

PERHITUNGAN KEMBALI NILAI KOEFISIEN KONSOLIDASI PADA PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK

Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, Eka Nur Fitriani dan Andri Arthono

PERHITUNGAN KEMBALI NILAI KOEFISIEN KONSOLIDASI PADA PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK

Wimpie Agoeng Noegroho Aspar¹⁾ Eka Nur Fitriani²⁾ Andri Arthono³⁾

¹⁾ **Kedeputian Teknologi Industri Rancang Bangun dan Rekayasa, - BPPT**

Gedung Teknologi 2 (251) Lantai 3 Komplek PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan 15314

Telp: 021-75875943; Facs. 021-75875946 email: wimpie.agoeng@bppt.co.id

²⁾ **Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Institut Sains Teknologi Al-Kamal**

³⁾ **Dosen Program Studi Teknik Sipil, Institut Sains Teknologi Al-Kamal**

Jl. Raya Al-Kamal No. 2, Kedoya Selatan, Kebon Jeruk, Jakarta Barat

email: ekafitriani.010410@yahoo.co.id, aarthono@gmail.com

ABSTRAK

Ketika suatu struktur karena alasan-alasan teknis, ekonomi, sosial, atau strategis terpaksa didirikan di atas tanah lunak, maka biasanya ada dua masalah geoteknik yang harus dipecahkan yaitu daya dukung yang rendah dan penurunan serta beda penurunan yang besar. Prakompresi adalah suatu proses pemampatan tanah pondasi dengan jalan pemberian pembebanan sementara (*prabeban/preloading*) sebelum konstruksi yang sesungguhnya didirikan. *Pre-fabricated vertical drain (PVD)* adalah sistem *drainase* buatan yang dipasang vertikal di dalam lapisan tanah lunak. Kondisi tanah di lokasi kegiatan relatif sangat lunak dengan koefisien konsolidasi relatif sangat tinggi mengakibatkan proses konsolidasi berjalan relatif sangat lama. Untuk itu diperlukan perbaikan tanah terlebih dahulu dengan *preloading* menggunakan PVD. Jarak spasi antar PVD yang dipasang bervariasi yaitu 50 cm, 100 cm, 150 cm, dan 200 cm dengan pola konfigurasi segitiga dan segiempat. Berdasarkan hasil perhitungan secara analitis didapatkan jarak optimum PVD untuk mencapai konsolidasi 90% adalah 150 cm dengan pola segitiga dengan proses konsolidasi dicapai selama waktu penurunan 4 bulan. Salah satu cara untuk memperdiksi penurunan akhir pada suatu tanah yang dilakukan perbaikan dengan menggunakan *pre-fabricated vertical drain* yaitu metoda Asaoka. Melalui metoda ini akhir penurunan dapat diprediksi dengan menggunakan data *settlement plate* dan dapat dihitung kembali derajat konsolidasi. Berdasarkan data dari hasil pembacaan *settlement plate* didapatkan penurunan akhir yaitu 743 mm dengan menggunakan metoda Asaoka. Dengan menggunakan metoda Asaoka, maka didapatkan nilai derajat konsolidasinya yaitu $c_v = 0,1518 \text{ cm}^2/\text{det}$ dan $c_h = 1,004 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{det}$.

Kata kunci : Konsolidasi, *prealoding*, *pre-fabricated vertical drain*, metoda Asaoka, derajat konsolidasi

ABSTRACT

If a structure for reasons of technical, economic, social, or startegic is to be built on a soft ground, then there are usually two problems to be solved, namely the low geotechnical bearing capacity and large soil deformation with sometimes differential settlement. Pre-compression is a foundation soil compression process with the provision of temporary loading (preloading) before actually constructing a building. Pre-fabricated vertical drain is a synthetic drainage system installed vertically inside soft soil layers. Soil condition at the project activity is a relatively very soft clay soil with relatively high coefficient of consolidation resulting in very long period of consolidation process. Therefore, it is needed advance soil improvement by prealoding of pre-fabricated vertical drain. Spacings of installed PVD vary, those are 50 cm, 100 cm, 150 cm, and 200 cm with a pattern of triangles and rectangles. Based on the analytical calculation, it is resulted that optimum PVD distance to achieve 90% consolidation is 150 cm with a triangular pattern. The time of consolidation was achieved within four months. Consolidation settlement is a general geotechnical problem found embankment, particulary those founded on soft soil. Consolidation settlement is caused by the discharge of soil pore water induced by the increase of stress in soil mass. Which one to predict the final of settlement at ground improvement with using pre-fabricated vertical drain that is Asaoka Method. Through this method the final settlement can be predicted using settlement plate data and can be calculated degree of consolidation. Based on data from the readings obtained a decrease in the final settlement plate is 723 mm by using Asaoka method. By using the Asaoka method, then obtained the degree of consolidation is $c_v = 0,1518 \text{ cm}^2/\text{sec}$ and $c_h = 1,004 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{sec}$.

PERHITUNGAN KEMBALI NILAI KOEFISIEN KONSOLIDASI PADA PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK

Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, Eka Nur Fitriani dan Andri Arthono

Keywords : Consolidation, preloading, pre-fabricated vertical drain, Asaoka method, degree of consolidation

I. PENDAHULUAN

Suatu struktur bangunan karena alasan- alasan teknis, ekonomi, sosial, atau strategis terpaksa harus didirikan di atas tanah lunak, maka biasanya ada dua masalah geoteknik yang harus diselesaikan yaitu daya dukung yang rendah dan penurunan serta beda penurunan yang relatif besar. Walaupun pondasi dalam dapat mengatasi kedua masalah tersebut, penyelesaian ini menjadi tidak ekonomis bila konstruksi berdiri di atas daerah yang luas, misalnya : embankment jalan, landas pacu pesawat, kompleks perumahan, pabrik, tangki- tangki di kilang minyak, dan proyek reklamasi.

Salah satu metode untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan menggunakan teknik prakompresi. Prakompresi adalah suatu proses pemampatan tanah pondasi dengan jalan pemberian pembebanan sementara (prabeban/preloading) sebelum konstruksi yang sesungguhnya didirikan. Proses konsolidasi akan semakin cepat terjadi dengan menggunakan metode prakompresi yang dikombinasikan dengan pemasangan PVD.

PVD adalah sistem drainase buatan yang dipasang vertikal di dalam lapisan tanah lunak. Sistem drainase vertikal ini mempunyai bentuk berupa sabuk berpenampang persegi panjang, terdiri dari bagian luar berupa penyaring yang terbuat dari bahan sintetik seperti geotextile, kertas atau goni dan bagian dalam yang berfungsi sebagai media aliran air yang terbuat dari plastik atau serabut organik. Kombinasi sistem ini bertujuan untuk memperpendek waktu perbaikan lapisan tanah lempung yang cukup tebal karena dengan penggunaan PVD akan menyebabkan terjadinya aliran air pori arah radial/horizontal selain aliran arah vertikal yang menyebabkan air pori dapat dikeluarkan dengan lebih cepat. Penerapan PVD ini biasanya dianalisis menggunakan metode elemen hingga untuk peningkatan kinerja tanggul pada tanah lempung lunak¹⁾. Selanjutnya Basau dkk.²⁾ melakukan analisis regangan sama (equal strain) dalam rangka meningkatkan konsolidasi dengan mempertimbangkan gangguan tanah di sekitarnya.

Penurunan tanah pada dapat diprediksi dengan melakukan observasi di lapangan. Salah satu metode yang dapat digunakan dalam memprediksi analisis penurunan tanah berdasarkan observasi di lapangan yaitu dengan menggunakan metode Asaoka. Melalui metode ini, besarnya penurunan tanah aktual dapat

diprediksi tanpa membutuhkan parameter- parameter yang digunakan pada analisis konsolidasi, seperti data tekanan air pori, panjang drainase, regangan maksimum tanah, dan koefisien konsolidasi. Pada metode Asaoka ini juga, kita dapat menghitung kembali koefisien konsolidasi menggunakan data penurunan dari pembacaan instrumentasi settlement plate di lapangan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teori Prakompresi menggunakan PVD

Tujuan utama metode prakompresi baik dengan atau tanpa PVD adalah untuk mencapai derajat konsolidasi tertentu dalam batas waktu yang ditentukan. Berdasarkan uji skala penuh terhadap konsolidasi tanggul yang dipasang menggunakan PVD menunjukkan bahwa penurunan tanah akibat konsolidasi terjadi relatif lebih kecil³⁾. Derajat konsolidasi rata-rata, U , diukur dengan membandingkan tegangan air pori terdisipasi, U_d , terhadap tegangan air pori awal, U_o , yaitu tegangan air pori ketika beban diberikan atau dengan membandingkan penurunan pada suatu waktu tertentu, S_t , terhadap penurunan primer yang diperkirakan akan terjadi, S_f .

$$U = \frac{u_d}{u_o} = \frac{S_t}{S_f} \quad (1)$$

dimana U merupakan derajat konsolidasi rata-rata.

2.2 Waktu Konsolidasi

Waktu yang diperlukan untuk mencapai derajat konsolidasi rata-rata akibat aliran air pori dalam arah vertikal, U_v , dihitung menurut persamaan pendekatan yang diberikan oleh Terzaghi⁴⁾ adalah

$$\text{untuk } 0 \% \leq U_v \leq 53 \% \quad : \\ T_v = 0,25 \pi (U_v/100)^2 \quad (2)$$

$$\text{untuk } 53 \% \leq U_v \leq 100 \% \quad : \\ T_v = 1,781 - 0,933 \{ \log(100 - U_v \%) \} \quad (3)$$

dimana T_v adalah faktor waktu.

Sivaram dan Swamee⁵⁾ menyarankan pendekatan antara hubungan derajat konsolidasi vertikal rata-rata dengan faktor waktu konsolidasi untuk

PERHITUNGAN KEMBALI NILAI KOEFISIEN KONSOLIDASI PADA PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK

Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, Eka Nur Fitriani dan Andri Arthono

keseluruhan nilai, seperti pada persamaan berikut ini

$$U_v = \frac{\left(\frac{4T_v}{\pi}\right)^{0.5}}{\left[1 + \left(\frac{4T_v}{\pi}\right)^{2.8}\right]^{1.79}} \quad (4)$$

Faktor waktu konsolidasi vertikal dapat juga diperoleh jika koefisien konsolidasi vertikal dan tebal lapisan tanah kompresibel diketahui.

Pada tanah yang tidak dikonsolidasi dengan menggunakan PVD, pengaliran yang terjadi hanyalah pada arah vertikal saja. Perhitungan lamanya waktu konsolidasi tanpa adanya PVD dapat mempergunakan Persamaan (5). Sedangkan pada tanah yang dikonsolidasikan dengan menggunakan PVD, akan terjadi pengaliran pada arah radial. Perhitungan lamanya waktu konsolidasi dengan menggunakan PVD dapat hitung mempergunakan Persamaan (5)⁶⁾.

$$t = \frac{T_v \cdot H^2}{C_v} \quad (5)$$

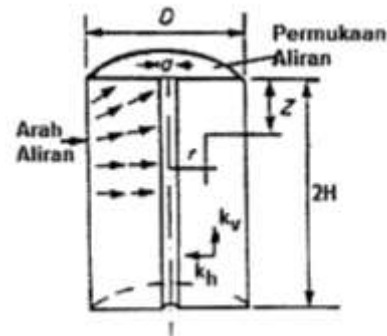
$$t = \frac{T_r \cdot 4R^2}{C_h} \quad (6)$$

dimana C_v dan C_h adalah berturut-turut koefisien konsolidasi ke arah vertikal dan horizontal dalam cm^2/dtk . H adalah tebal lapisan tanah yang dikonsolidasikan dalam cm dan t dalam detik merupakan waktu yang diperlukan untuk mencapai derajat konsolidasi U (%).

2.3 Aplikasi PVD Pada Lempung Lunak

Teori konsolidasi akibat aliran air pori dalam arah horizontal menuju *vertical drain* didasarkan kepada asumsi bahwa setiap *vertical drain* mempunyai daerah pengaruh yang berbentuk silinder dengan panjang yang sama dengan panjang *vertical drain* itu sendiri sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Dalam proses pemasangan, PVD dapat dipasang dengan konfigurasi bentuk pemasangan segitiga ataupun segiempat tergantung kondisi dan kebutuhan di lapangan seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

Lama waktu konsolidasi dalam perencanaan *vertical drain* sangat tergantung pada parameter tanah, terutama sekali nilai C_h . Biasanya nilai C_h ini diambil dengan didasarkan pada nilai C_v . Sebagai pedoman, dapat digunakan perbandingan nilai $\frac{C_h}{C_v}$ disarankan oleh Jamiolkowski dkk.⁷⁾ dan diperlihatkan pada Tabel 1.



Gambar 1 Daerah Pengaruh *Vertical Drain*

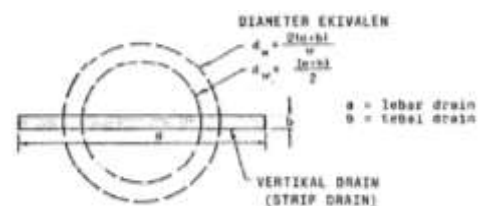
Tabel 1 Perbandingan C_h/C_v ⁷⁾

Sifat lapisan tanah lempung	C_h/C_v
Relatif homogen (hampir tidak ada lapisan permeabel)	1 – 1,5
Lempung endapan (terdapat lensa-lensa dan lapisan pasir yang tidak kontinu)	2 – 4
Lempung berlapis (<i>varved clay</i>) atau lempung dengan lapisan pasir yang lebih kurang kontinu	3 - 15

Selanjutnya dengan mempertimbangkan jarak antar PVD, maka nilai H pada Persamaan (5) dapat diganti dengan jarak dari as ke as PVD. Dengan demikian, faktor waktu konsolidasi horizontal dapat diberikan menggunakan Persamaan (7)

$$T_h = \frac{C_h t}{D^2} \quad (7)$$

dimana D adalah spasi pemasangan *vertical drain* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Diameter Ekuivalen Vertikal Drain Sintetis

Derajat konsolidasi horizontal rata-rata dan faktor jarak *vertical drain* dihitung menggunakan penyelesaian yang diusulkan Hansbo⁸⁾ berikut ini.

$$U_h = 1 - \exp\left[\frac{-8T_h}{F_n}\right] \quad (8)$$

dimana,

$$F_n = \ln\left(\frac{D}{d_w}\right) - \frac{3}{4} \quad (9)$$

PERHITUNGAN KEMBALI NILAI KOEFISIEN KONSOLIDASI PADA PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK

Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, Eka Nur Fitriani dan Andri Arthono

dimana d_w merupakan diameter satu *sand drain* atau diameter ekivalen satu *PVD*, untuk yang berbentuk strip dihitung dengan Persamaan (10).

$$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi} \quad (10)$$

Karena aliran *PVD* yang berbentuk strip tidak persis radial, oleh sebab itu biasanya pabrik pembuat merekomendasikan perhitungan d_w dengan Persamaan (11).

$$d_w = \frac{(a+b)}{2} \quad (11)$$

Persamaan (8) di atas merupakan metode sederhana dalam pemodelan lapisan tanah bawah permukaan yang ditingkatkan kapasitas dukungnya menggunakan *PVD*⁹⁾.

2.4 Peningkatan Daya Dukung Akibat Prakompresi

Tanpa *vertical drain*, proses konsolidasi satu dimensi hanya dalam arah vertikal saja. Dengan adanya *vertical drain*, konsolidasi satu dimensi akibat aliran air pori berlebih berlangsung ke arah horizontal (radial) menuju *vertical drain* dan ke arah vertikal menuju batas aliran. Derajat konsolidasi rata-rata, U akibat aliran vertikal dan horizontal ini dapat dihitung dengan rumus Carrillo¹⁰⁾, dan selanjutnya diterapkan menggunakan beberapa contoh penerapan praktis oleh Das⁴⁾, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (12).

$$U_{\text{eff}} = 1 - (1 - U_h)(1 - U_v) \quad (12)$$

U_h dan U_v masing-masing adalah derajat konsolidasi rata-rata akibat aliran horizontal dan vertikal.

Ketika tanah lempung lunak dibebani tegangan air pori yang timbul tidak akan cepat terdisipasi karena permeabilitas lempung yang rendah. Kuat geser yang termobilisasi saat itu adalah kuat geser tak teralirkan (tidak ada disipasi air pori). Ladd dkk¹¹⁾ menyatakan bahwa kuat geser tak teralirkan, S_u , untuk tanah lempung yang terkonsolidasi normal (tegangan tanah efektifnya, σ_v' , sama dengan tegangan efektif maksimum yang pernah bekerja, σ_p') langsung bergantung kepada tegangan efektif tanah¹²⁾.

$$\frac{S_u}{\sigma_v'} = \text{konstanta} \quad (13)$$

Konstanta tersebut bervariasi antara 0,2 dan 0,25. Mesri¹³⁾, dan Liong¹²⁾ menganjurkan nilai konstanta sebesar 0,22 digunakan. Untuk tanah yang terlalu terkonsolidasi ($\sigma_p' > \sigma_v'$), Trak dkk.¹⁴⁾ menyatakan bahwa :

$$\frac{S_u}{\sigma_v'} = 0.22 \text{ OCR} \quad (14)$$

dengan nilai

$$\text{OCR} = \sigma_p' / \sigma_v' \quad (15)$$

Persamaan (14) dan (15) dengan jelas menunjukkan bahwa kuat geser tak teralirkan meningkat dengan meningkatnya tegangan efektif. Pada saat tegangan air pori yang timbul akibat prakompresi terdisipasi, maka tegangan tanah efektif vertikal akan meningkat. Hal ini terlihat dari persamaan tegangan efektif tanah sebagai berikut,

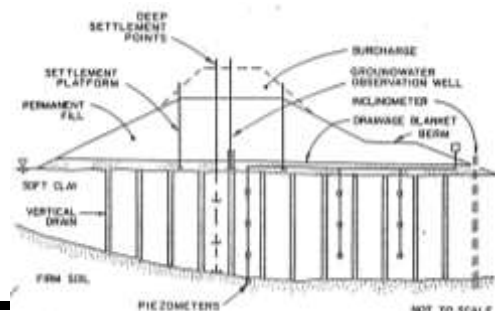
$$\sigma_v' = \sigma_v - u \quad (16)$$

dimana σ_v adalah tegangan total vertikal tanah. Jadi peningkatan kuat geser pada setiap tahap prakompresi dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (14). Dengan peningkatan kuat geser maka otomatis daya dukung tanah pun meningkat.

2.5 Instrumentasi

Untuk dapat memonitor besarnya penurunan yang telah dicapai dan tegangan air pori yang terdisipasi pada perbaikan tanah, maka perlu dipasang instrument geoteknik. Adapun instrumentasi geoteknik yang biasa digunakan dalam proyek prakompresi dan *vertical drain* yaitu :

1. *Settlement platform (settlement plate)* digunakan untuk mengukur penurunan yang telah terjadi di permukaan tanah;
2. *Piezometer* digunakan untuk mengamati tegangan air pori yang telah terdisipasi;
3. *Inclinometer* digunakan untuk mendeteksi ada tidaknya deformasi ke arah lateral.



PERHITUNGAN KEMBALI NILAI KOEFISIEN KONSOLIDASI PADA PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK

Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, Eka Nur Fitriani dan Andri Arthono

$$c_h = \frac{(1 - \beta)d_w^2 F_n}{8\beta\Delta t} \quad (21)$$

Gambar 3 Pemasangan Instrumen Tipikal

2.6 Interpretasi Hasil Monitoring

Interpretasi hasil pengamatan memiliki dua sasaran utama yaitu :

1. untuk mengevaluasi perilaku konsolidasi;
2. untuk menilai stabilitas pondasi.

Untuk mencapai sasaran ini, digunakan dua teknik analisis yaitu :

1. perkiraan langsung, misalnya peningkatan laju rata-rata penurunan dan deformasi horizontal memberikan indikasi akan terjadinya kegagalan atau pengukuran tekanan air pori yang menyediakan data untuk memperkirakan tegangan vertikal pada suatu waktu yang dibutuhkan untuk analisis stabilitas;
2. verifikasi parameter design, misalnya perkiraan koefisien konsolidasi horizontal yang dihitung kembali dari data piezometer dan penurunan.

Metode observasi Asaoka (1978) merupakan metode observasi yang paling populer karena selain dapat memprediksi penurunan akhir juga dapat memungkinkan diperolehnya parameter-parameter konsolidasi. Langkah-langkah yang diambil adalah sebagai berikut :

1. dari kurva waktu terhadap penurunan dipilih titik penurunan $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$, sedemikian rupa sehingga ρ_n adalah waktu penurunan pada waktu t_n dan interval waktu adalah konstan $\Delta t = t_n - t_{n-1}$;
2. plot titik-titik tersebut (ρ_n, ρ_{n-1});
3. titik-titik tersebut akan membentuk garis lurus sehingga :

$$\rho_n = \rho_0 + \beta\rho_{n-1} \quad (17)$$

4. penurunan akhir, ρ_f , dinyatakan sebagai berikut:

$$\rho_f = \frac{\rho_0}{1 - \beta} \quad (18)$$

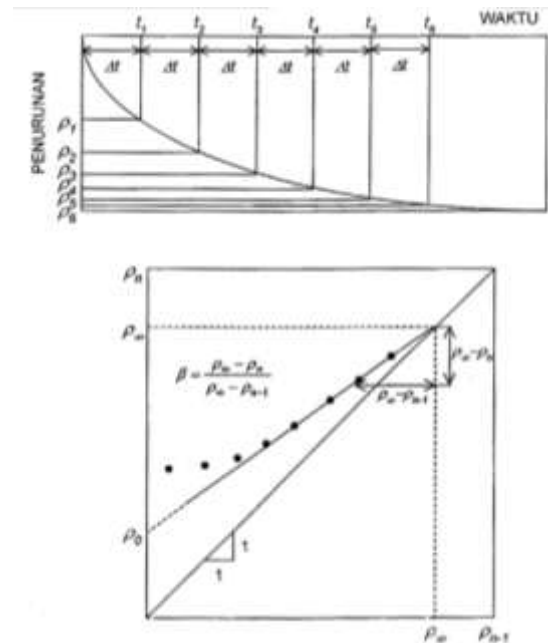
5. penurunan pada waktu t , ρ_t , dapat dihitung dari:

$$\rho_t = \rho_f \left(1 - \exp\left(-\left(\ln \frac{\beta}{\Delta t}\right)t\right)\right) \quad (19)$$

6. konstanta β merupakan gradien kemiringan dari curva garis lurus di atas dan nilainya bisa dipergunakan untuk mendapat koefisien konsolidasi vertikal dan horizontal

$$c_v = -\frac{4H^2 \ln \beta}{\pi^2 \Delta t} \quad (20)$$

dimana β merupakan kemiringan kurva ρ_n vs ρ_{n-1} .



Gambar 4 Perkiraan Penurunan Akhir Berdasarkan Metoda Asaoka (1978)

III. BAHAN DAN METODE

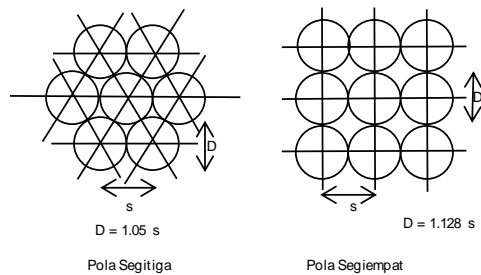
3.1 Bahan

Bahan sintetis yang digunakan dalam PVD adalah geotextile merek Colbond dengan tipe CX 1000, lebar sebesar 100 mm dan tebal sebesar 3,80 mm. Diameter PVD sebesar 10 cm dipasang dengan jarak dari as ke as bervariasi yaitu 50 cm, 100 cm, 150 cm dan 200 cm. Konfigurasi pemasangan PVD dengan pola segitiga dan segiempat sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.

Untuk pengukuran penurunan tanah di lapangan digunakan *settlement plate* yang akan digunakan sebagai perhitungan kembali nilai konsolidasi.

PERHITUNGAN KEMBALI NILAI KOEFISIEN KONSOLIDASI PADA PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK

Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, Eka Nur Fitriani dan Andri Arthono



Gambar 5 Pola Konfigurasi instalasi PVD

3.2 Metode

Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah dengan mengelaborasi teori yang digunakan. Selanjutnya implementasi *PVD* yang dilakukan di lapangan dianalisis berdasarkan teori yang dijelaskan dalam metode ini, sedangkan untuk menghitung kembali nilai koefisien konsolidasi digunakan metode Asaoka.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kondisi Tanah

Untuk mengetahui kondisi tanah di lokasi penelitian, dilaksanakan pengeboran beberapa titik di lokasi kegiatan proyek. Ada 7 (tujuh) titik bor yang dilakukan dalam investigasi ini. Akan tetapi hanya 4 (empat) titik bor yang digunakan dalam makalah ini dimana keempat data tanah dari titik-titik bor tersebut dapat mencerminkan dan mewakili kondisi tanah di lokasi tersebut karena mencerminkan kecenderungan yang sama. Kedalaman titik bor bervariasi mulai dari 10 meter sampai 14 meter dan ditabulasikan dalam Tabel 2.

Tabel 2 menunjukkan kedalaman masing-masing jenis tanah dengan berbagai nilai parameter tanah seperti *N-SPT*, batas cair dan parameter konsolidasi tanah. Dapat dilihat bahwa lapisan tanah lempung yang dominan di lokasi tersebut adalah tanah lempung anorganik dengan plastisitas relatif sangat tinggi. Atterberg tes mengindikasikan bahwa tanah tersebut adalah lempung dengan plastisitas tinggi. Semua titik bor mengindikasikan keberadaan adanya air tanah dengan berbagai tinggi muka airtanah. Pengujian langsung di tempat menunjukkan variasi kepadatan relatif seperti yang ditunjukkan dalam nilai *N-SPT*. Angka *N-SPT* menunjukkan kondisi tanah relatif sangat lunak dengan nilai *N-SPT* kurang dari 6.

4.2 Waktu Konsolidasi Tanpa *PVD*

Untuk dapat menghitung lamanya waktu proses konsolidasi harus diketahui besarnya rata-rata koefisien konsolidasi, C_v , dan faktor waktu terjadinya konsolidasi. Hasil uji laboratorium kondisi tanah menunjukkan bahwa nilai C_v maksimum adalah $2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{detik}$ dan konsolidasi dapat berlangsung akibat aliran air dalam dua arah dengan total ketebalan lapisan tanah adalah sebesar 13,95 m.

Untuk mencapai derajat konsolidasi sebesar 90%, dengan menggunakan Persamaan (3) maka didapat faktor waktu konsolidasi sebesar 0,848. Dengan ketebalan lapisan tanah lempung lunak sebesar 13,95 m dan aliran air yang bekerja dalam 2 (dua) arah, maka waktu proses konsolidasi yang akan terjadi adalah selama 26,2 tahun. Waktu tersebut dipertimbangkan relatif lama. Dengan demikian diperlukan upaya untuk mempercepat proses konsolidasi.

Indraratna dan Rujikiatkamjorn¹⁵⁾ telah melakukan uji laboratorium untuk menentukan efisiensi kinerja *PVD* sebagai alternatif metode perbaikan kondisi tanah dalam rangka percepatan proses konsolidasi. Selanjutnya Indraratna¹⁶⁾ menerapkan metode *PVD* untuk mempercepat proses konsolidasi timbunan tanah dalam pembangunan jalan raya, tanggul jalan kereta api dan landasan pacu suatu bandar udara. Hasil analisis numerik kinerja konstruksi-konstruksi tersebut relatif sangat memuaskan. Dengan demikian, dalam penelitian ini peningkatan daya dukung tanah dan percepatan proses konsolidasi akan digunakan *PVD* dengan variasi konfigurasi dan spasi antar *PVD*. Akan tetapi prediksi perhitungan dilakukan dengan metode analitis dengan pengamatan hasil menggunakan beberapa alat ukur setelah paska konstruksi.

4.3 Analisis Percepatan Konsolidasi dengan Metode *PVD*

Metode *PVD* telah banyak digunakan untuk perbaikan tanah^{17,18,19,20)} dan perencanaannya memanfaatkan model numerik. Pada penelitian ini perhitungan konfigurasi dan jumlah *PVD* dianalisis secara analitis.

Meskipun ketebalan lapisan tanah lunak yang akan dipasang *PVD* adalah sebesar 13,95 m, namun dalam perhitungan analitis panjang *geotextile* yang digunakan adalah 18 m. Hal ini dilakukan untuk memberikan toleransi terhadap pelaksanaan di lapangan dan memberikan *overlapping* dengan bahan tanah urug sebagai *preloading*. Dengan

PERHITUNGAN KEMBALI NILAI KOEFISIEN KONSOLIDASI PADA PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK

Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, Eka Nur Fitriani dan Andri Arthono

mempertimbangkan nilai koefisien konsolidasi kearah horizontal dan vertikal sebesar $C_v = 2,0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{det}$ dan $C_h = 2,5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{det}$, maka penurunan konsolidasi dan besarnya derajat

konsolidasi yang dicapai serta lama proses konsolidasi dapat diketahui.

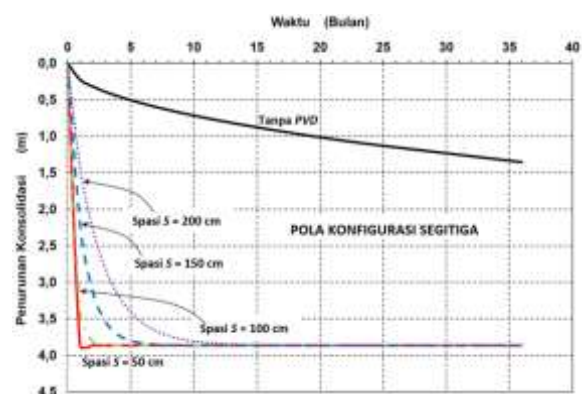
Tabel 2. Parameter Tanah

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	N (SPT)	γ_{sat} (kN/m ³)	LL (%)	PI (%)	C_c	e_o	Permeabilitas (k) (cm/det)	Koefisien Konsolidasi	
									C_v (cm ² /det)	C_h (cm ² /det)
0.00-1.00	Gambut	1	14	80,3	54	0,7	2,45	4,10E-08	2,00E-04	2,50E-04
1.00-2.50	Gambut	1	14	80,3	54	0,7	2,45	4,10E-08	2,00E-04	2,50E-04
2.50-3.50	Gambut	1	14	80,3	54	0,7	2,45	4,10E-08	2,00E-04	2,50E-04
3.50-4.20	Lempung anorganik, plastisitas tinggi	1	14,4	80,3	54	0,7	2,45	4,10E-08	2,00E-04	2,50E-04
4.20-5.50	Lempung anorganik, plastisitas tinggi	1	14,4	80,3	54	0,7	2,45	4,10E-08	2,00E-04	2,50E-04
5.50-7.00	Lempung anorganik, plastisitas tinggi	1	14,4	80,3	54	0,7	2,45	4,10E-08	2,00E-04	2,50E-04
8.50-9.20	Lempung anorganik, plastisitas tinggi	1	11	220,1	111,3	2,99	5,68	2,50E-07	2,00E-03	2,50E-03
9.20-10.00	Lempung anorganik, plastisitas tinggi	2	11	220,1	111,3	2,99	5,68	2,50E-07	2,00E-03	2,50E-03
10.00-10.65	Lempung anorganik, plastisitas tinggi	2	11	220,1	111,3	2,99	5,68	2,50E-07	2,00E-03	2,50E-03
10.65-12.15	Lempung anorganik, plastisitas tinggi	2	11	220,1	111,3	2,99	5,68	2,50E-07	2,00E-03	2,50E-03
12.15-13.65	Lempung anorganik, plastisitas tinggi	3	11	220,1	111,3	2,99	5,68	2,50E-07	2,00E-03	2,50E-03
13.65-13.95	Lempung anorganik, plastisitas tinggi	6	11	220,1	111,3	2,99	5,68	2,50E-07	2,00E-03	2,50E-03

Hasil analisis menunjukkan hubungan antara penurunan konsolidasi yang merupakan fungsi dari waktu proses konsolidasi dengan berbagai variasi jarak antara as ke as dan konfigurasi. Gambar 6 menunjukkan hubungan antara penurunan konsolidasi dan waktu proses konsolidasi untuk konfigurasi segitiga. Gambar 7 mengilustrasikan korelasi antara penurunan konsolidasi dan proses waktu konsolidasi untuk konfigurasi segi empat. Gambar 6 dan 7 menunjukkan kecenderungan yang sama.

Jika dibandingkan proses konsolidasi antara menggunakan *PVD* dan tanpa menggunakan *PVD*, maka proses konsolidasi tanah lempung lunak terjadi relatif lebih cepat jika dipasang *PVD*. Hal ini menunjukkan bahwa proses pengaliran benar-benar terjadi baik ke arah vertikal dan horizontal. Tanpa menggunakan *PVD* proses konsolidasi terjadi sangat lambat bahkan tidak pernah terjadi

penurunan konsolidasi sebesar yang diharapkan sebagaimana terjadi pada pemasangan *PVD*.



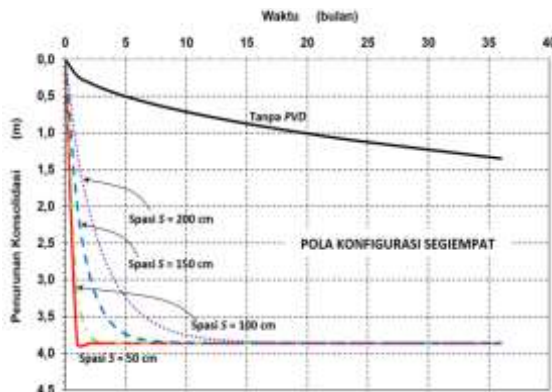
Gambar 6. Hubungan antara Penurunan dan Waktu Konsolidasi untuk Pola Konfigurasi *PVD* Segitiga

Konfigurasi segitiga dan segiempat mengalami waktu proses konsolidasi relatif sama. Penurunan konsolidasi terjadi sebesar 3,80 meter dengan waktu proses konsolidasi selama

PERHITUNGAN KEMBALI NILAI KOEFISIEN KONSOLIDASI PADA PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK

Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, Eka Nur Fitriani dan Andri Arthono

kurang dari 10 bulan. Setelah 10 bulan penurunan konsolidasi tidak terjadi lagi. Hal ini menunjukkan bahwa setelah 10 bulan derajat konsolidasi sebesar 100% sudah tercapai. Tanpa *PVD* penurunan konsolidasi terjadi maksimal sebesar 1,5 meter dengan waktu proses konsolidasi selama lebih dari 40 bulan.



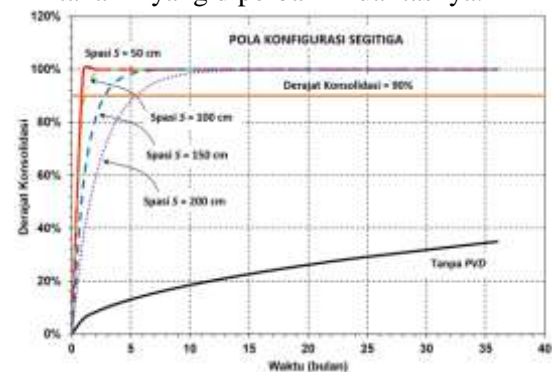
Gambar 7. Hubungan antara Penurunan dan Waktu Konsolidasi untuk Pola Konfigurasi *PVD* Segiempat

4.4 Optimasi Jumlah dan Konfigurasi *PVD*

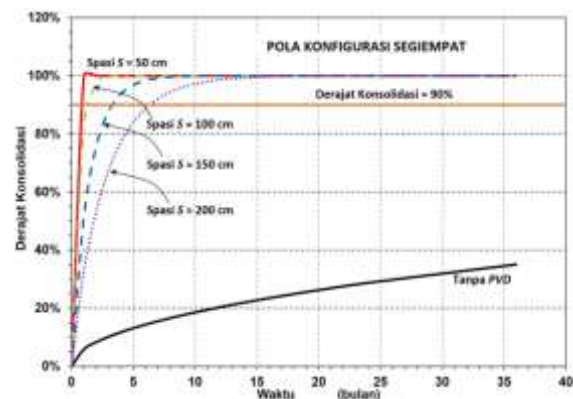
Untuk menentukan pola konfigurasi dengan jarak spasi dari as ke as antar *PVD* perlu ditetapkan berapa besar derajat konsolidasi yang diinginkan. Dalam penelitian ini optimasi jumlah *PVD* dianalisis berdasarkan derajat konsolidasi sebesar 90%. Gambar 8 dan Gambar 9 menunjukkan waktu yang diperlukan tanah lempung lunak untuk mencapai derajat konsolidasi sebesar 90% setelah dipasang *PVD*. Pola konfigurasi segitiga dan segiempat memerlukan waktu kurang dari 6 (enam) bulan untuk mencapai derajat konsolidasi 90% dengan berbagai variasi jarak. Bila diperhatikan dari Gambar 8 dan Gambar 9, 90% derajat konsolidasi lempung lunak tidak pernah dicapai tanpa *PVD*.

Hal ini mengindikasikan bahwa kedua konfigurasi tersebut memberikan dampak efektifitas terhadap waktu konsolidasi cukup signifikan. Namun demikian, perlu pemilihan pola konfigurasi dan jarak yang paling optimal untuk pelaksanaan di lapangan. Pertimbangan demikian diperlukan mengingat bahwa penerapan metode *PVD* akan digunakan untuk perbaikan tanah pada areal lahan yang relatif luas. Sehingga pemasangan *PVD* ini bisa memberikan nilai ekonomis terhadap proyek.

Selain derajat konsolidasi sebesar 90%, faktor lain yang dipertimbangkan dalam optimasi jumlah, jarak dan konfigurasi *PVD* adalah daya dukung izin tanah yang diperbaiki kualitasnya.



Gambar 8. Hubungan antara Derajat dan Waktu Konsolidasi untuk Pola Konfigurasi *PVD* Segitiga



Gambar 9. Hubungan antara Derajat dan Waktu Konsolidasi untuk Pola Konfigurasi *PVD* Segiempat

Tabel 3 menunjukkan variasi nilai daya dukung izin tanah dengan pola konfigurasi terhadap waktu proses *preloading*. Pola konfigurasi segitiga dengan spasi dari as ke as sebesar 150 cm setelah proses *preloading* selama 4 (empat) bulan memberikan nilai daya dukung izin tanah yang paling optimal. Daya dukung izin tanah dasar yang terjadi pada kondisi tersebut adalah sebesar $74,90 \text{ kN/m}^2$. Tekanan tanah akibat beban rencana yang dipersyaratkan adalah sebesar $72,30 \text{ kN/m}^2$. Jadi kondisi optimal yang terjadi masih aman terhadap tekanan beban rencana yang dipersyaratkan.

Tabel 4 menunjukkan jumlah *PVD* yang dihitung berdasarkan pola konfigurasi seluas areal yang membutuhkan perbaikan tanah. Pada kondisi optimal ini, diperlukan sejumlah 37.251 titik *PVD* dengan panjang total *PVD* sebesar 689.150 meter. Total jumlah *PVD* tersebut secara teknis dan ekonomis masih bisa

PERHITUNGAN KEMBALI NILAI KOEFISIEN KONSOLIDASI PADA PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK

Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, Eka Nur Fitriani dan Andri Arthono

dipertanggungjawabkan. Pelaksanaan pemasangan PVD yang diperlukan adalah selama 25 hari kerja.

Tabel 3. Daya Dukung Ijin Tanah Dasar Dengan Penggunaan Preloading dan PVD

Pola	Spasi (cm)	Daya Dukung Ijin Tanah Dasar Bulan Ke - (kN/m ²)			Beban Rencana (kN/m ²)	Keterangan
		1 bulan	2 bulan	4 bulan		
Segitiga	50	43,76	72,84	101,92	80,772	OK
	100	40,34	69,00	98,07	80,772	OK
	150	31,28	54,80	82,77	80,772	OK
	200	25,40	42,47	66,34	80,772	NOT OK
Segiempat	50	43,76	72,84	101,92	80,772	OK
	100	38,99	67,25	95,52	80,772	OK
	150	29,65	51,64	78,90	80,772	NOT OK
	200	24,23	39,73	62,16	80,772	NOT OK

Tabel 4. Jumlah PVD dalam Berbagai Spasi

No	Spasi (cm)	Konfigurasi Jumlah PVD (PVD = 18,5 m)			
		Segitiga		Segiempat	
	Titik	m	Titik	m	
1	50	335.262	6.202.349,98	290.499	5.374.235,18
2	100	83.816	1.550.587,50	72.625	1.343.558,80
3	150	37.251	689.150,00	32.278	597.137,24
4	200	20.954	387.646,87	16.468	304.661,86

4.5 Prediksi Penurunan Akhir

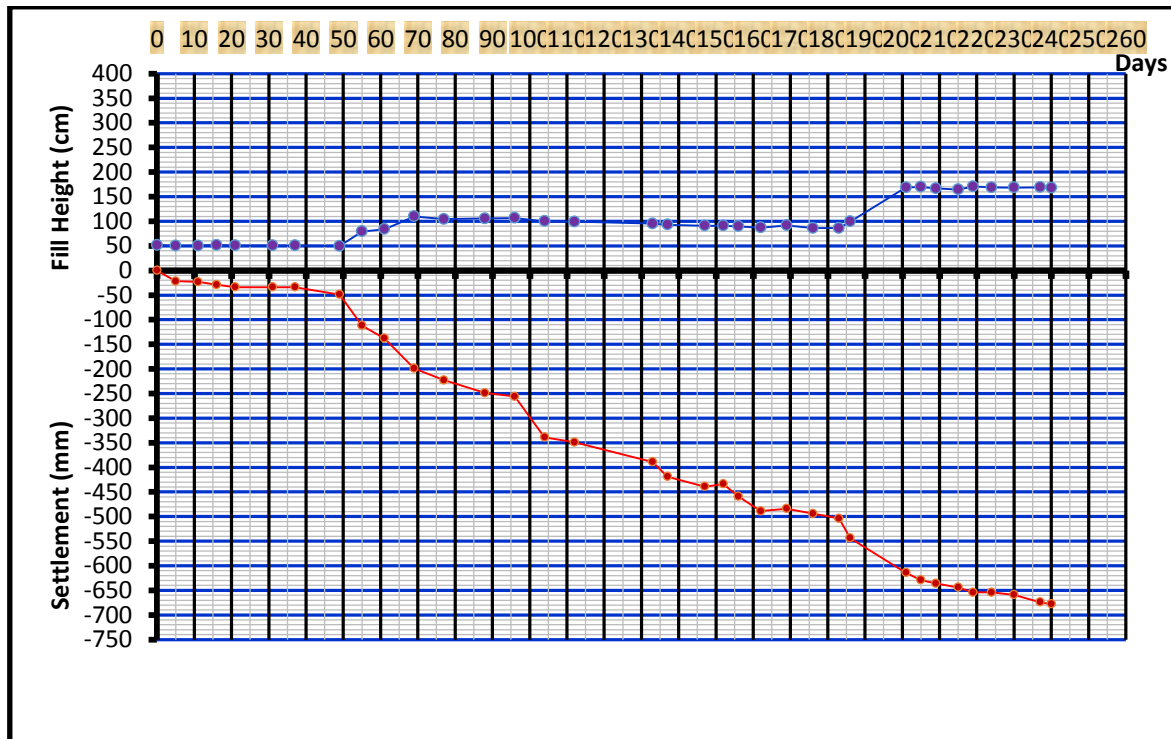
Pada area yang dilakukan perbaikan tanah dengan PVD dan *preloading* dipasang sebanyak 10 titik *settlement plate* untuk mengukur penurunan yang terjadi selama perbaikan tanah dilakukan. Akan tetapi hanya 1 titik saja yang digunakan dalam makalah ini. Letak titik *settlement plate* yang diambil berdekatan dengan titik hasil pengujian tanah yang digunakan untuk menghitung optimasi penggunaan PVD agar didapat nilai perbandingan antara perhitungan penurunan secara teori dan juga lapangan.

Gambar 10 merupakan hasil pembacaan *settlement plate* titik 19 sedangkan Gambar 11 merupakan pembacaan *settlement plate* titik 19 setelah mencapai ketinggian maksimum. Berdasarkan kedua gambar tersebut didapatkan penurunan maksimum yaitu 678 mm.

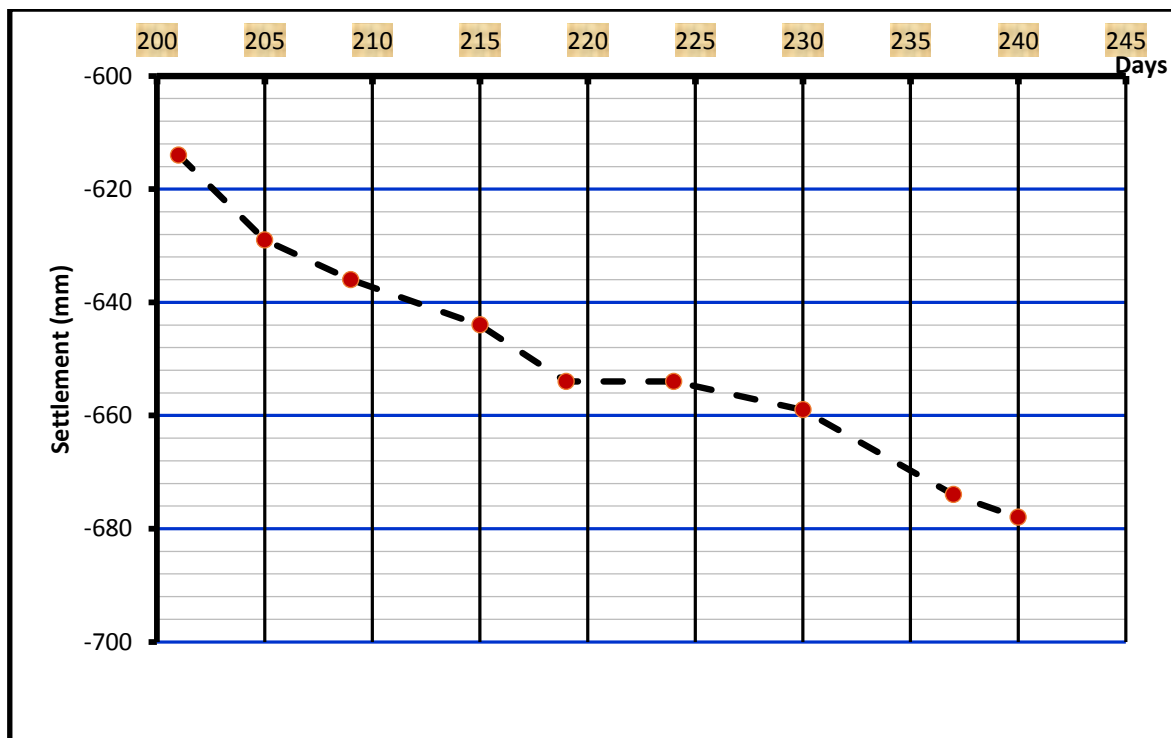
Perhitungan akhir penurunan tanah didapatkan dengan menggunakan metode Asaoka yang dapat dilihat pada Gambar 12. Dari grafik yang di plotkan antara ρ_n vs ρ_{n-1} maka didapatkan penurunan akhir yaitu sebesar 723 mm.

PERHITUNGAN KEMBALI NILAI KOEFISIEN KONSOLIDASI PADA PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK

Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, Eka Nur Fitriani dan Andri Arthono



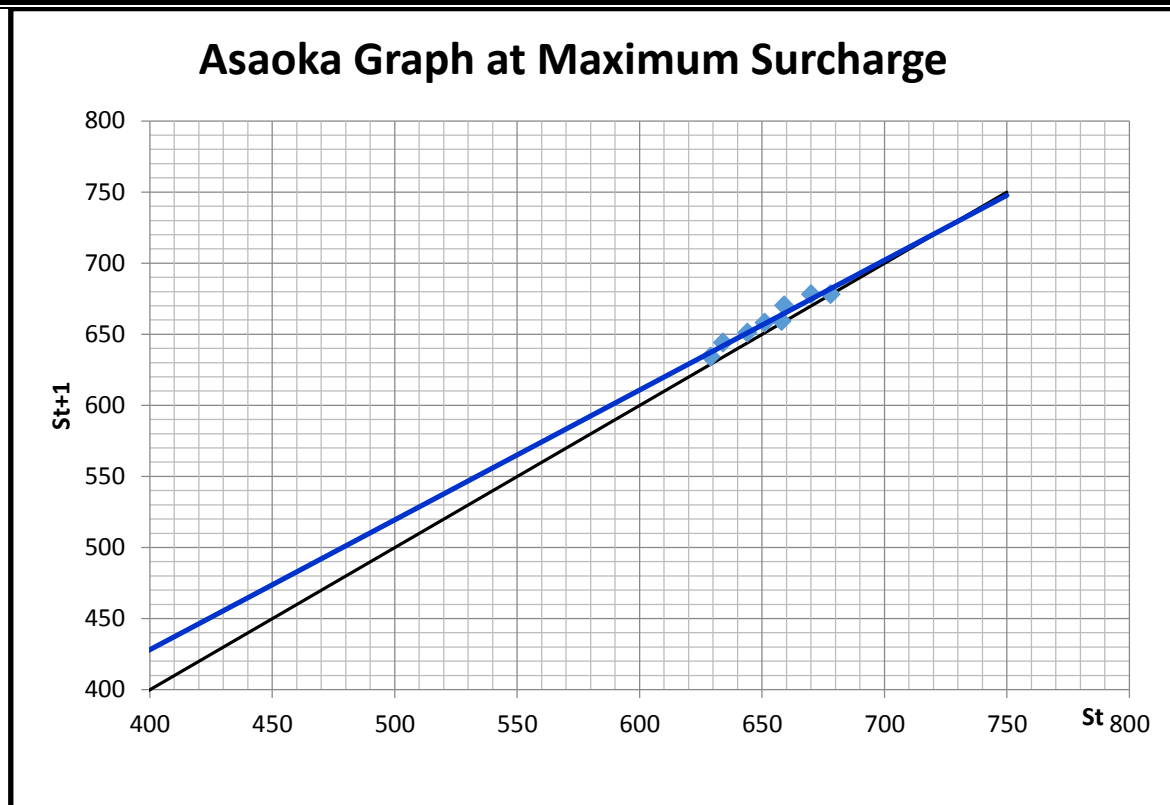
Gambar 10. Grafik Penurunan Pembacaan *Settlement Plate* 19



Gambar 11. Grafik Penurunan Pembacaan *Settlement Plate* 19 Setelah Ketinggian Maksimum Tercapai

PERHITUNGAN KEMBALI NILAI KOEFISIEN KONSOLIDASI PADA PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK

Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, Eka Nur Fitriani dan Andri Arthono



Gambar 11. Typical Asaoka Method

4.6 Koefisien Konsolidasi

Dari grafik, maka didapatkan $\beta = 0.9192$ dan dapat dihitung derajat konsolidasinya dengan menggunakan persamaan (20) dan persamaan (21). Dengan nilai-nilai di bawah ini :

$$H_{dr} = 1379.300 \text{ cm}$$

$$d_w = 5 \text{ cm}$$

$$F_n = 1.601$$

$$\Delta t = 5 \text{ hari} = 432000 \text{ det}$$

Maka dapat dihitung derajat konsolidasinya yaitu $c_v = 0.15037 \text{ cm}^2/\text{det}$ dan $c_h = 1.018 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{det}$.

V. KESIMPULAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa tanah lempung lunak di lokasi Proyek PLTU Riau dapat diperbaiki kualitasnya. Perbaikan tanah yang dilakukan menggunakan metode PVD. Waktu yang diperlukan untuk mencapai derajat konsolidasi sebesar 90% adalah selama kurang lebih 6 (enam) bulan. Apabila tanah lempung lunak tidak diperbaiki kualitasnya, maka proses konsolidasi akan terjadi selama 26,2 tahun dengan derajat konsolidasi sebesar 90% tidak akan pernah tercapai. Pada kondisi optimal diperlukan sejumlah 37.251 titik PVD dengan panjang total PVD sebesar 689.150 meter untuk perbaikan tanah seluas areal tanah yang diperlukan. Konfigurasi PVD yang

dipasang adalah segitiga dengan jarak spasi antar as PVD adalah 150 cm. Berdasarkan hasil perhitungan dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa nilai derajat konsolidasi yang didapat dari lapangan yaitu $c_v = 0.15037 \text{ cm}^2/\text{det}$ dan $c_h = 1.018 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{det}$.

DAFTAR PUSTAKA

1. Shen, S.-L., Chai, J.-C., Hong, Z.-S., dan Cai, F.-X., "Analysis of Field Performance of Embankments on Soft Clay Deposit with and without PVD-improvement," *Geotextiles and Geomembranes*, No. 23, hal. 463-485, Elsevier Ltd., Philadelphia, USA, 2005.
2. Basu, P., Basu, D., dan Prezzi, M., "Equal-strain Analysis of PVD-enhanced Consolidation Considering Soil Disturbance," *Proceedings of the 12th. International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, hal. 3612-3620, Goa, India, 1-6 Oktober 2008.
3. Pothiraksanon, C., Bergado, D. T., dan Abuel-Naga, H. M., "Full-Scale Embankment Consolidation Test Using Prefabricated Vertical Thermal Drains," *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical

PERHITUNGAN KEMBALI NILAI KOEFISIEN KONSOLIDASI PADA PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK

Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, Eka Nur Fitriani dan Andri Arthono

- Society, Vol. 50, No. 5, hal. 599-608, Oktober, 2010.
4. Das, B. M., *Principles Of Foundation Engineering*, edisi ke 7, Cengage Learning, Stanford, USA, 2011.
5. Sivaram, B., dan Swamee, P., "A Computational Method for Consolidation Coefficient," *Soils and Foundations*, Vol. 17, No. 2, hal. 48-52, Tokyo, Japan, 1977.
6. Ong, C. Y., Chai, J. C., dan Hino, T., "Degree of Consolidation of Clayey Deposit with partially penetrating Vertical Drains," *Geotextiles and Geomembranes*, No. 34, hal. 19-27, Elsevier Ltd., Philadelphia, USA, 2012.
7. Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., dan Wolski, W., "Precompression and Speeding Up Consolidation," *Proceedings of the 8th. European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 3., hal. 1201-1226, Helsinki, 1983.
8. Hansbo, S., "Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricated Drains," *Ground Engineering*, Vol. 12, No. 5, hal.16-25, Juli, 1979.
9. Chai, J-C., Shen, S-L., Miura, N., dan Bergado, D. T., "Simple Method of Modeling PVD-Improved Subsoil," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.127, No. 11, hal. 965-972., November,2001.
10. Carrillo, N., "Simple Two and Three-dimensional Cases in the Theory of Consolidation of Soils," *Journal of Mathematical Physics*, Vol. 21, hal. 1-5,1942.
11. Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F., dan Poulos, H. G., "Stress-Deformation and Strength Characteristics," *Proceedings of the 11th. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, hal. 421-482, 1977.
12. Liong, G. T., "Perencanaan Teknik Perbaikan Tanah Prakompresi dengan Vertikal Drain dan Vacuum Preloading", *The 20th Shortcourse on Soft Soil Engineering*, Bandung, Oktober, 2014.
13. Mesri, G., "Discussion on the New Design Procedure for Stability of Soft Clays," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 101, hal. 409-412,1975.
14. Trak, B., La Rochelle, P., Tavenas, F., Leroueil, S., dan Roy, M., "A New Approach to the Stability Analysis of Embankments on Sensitive Clays," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 17, No. 4, hal. 526-544, 1980.
15. Indraratna, B., dan Rujikiatkamjorn, C., "Laboratory Determination of Efficiency of Prefabricated Vertical Drains Incorporating Vacuum Preloading," *Proceedings of the 15th. Southeast Asian Geotechnical Conference*, Vol. 1, hal. 453-456, Bangkok, Thailand, 22-26 November 2004.
16. Indraratna, B., dan Rujikiatkamjorn, C., Geng, X., "Performance and Prediction of Surcharge and Vacuum Consolidation via Prefabricated Vertical Drains with special reference to Highways, Railways, and Ports," *International Symposium on Ground Improvement*, editor N. Denies dan H. Noel, Vol. II, hal. 145-168, 2012.
17. Bergado, D. T., Balasubramaniam, A. S., Fannin, R. J., dan Holta, R. D., "Prefabricated Vertical Drains (PVD) in Soft Clay: A Case Study of the New Bangkok International Airport Project," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 39, hal. 304-315, 2002.
18. Choa, V., "Soil Improvement Works at Tianjin East Pier Project," *Proceedings of the 10th. Southeast Asian Geotechnical Conference*, Vol. 1, hal. 47-52, Taipei, 1990.
19. Chai, J. C., Cater, J. P., dan Hayashi, S., "Ground Deformation Induced by Vacuum Consolidation," *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 131, No.12, hal. 1552-1561, 2005.
20. Bo, M. W., Chu, J., Low, B. K., dan Choa, V., *Soil Improvement; Prefabricated Vertical Drain Techniques*, Thompson Learning, Singapore, 2003.
21. Farnsworth, C.B., Bartlett, S.F., and Lawton, E.C., *Estimation of The Time Rate of Settlement for Multi-Layered Clays Undergoing Radial Drainage*, Annual Meeting, 2013.
22. Nawir, Hasbullah, Apoji, Dayu, Fatimatuhzaro, Rahmatyar, dan Pamudji, Dwi M., *Prediksi Penurunan Tanah Menggunakan Prosedur Observasi Asaoka Studi Kasus : timbunan di Bontang, Kalimantan Timur*,

PERHITUNGAN KEMBALI NILAI KOEFISIEN KONSOLIDASI PADA PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK

Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, Eka Nur Fitriani dan Andri Arthono

- Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayas Sipil, Vol. 19 No 2, 2012.
23. Pusat Litbang Sarana Transportasi, Pedoman Perencanaan Konstruksi Timbunan Jalan di Atas Tanah Gambut dengan Motoda Prapembebanan (Pd-T-06-2004-B), Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2004
24. Seah, Ho Tan, Tangtanshup, Burut, and Wongsatian, Pana, *Horizontal Coefficient of Consolidation of Bangkok Clay*, Geotechnical Testing Jurnal, Vol 27, No 5, ASTM International, 2004
25. Whiteley, Colby S., *Determining the End of Primary Settlement Using A Simple Analytical Model Progressively Calibrated to Field Settlement Data (thesis)*, Brigham Young Univesity, 2009.