan Tekanan Air Pori Berlebih

Rangkuman perbandingan nilai tekanan air pori berlebih dari seluruh hasil analisis baik dari data bacaan piezometer di lapangan, perhitungan berdasarkan olah data CPTu di lapangan dan analisis numeris dengan bantuan *software* Plaxis dibuat dalam bentuk grafik agar dapat dilihat besar perbedaannya pada Gambar 7 dan 8 berikut.



Gambar 8. Perbandingan Hasil Tekanan Air Pori Berlebih Kedalaman 7m



Gambar 8. Perbandingan Hasil Tekanan Air Pori Berlebih Kedalaman 12m

Gambar 7 menunjukkan perbandingan nilai tekanan air pori berlebih di titik tinjau pada kedalaman 7 meter, sedangkan Gambar 8 menunjukkan perbandingan nilai tekanan air pori berlebih di titik tinjau pada kedalaman 12 meter. Kedua grafik tersebut menunjukkan seberapa besar perbedaan selisih antara hasil ketiga nilai yang didapatkan dan dapat ditarik kesimpulan bahwa dari data aktual di lapangan, tekanan pori berlebih yang diukur menggunakan piezometer dan olah data CPTu menunjukkan hasil yang tidak berbeda jauh di semua cell untuk kedua lokasi, yaitu memiliki nilai yang berkisar antara 70 kPa hingga 80 kPa. Analisis numeris dengan pemodelan pada Plaxis menunjukkan nilai tekanan pori berlebih yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode hitungan dari data lapangan, yaitu nilainya berada pada kisaran 110 kPa hingga 120 kPa.

Metode lapangan, yang meliputi data bacaan piezometer dan pengolahan data CPTu, menunjukkan hasil yang hampir serupa, menandakan bahwa kedua metode ini dapat saling mengonfirmasi keakuratan pengukuran tekanan pori berlebih. Analisis menggunakan metode numeris dengan Plaxis menunjukkan nilai yang lebih tinggi, yang kemungkinan disebabkan oleh asumsi-asumsi tertentu dalam model numerik atau perbedaan dalam parameter input yang digunakan dalam Plaxis.

Kedua grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 7. dan 8. dapat dilihat bahwa metode lapangan, yang meliputi data bacaan piezometer dan olah data CPTu serta analisis metode numeris dengan pemodelan pada Plaxis memberikan gambaran mengenai tekanan pori berlebih yang berbeda dengan perbedaan nilai selisih yang cukup signifikan. Hasil yang lebih tinggi dari *output* pada Plaxis mungkin memerlukan penyesuaian parameter dengan korelasi atau cara lainnya agar dapat mendekati hasil aktual di lapangan.

Pembahasan Hasil

Hasil pada penelitian menunjukkan nilai penurunan maupun nilai tekanan air pori eksese baik dari hitungan empiris, numeris, maupun nilai aktual di lapangan memiliki perbedaan. Perbedaan pada nilai penurunan antara hitungan empiris dengan metode Terzaghi, analisis numeris dengan bantuan *software* Plaxis, dan nilai aktual di lapangan berdasarkan bacaan instrumen *settlement*

plate, ketiganya tidak menunjukkan selisih yang signifikan yang mana nilai eror terbesar hanya pada angka 1,67%. Analisis tekanan air pori eksese dari hitungan data CPTu, numeris dengan Plaxis, dan nilai aktual di lapangan berdasarkan bacaan piezometer, dari ketiganya memiliki selisih yang cukup jauh pada pemodelan Plaxis. Hal tersebut diakibatkan oleh keterbatasan data sehingga banyak dari *input* parameter pada Plaxis hanya mengandalkan nilai korelasi atau nilai tipikalnya saja.

Nilai penurunan yang tidak berbeda jauh antar hitungan analitis, analisis dengan Plaxis dan aktual di lapangan yang dihasilkan pada penelitian ini mendukung dan sejalan dengan penelitian sebelumnya milik (Purba et al., 2022) yang mana pada penelitian sebelumnya juga hasil penurunan menunjukkan nilai yang tidak berbeda jauh selisihnya. Namun, nilai tekanan air pori eksese yang dianalisis pada penelitian ini jauh lebih besar pada pemodelan Plaxis dibandingkan dengan hitungan dan nilai aktual di lapangan, sehingga penelitian ini berbanding terbalik dengan penelitian sebelumnya milik (Sukiman & Yakin, 2017) yang menunjukkan hasil pada Plaxis lebih kecil dibandingkan dengan aktualnya. Hal tersebut sangat mungkin terjadi karena perbedaan data masukan parameter pada Plaxis yang dimiliki antara penelitian ini dan penelitian sebelumnya berbeda, sehingga akan menghasilkan nilai keluaran pada Plaxis yang berbeda pula.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, maka memperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut,

1. Penurunan dari hasil hitungan empiris dengan teori konsolidasi 1-D Terzaghi, analisis numeris dengan *software* Plaxis dan analisis balik menggunakan Asaoka dari bacaan aktual alat *settlement plate* di lapangan dari keenam cell memiliki nilai yang berkisar antara 0,6 meter hingga 1 meter, dengan pengukuran aktual di lapangan dan analisis numeris dengan Plaxis memiliki perbedaan terbesar yaitu 1,67%, dan pengukuran aktual di lapangan dan hasil hitungan empiris memiliki perbedaan terbesar yaitu 0,26%.

2. Tekanan air pori berlebih yang ditinjau pada enam cell dengan dua titik tinjau, yaitu pada kedalaman 7m dan 12m memiliki hasil dari olah data CPTu menunjukkan nilai tekanan air pori berlebih yang berkisar pada nilai 75 kPa hingga 80 kPa, hasil analisis numeris dengan bantuan Plaxis menunjukkan nilai tekanan air pori berlebih yang berkisar antara 110 kPa hingga 120 kPa, yang menunjukkan perbedaan jauh dengan data CPTu dan piezometer.

DAFTAR PUSTAKA

- Adinegoro, C., Sholeh, Moch., & Novianto, D. (2021). Metode Pelaksanaan Perbaikan Tanah Menggunakan Metode Preloading Dan Prefabricated Vertical Drain (Pvd) Pada Terminal Internasional Kijing Pontianak Kalimantan Barat. *Jurnal JOS-MRK*, 2(2), 158–162. <https://doi.org/10.55404/jos-mrk.2021.02.02.158-162>
- Ameratunga, J., Sivakugan, N., & Das, B. M. (2016). *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. New Delhi: Springer.
- Anwarrizqika, M. I. (2023). Analisis Pengaruh Kedalaman Pemancangan Prefabricated Vertical Drain terhadap Waktu Konsolidasi.
- Asaoka, A. (1978). *Observational Procedure of Settlement Prediction*. No. 4, Soils and Foundation.
- Borsalino, P., Setiawan, B., & Chrismaningwang, G. (2022). Analisis Penggunaan Prefabricated Vertical Drains (PVD) menggunakan Sigma/W Geostudio dengan Material Tanah Lunak Model Linear Elastic. 10(4), 381–388.
- Chrismaningwang, G., Hardiyatmo, H. C., Adi, A. D., & Faisal, T. (2020). The Effect of Incremental Confining Pressure on The Hydraulic Properties of PVD. 19(73), 41–48.
- Das, B. M. (1985). *Principles of Geotechnical Engineering*.
- Ding, J., Wan, X., Zhang, C., He, Z., & Zhao, L. (2019). Ground Improvement of Yangtze River Floodplain Soils with Combined Vacuum and Surcharge Preloading Method, *International Journal of Geomechanics*. 19(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001516](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001516)
- Efendi, A. B., Nurtjahtjaningtyas, I., & Wicaksono, L. A. (2019). Evaluasi Penurunan Akhir Tanah Di Lapangan Menggunakan Metode Observasional : Asaoka Dan Hiperbolik Pada Proyek. September, 82–92.
- Gofar, N. (2023). Percepatan Proses Konsolidasi Tanah Lempung Dengan Aplikasi Tekanan Vakum dan Drainase Vertikal. 17(03). <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipi.1.2023.017.03.12>
- Gunawan, T., S, A. J., & Iskandar, A. (2020). Analisis Penurunan pada Timbunan dengan Prefabricated Vertical Drain (PVD) menggunakan Data Hasil Uji CPTu. 3(1), 69–80.
- Hardiyatmo. (2010). *Mekanika Tanah II H_C Hardiyatmo*. 3, 326–393.
- Indonesia, S. N., & Nasional, B. S. (2017). SNI 8460-2017 Persyaratan perancangan geoteknik.
- Indraratna, B., Sathananthan, I., Bamuwanita, C., & Balasubramaniam, A. S. (2014). Theoretical and Numerical Perspectives and Field Observations for the Design and Performance Evaluation of Embankments Constructed on Soft Marine Clay. *Butterworth-Heinemann*, pp 83–122.
- Lilabsari, Z. F., Munawir, A., Zaika, Y., & Kuswanda, W. P. (2018). EVALUASI KINERJA PERBAIKAN TANAH LUNAK DENGAN MENGGUNAKAN PRELOADING DAN PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD). 12(2), 1–6.
- Masse, F., Spaulding, C. A., Wong, I. C., & Varaksin, S. (2001). *Vacuum Consolidation: A Review of 12 Years of Successful Development*, *Proceeding of 2001*.
- Purba, B., Roesyanto, Raphita, G. C., & Surbakti, R. (2022). Analisis Konsolidasi dengan Metode Preloading dikombinasikan dengan PVD berdasarkan Perhitungan Analitis dan Plaxis 2d. 3(12).
- Rahardjo, P. P., Anggoro, B. W., & Wirawan, A. (2016). CPTu in Consolidating Soils. *Proceeding 5th International Conference*

- on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation. ISC'5(Australia).
- Sukiman, N. A., & Yakin, Y. A. (2017). Analisis Deformasi dan Tekanan Air Pori Ekses pada Tanah Lempung Lunak akibat Beban Timbunan. 3(2), 1–12.
- Tumbel, H., Dengo, S., & Kolondam, H. (2020). Pengaruh Reklamasi Pantai Terhadap Kondisi Sosial Ekonomi Nelayan (Studi Kasus Kelompok Nelayan di Kawasan Megamas). 5 (85), 19–30.
- Utami, R. P., Utami, E. T., & Hayati, J. (2022). Tanah Lunak Metode Preloading dan Preloading Kombinasi Prefabricated Vertical Drain (PVD) dengan Variasi Panjang PVD (Studi Kasus: Pembangunan Jalan Tol Indralaya-Prabumulih. *Journal of Infrastructure Planning ...*, 2(February), 19–25.
- Wicaksana, W. P., Setiawan, B., & Suryandari, N. S. (2019). Penggunaan Drainase Vertikal Satu Arah Pada Tanah Lunak Dengan Variasi Diameter Kolom Pasir. *Matriks Teknik Sipil*, 7(1), 74–80. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v7i1.36530>
- Zhafirah, A., & Amalia, D. (2019). PERENCANAAN PRELOADING DENGAN PENGGUNAAN PREFABRICATED VERTICAL DRAIN UNTUK PERBAIKAN TANAH LUNAK PADA JALAN TOL PEJAGAN-PEMALANG. 1, 10–18.