

Studi Kasus Pemodelan Vacuum Consolidation dan Prefabricated Vertical Drain

Monica Frances Cheryl¹, Aswin Lim²

^{1,2}) Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan

Email: 8102001012@student.unpar.ac.id; aswinlim@unpar.ac.id

ABSTRAK

Tanah lunak adalah tanah dengan potensi penurunan konsolidasi besar dalam waktu yang lama. Tanah lunak sering menimbulkan permasalahan pada struktur di atasnya karena daya dukung tanah dasar yang relatif rendah dan pemampatan tanah besar yang berlangsung lama. Untuk mempercepat penurunan konsolidasi yang terjadi, salah satu langkah mutakhir perbaikan tanah yaitu dengan metode *vacuum consolidation* dengan kombinasi *prefabricated vertical drain* (PVD). Metode ini melibatkan pemasangan *vertical drain* ke dalam tanah lunak dimana pompa vakum akan menghisap air dan udara di dalam tanah yang sudah dibungkus material kedap udara di atasnya. Proses vakum dan aplikasi *vertical drain* ini akan menyebabkan penurunan konsolidasi pada tanah terjadi dalam waktu yang lebih cepat. Pembebanan awal dengan drainase vertikal dilakukan untuk menginduksi sebagian besar penurunan dari lapisan tanah di bawahnya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan pemodelan proses perbaikan tanah dengan vakum dan PVD menggunakan metode elemen hingga 2 dimensi. Kajian dilakukan dengan melakukan analisa balik, berdasarkan data parameter tanah di Jakarta Utara yang disesuaikan terhadap kurva penurunan terhadap waktu di lapangan. Berdasarkan analisis, diperoleh hasil bahwa dengan keberadaan PVD, permeabilitas tanah arah horizontal model akan membesar sehingga disipasi tekanan air pori akan semakin cepat. Kurva hasil pemodelan Plaxis untuk penurunan terhadap waktu dan tekanan air pori terhadap waktu memiliki hasil yang serupa dengan pengukuran di lapangan.

Kata Kunci: *penurunan, Plaxis 2D, vacuum consolidation, prefabricated vertical drain.*

ABSTRACT

Soft soil is soil with the potential for large consolidation settlements over a long period of time. Soft soil often causes problems for the structures above it due to the relatively low bearing capacity of the subgrade and long-lasting large soil compression. To accelerate the consolidation reduction that occurs, one of the latest steps for soil improvement is the vacuum consolidation method with a combination of prefabricated vertical drain (PVD). This method involves installing a vertical drain into soft soil where a vacuum pump will suck water and air in the soil which has been wrapped in airtight material on top. The vacuum process and application of vertical drain will cause a decrease in consolidation in the soil to occur more quickly. Initial loading with vertical drainage is carried out to induce most of the settlement of the underlying soil layer. The aim of this research is to model the soil improvement process with vacuum and PVD using the 2-dimensional finite element method. The study was carried out by carrying out reverse analysis, based on soil parameter data in North Jakarta which was adjusted to the decline curve over time in the field. Based on the analysis, the results obtained show that with the presence of PVD, the soil permeability in the horizontal direction of the model will increase so that the dissipation of pore water pressure will be faster. Plaxis modeling curves for reduction over time and pore water pressure over time have similar results to measurements in the field.

Key words: *settlement, Plaxis 2D, vacuum consolidation, prefabricated vertical drain.*

Submitted: 04 Mei 2024	Reviewed: 24 Juni 2024	Revised: 28 Juli 2024	Published: 01 Agustus 2024
----------------------------------	----------------------------------	---------------------------------	--------------------------------------

PENDAHULUAN

Tanah lunak tersebar cukup merata di Indonesia, mengingat hampir seluruh pulau mempunyai wilayah tanah liat yang luas. Tanah lemah seringkali menimbulkan masalah pada struktur di atas karena daya dukung lapisan tanah bawah relatif rendah dan pemadatan tanah relatif besar serta berlangsung lama.

Jika perbaikan bawah tanah tidak dilakukan terlebih dahulu, terdapat risiko infrastruktur yang dibangun di atasnya akan rusak sebelum mencapai

umur layanan yang direncanakan. Oleh karena itu, perbaikan tanah diperlukan untuk memperbaiki tanah lunak.

Terdapat berbagai metode perbaikan tanah, salah satunya adalah menggunakan *vertical drain* untuk mempercepat proses konsolidasi. *Vertical drain* disertai dengan prabeban untuk meningkatkan tegangan air pori tanah sehingga proses konsolidasi dapat berlangsung. Pada kondisi tanah dasar berupa tanah lunak sering dijumpai kelongsoran pada tanah dasar pada saat diberikan

prabeban, sehingga digunakan metode *vacuum consolidation*. Metode ini melibatkan pemasangan *vertical drain* ke dalam tanah lunak dimana pompa vakum akan menghisap air dan udara di dalam tanah yang sudah diberi material kedap udara di atasnya, menyebabkan penurunan konsolidasi pada tanah akan terjadi dalam waktu yang lebih cepat. *Prefabricated vertical drain* (PVD) berfungsi untuk mempercepat proses konsolidasi tanah terutama pada tanah jenis lempung dan lanau. PVD ditanam secara vertikal ke dalam tanah untuk mengalirkan air dari lapisan tanah lunak ke permukaan. Versi paling awal dari *vertical drain* adalah *sand drains* yang terdiri dari lubang bor diisi dengan pasir. Kemudian dikembangkan PVD yang memiliki keunggulan dibandingkan *sand drains* dalam kemudahan konstruksi dan dalam memastikan kontinuitas dari *drain*. Salah satu jenis PVD yang umum digunakan terdiri dari filter geotekstil tipis (*nonwoven*) yang mengelilingi *central core* dari plastik. Filter digunakan untuk mencegah partikel tanah halus masuk ke inti tetapi memungkinkan air pori untuk masuk. *Central core* berfungsi sebagai saluran drainase dan menahan tegangan tekan dan tekuk. (Basu and Madhav, 2000).

Pembebanan awal dengan drainase vertikal adalah teknik perbaikan tanah yang melibatkan pemberian beban pada permukaan tanah untuk menginduksi sebagian besar penurunan dari lapisan tanah dibawahnya. *Preloading* adalah beban sementara yang diletakkan pada tanah, berfungsi untuk mengoptimalkan kinerja PVD serta memperbaiki daya dukung tanah dasar. *Preloading* meningkatkan tegangan efektif dan mengurangi kompresibilitas tanah yang lemah dengan menyebabkan tanah lunak berkonsolidasi sehingga dapat meningkatkan kekuatan tanah lunak tersebut (Bo et al., 2007).

Drainase vertikal umumnya dipasang menggunakan dua metode yaitu secara dinamis atau statis (Indraratna et al., 2003). Dalam metode dinamis, mandrel baja didorong ke tanah menggunakan *vibrating hammer* atau *drop hammer*. Dengan metode statis, mandrel didorong ke dalam tanah dengan gaya statis. Metode dinamis lebih cepat, tetapi menyebabkan lebih banyak gangguan pada tanah selama pemasangan seperti peningkatan tegangan total dan tekanan air pori serta perpindahan tanah di sekitar saluran tersebut.

Tujuan penggunaan PVD apabila dikombinasikan dengan *preloading* adalah:

1. Untuk mempercepat waktu konsolidasi primer yang disebabkan oleh beban yang diberikan (*preloading*).

2. Untuk mengontrol waktu yang diperlukan untuk pematangan lahan sebelum konstruksi.
3. Untuk menaikan kuat geser tanah karena terjadi peristiwa konsolidasi yang meningkatkan tegangan efektif.

Vacuum consolidation adalah metode perbaikan tanah dengan cara memasang pompa pada saluran yang akan disambungkan pada PVD (Rivanga and Hamdhan, 2018). Metode perbaikan tanah ini memanfaatkan tekanan vakum untuk mengeluarkan air pori yang terdapat pada tanah lunak. Tujuan dari penggunaan metode ini adalah untuk penurunan konsolidasi dan meningkatkan kekuatan tanah.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan pemodelan metode elemen hingga 2 dimensi dari *vacuum preloading* dan *prefabricated vertical drain* dan menginvestigasi parameter tanah pada lokasi studi.

Kompresibilitas tanah

Ketika beban diterapkan pada tanah, penurunan volume tanah terjadi. Penurunan ini dikenal sebagai kompresi dan kompresibilitas adalah properti dari tanah yang berkaitan dengan kerentanannya terhadap penurunan volume di bawah tekanan. Ketika rongga pada tanah diisi dengan udara saja, kompresi tanah terjadi dengan cepat karena udara dapat dimampatkan dan keluar dengan mudah dari rongga. Dalam tanah jenuh dengan rongga terisi air yang tidak dapat dimampatkan, penurunan volume atau kompresi dapat terjadi ketika air dikeluarkan dari rongga tersebut. Kompresi yang diakibatkan dari beban statis jangka panjang dan hasil keluarnya air pori disebut sebagai konsolidasi (Punmia, Jain and Jain, 2005; Taqwa et al, 2019).

Prefabricated vertical drain

Prefabricated vertical drain (PVD) berfungsi untuk mengakselerasi proses konsolidasi tanah terutama pada tanah butir halus. PVD ditanamkan secara vertikal ke dalam tanah untuk mengalirkan air dari lapisan tanah lunak ke permukaan. PVD cocok untuk tanah bertipe *silt* atau *inorganic clay* yang memiliki sensitivitas rendah, tanah dengan lapisan *organic, decomposed peat*, pasir halus, dan tanah hasil kerokan. Versi paling awal dari *vertical drain* adalah *sand drains* yang terdiri dari lubang bor diisi dengan pasir. Kemudian dikembangkan PVD yang memiliki keunggulan dibandingkan *sand drains* dalam kemudahan konstruksi dan dalam memastikan kontinuitas dari *drain*. Salah satu jenis PVD yang umum digunakan terdiri dari filter geotekstil tipis (*nonwoven*) yang mengelilingi *central core* dari plastik. Filter digunakan untuk mencegah partikel tanah halus

masuk ke inti tetapi memungkinkan air pori untuk masuk. *Central core* berfungsi sebagai saluran drainase dan menahan tegangan tekan dan tekuk. Secara umum, pemasangan PVD dengan pola segitiga membutuhkan waktu lebih singkat dalam menyelesaikan proses konsolidasi dibandingkan dengan PVD dengan pola persegi.

Keuntungan dari pemakaian PVD adalah:

1. Mengurangi waktu keseluruhan yang dibutuhkan untuk penyelesaian konsolidasi primer karena preloading.
2. Mengurangi jumlah biaya tambahan yang diperlukan untuk mencapai jumlah prakompresi yang diinginkan dalam waktu tertentu.
3. Meningkatkan tingkat perolehan kekuatan karena konsolidasi tanah lunak ketika stabilitas diperhatikan.

Kekurangan dari pemakaian PVD adalah:

1. Jika lapisan tertutupi oleh *dense fills* atau pasir, *clay* yang sangat kaku serta penghalang lainnya, pemasangan PVD memerlukan pengeboran, *jetting*, atau penggunaan palu getar.
2. Jika tanah sensitif atau dimana stabilitas menjadi perhatian, gangguan tanah akibat pemasangan PVD mungkin tidak dapat ditoleransi sehingga teknik perbaikan tanah lain dapat menjadi lebih praktis.
3. Selama musim dingin, tanah menjadi beku sehingga dapat mengurangi atau mencegah saluran air di permukaan tanah, menimbulkan tekanan balik. Peningkatan tekanan balik akan memperlambat waktu penurunan konsolidasi, menyebabkan asumsi bahwa konsolidasi primer telah berakhir. Namun ketika musim dingin berlalu, tanah berpotensi mengalami penurunan kembali.

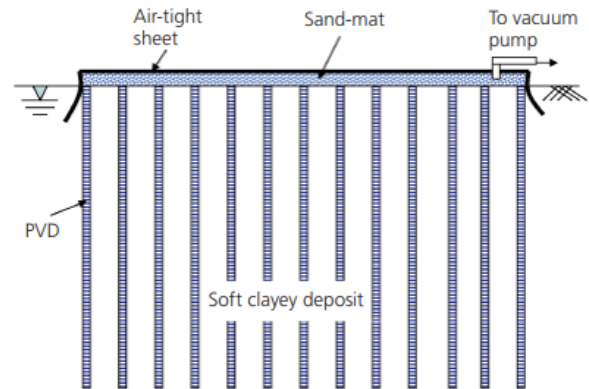
Vacuum consolidation

Vacuum consolidation adalah metode perbaikan tanah dengan cara memasang pompa pada saluran yang akan disambungkan pada PVD (Rivanga and Hamdhan, 2018). Metode perbaikan tanah ini memanfaatkan tekanan vakum untuk mengeluarkan air pori yang terdapat pada tanah lunak. Tujuan dari penggunaan metode ini adalah untuk penurunan konsolidasi dan meningkatkan kekuatan tanah.

Terdapat beberapa metode *vacuum consolidation*, yaitu (Chai, et al., 2014):

1. Air-tight sheet method

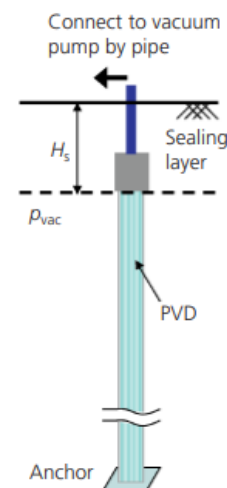
Metode ini dilakukan dengan meletakkan lembaran kedap udara di tanah permukaan dan menanamkan pinggiran lembaran tersebut di dalam tanah untuk menyegelnya. Udara dan air di tanah yang terletak di bawah lembaran kemudian disedot oleh pompa *vacuum*. Metode ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Metode instalasi *air-tight sheet*
(Sumber: Chai, et al., 2014)

2. Vacuum-drain method

Metode ini menggunakan lapisan tanah liat permukaan sebagai lapisan untuk menyegel udara dan menerapkan tekanan vakum langsung ke PVD dengan tutup yang dibuat secara khusus. Jenis PVD ini disebut sebagai *capped PVD* (CPVD). Tutup yang digunakan menyediakan *interface* antara PVD dan pipa drainase, dengan setiap CPVD terhubung ke pipa geosintetik yang diletakkan di permukaan tanah dan terhubung ke pompa vakum. Metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Metode instalasi *vacuum-drain method*

[Sumber: Chai, et al., 2008 dalam (Chai, et al., 2014)]

Kelebihan dari penggunaan *vacuum consolidation* adalah:

1. Relatif cepat dan murah.
2. *Loading process* dimulai segera setelah selesainya pemasangan pompa dan *sealing*, dibandingkan dengan menunggu beberapa minggu dengan *surcharging*.
3. Kinerja dapat dipantau secara waktu asli.

Kekurangan dari penggunaan *vacuum consolidation* adalah:

1. Metode *vacuum consolidation* tidak efektif jika ada lapisan pasir jauh di dalam deposit lunak.
2. Pasir dangkal atau lapisan permeable dapat diatasi dengan *slurry wall isolation system*.
3. Metode ini membutuhkan pemantauan selama pemasangan membran untuk mencegah kebocoran vakum.

Model konstitutif tanah

Perkembangan dalam metode numerik menyebabkan perilaku tanah dapat dianalisis dan diprediksi serta masalah-masalah interaksi tanah-struktur yang dapat terjadi. Analisis ini berdasarkan hubungan antara tegangan dan regangan dari beberapa material. Tujuan dari model konstitutif adalah mensimulasikan perilaku tanah dengan akurasi yang cukup di bawah kondisi pembebanan (Wani and Showkat, 2018). Pada penelitian ini, model konstitutif tanah yang digunakan adalah model *Mohr-Coulomb*, dimana parameter tanah antara lain: kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), modulus tanah (E), dan angka Poisson (ν).

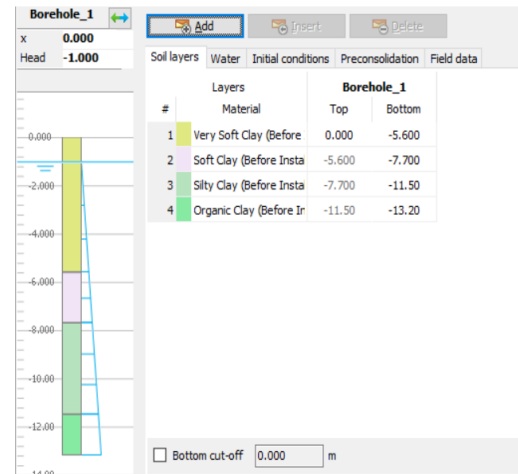
METODE PENELITIAN

Plaxis adalah program yang disusun berdasarkan metode elemen hingga yang dikembangkan untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas dalam bidang rekayasa geoteknik. Prosedur pembuatan model secara grafis memungkinkan pembuatan suatu model elemen hingga yang rumit, sedangkan berbagai fasilitas yang tersedia dapat digunakan untuk menampilkan hasil komputasi secara mendetail.

Pemodelan pada Plaxis 2D dapat berupa *plane strain* atau *axy-simmety*. Model *plane strain* digunakan untuk pemodelan dengan penampang melintang yang relatif seragam serta memiliki kondisi tegangan dan pembebanan yang cukup panjang dalam arah tegak lurus terhadap penampang. Model *axy-simmety* digunakan pada pemodelan berstruktur lingkaran dengan potongan melintang secara radial dan pembebanan yang relatif seragam mengelilingi sumbu aksial dimana deformasi dan tegangan yang terjadi diasumsikan identik dalam semua arah.

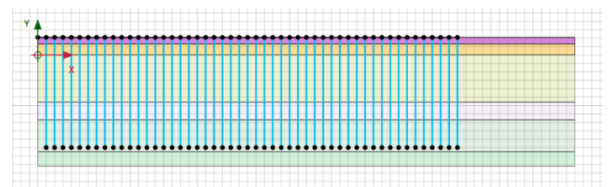
Langkah dalam pemodelan yang digunakan pada program Plaxis 2D adalah:

1. Membuat *plane strain* berdasarkan stratifikasi tanah dengan tinggi muka air tanah yaitu di kedalaman 1 m. Memasukkan stratifikasi tanah dilakukan dengan menggunakan *create borehole* dengan memasukkan -1 m di *head* berdasarkan elevasi muka air tanah.



Gambar 3. Borehole dan stratifikasi tanah pada Plaxis 2D

2. Memasukkan parameter tanah asli dan timbunan yang digunakan. Dalam pemodelan, dibuat 3 *material set* untuk tiap lapis yaitu untuk sebelum dipasang PVD, setelah dipasang PVD, dan *saturated*. *Material set* untuk sebelum dipasang PVD digunakan saat pekerjaan penimbunan, *material set* setelah dipasang PVD digunakan saat vakum tidak menyala, sedangkan *saturated* digunakan saat *vacuum* menyala.
3. Memodelkan *platform* dengan menggunakan *soil polygon* pada saat pemodelan *structure*. Lalu, dipilih material tanah sesuai dengan stratifikasi tanah.
4. Membuat model PVD dengan material *drain*.

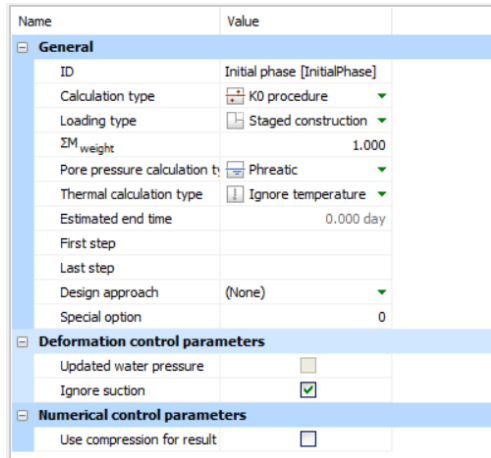


Gambar 4. Hasil pemodelan material *drain*

5. Menetapkan kondisi batas dimana tanah koordinat y *minimum* menerima jepit sedangkan koordinat x *minimum* dan *maksimum* menerima sendi.
6. Membuat *mesh*. *Meshing* dilakukan untuk membagi model ke dalam sel dan digunakan

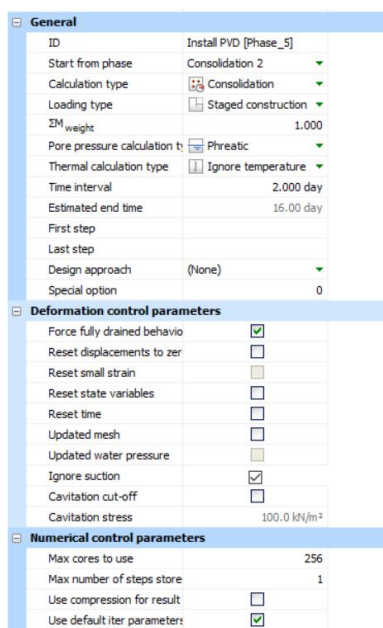
untuk melakukan analisis simulasi atau membuat model digital. Setelah itu, dipilih nodal sesuai letak instrumen pada lapangan untuk dianalisis.

7. Membuat tahapan konstruksi yang dimulai dengan *initial phase*.



Gambar 5. Initial phase pada stage construction

8. Membuat fase penimbunan dan konsolidasi. Fase penimbunan adalah mengaktifkan timbunan yang telah dibuat sedangkan fase konsolidasi adalah lamanya waktu sebelum dimulai pekerjaan konstruksi selanjutnya.
9. Mengaktifkan *drain* yang sudah dimodelkan setelah



Tabel 1 dan besar tekanan *vacuum* selama *vacuum preloading* berlangsung ditunjukkan pada Tabel 2. Untuk waktu pengerjaan PVD dan platform, waktu konstruksi 1 minggu cukup wajar dijumpai pada konstruksi di lapangan. Seperti tersaji pada Tabel 2, besaran tekanan vakum berfluktuasi dari beberapa hari awal sekitar 27 kPa hingga mencapai

pengerjaan timbunan dan konsolidasi selesai untuk instalasi PVD. *Material set* diganti menjadi *material set* setelah dipasang PVD.

Gambar 6. Install PVD pada stage construction

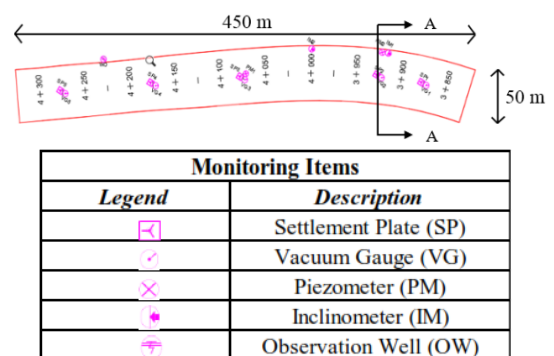
10. Setelah PVD dipasang, material *drain* diubah sesuai dengan keadaan vakum. Jika vakum menyala maka *drain* diubah menjadi *vacuum drain* sedangkan jika vakum tidak menyala maka digunakan *normal drain*. *Material set* diubah menjadi *saturated* saat vakum menyala dan beban diaktifkan.
11. Vakum dihentikan saat tanah mencapai derajat konsolidasi 90%.

Setelah melakukan pemodelan pada Plaxis, dilakukan analisis dengan mengubah panjang tanah pada pemodelan untuk mencari pergerakan horizontal pada setiap jarak. Data pergerakan horizontal dilakukan setiap 5 meter untuk semua panjang tanah yang dilakukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Deskripsi studi kasus

Penelitian ini menggunakan satu studi kasus yang terletak di Jakarta Utara. Pemodelan dilakukan pada posisi Settlement Plate 2 (SP 2) yang tersaji pada Gambar 7. Potongan yang akan dianalisa adalah potongan A-A pada Gambar 7. Zona vakum memiliki panjang 450 m dan lebar 50 m.



Gambar 7. Tampak atas denah proyek

Waktu pengerjaan platform dan PVD terdapat pada

puncaknya di angka 80 kPa. Perlu waktu sekitar 38 hari hingga vakum mencapai tekanan 80 kPa. Pada hari ke 43 terlihat bahwa tekanan vakum menjadi 0 kPa, disebabkan oleh pompa vakum yang rusak. Setelah diperbaiki, maka tekanan vakum membutuhkan sekitar 25 hari untuk mencapai 88 kPa. Fluktuasi ini wajar terjadi di lapangan karena stratifikasi pelapisan tanah yang kemungkinan cukup beragam.

Tabel 1. Jadwal pengerjaan platform dan instalasi PVD

Pekerjaan	Hari ke-... (kumulatif hari pelaksanaan)	Durasi (hari)
Urugan	0	2
Konsolidasi	2	3
Instalasi PVD	5	2

Tabel 2. Tekanan vakum yang terdata selama proses vakum konsolidasi

Hari ke-... (kumulatif hari pelaksanaan)	Durasi (hari)	Tekanan Vacuum (kPa)
7	3	26.67
10	8	46.25
18	11	61.54
29	1	60.00
30	1	66.00
31	1	49.00
32	8	64.78
40	5	77.40
45	1	80.00
46	1	74.00
47	3	0
50	4	61.75
54	8	79.25
62	8	85.13
70	1	60.00
71	4	74.00
75	28	88.11

Untuk pemodelan pada Plaxis 2D, model dibuat dengan lebar 64 m. Sedangkan untuk zona vakum, digunakan lebar 50 m dan panjang PVD 13,1 m.

Input parameter tanah

Stratifikasi dan parameter tanah digunakan berdasarkan korelasi data borelog, data laboratorium, dan asumsi pendekatan dari jenis tanah. Parameter *stiffness* tanah yaitu modulus elastisitas tanah dan angka Poisson diinterpretasi berdasarkan karakteristik hasil identifikasi tanah. Angka Poisson didapatkan berdasarkan Muni Budhu (2011) sedangkan modulus elastisitas tanah didapat berdasarkan U.S. Army Corps of Engineers (1990) dan persamaan (1) untuk lapisan *sand* serta persamaan (2) untuk lapisan *clay*.

Tabel 3. Input parameter tanah pada Plaxis 2D

Jenis tanah	Kedalaman (m)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)	E' (kN/m ²)	v'	c'ref (kN/m ²)	ϕ'	ψ	Ky tanah asli (m/day)	k _{hps} (m/day)
Tanah timbunan	2.1 – 0	18	17	1400	0.3	1	30	0	8.64	17.28
Silty clay	0 – 8	13.73	12.73	778	0.3	1	23	0	8.64	17.28
Clayey silt	8 – 10	13.73	12.73	9360	0.3	1	30	0	8.64	17.28
Clayey silt	10 – 12	15.89	14.89	19500	0.3	1	33	0	8.64	17.28
Silty sand	12 – 16	17.75	16.75	20200	0.3	1	35	0	864	1728
Silty sand	16 – 18	17.75	16.75	35350	0.3	1	40	0	864	1728
Silty sand	18 – 20	16.97	15.97	50500	0.3	1	44	0	864	1728

Parameter berat isi tanah menggunakan data hasil uji laboratorium, sedangkan *friction angle* didapat berdasarkan Bjerrum and Simons (1960) untuk lapisan *clay* dan persamaan (3) untuk lapisan *sand*. Untuk permeabilitas tanah arah vertikal menggunakan asumsi pendekatan berdasarkan Craig (2004), sedangkan permeabilitas tanah arah horizontal menggunakan Rixner, et. al (1986).

$$\frac{E_s}{p_\alpha} = \alpha N_{60} \dots\dots\dots (1)$$

Dengan:

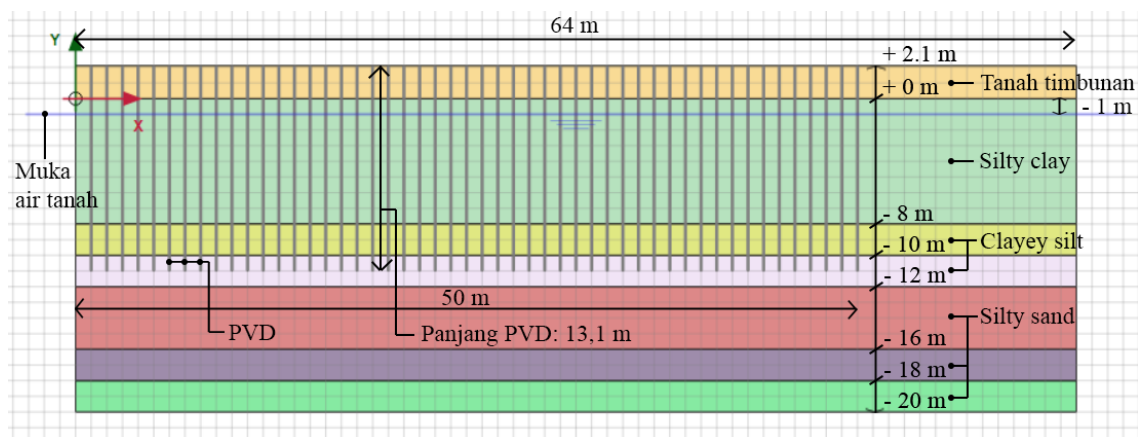
- p_α = Atmospheric pressure (101 kPa)
- α = 5 untuk *sands with fines*, 10 untuk *clean NC sand*, 15 untuk *clean OC sand*

$$E' = \frac{2(1+v')}{3} E_u \dots\dots\dots (2)$$

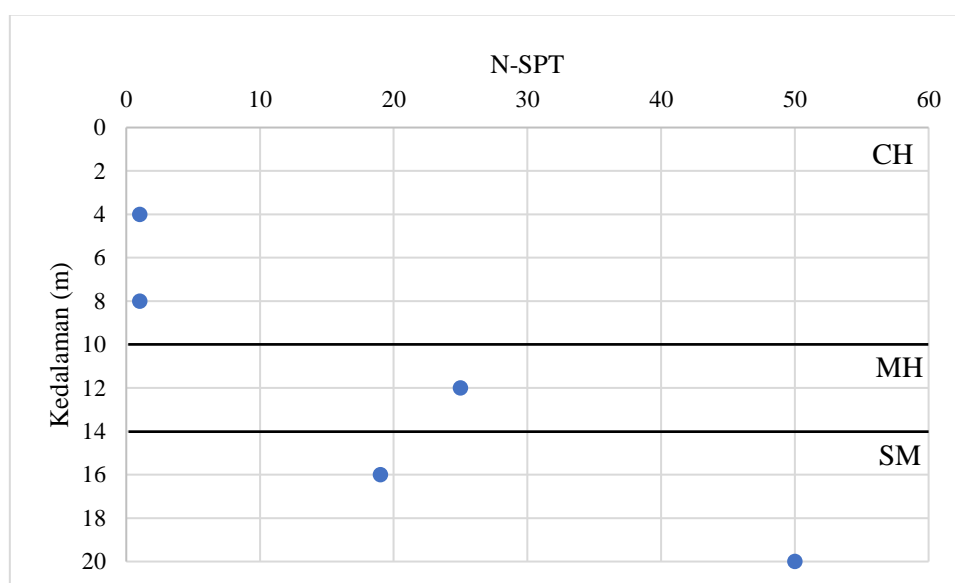
Dengan:

- v' = Angka Poisson
- E_u = $150 \times S_u$
- S_u = $6 \times N_{SPT}$
- $\phi' = 20 + (12N_{SPT})^{0.5} \dots\dots\dots (3)$

Input parameter tanah dengan model *Mohr-Coulomb* pada program Plaxis 2D dapat dilihat pada Tabel 3. Parameter pada Tabel 3 merupakan parameter hasil analisa balik dengan menyesuaikan terhadap kurva penurunan terhadap waktu yang terukur di lapangan. Parameter yang dominan di analisa balik adalah nilai Young's modulus pada lapis tanah kedua (*Silty clay*), dan nilai $k_{h,ps}$. Parameter $k_{h,ps}$ adalah ekuivalen permeabilitas arah horizontal yang mempertimbangkan keberadaan PVD dan kondisi *plane-strain model 2D*. Dengan keberadaan PVD, permeabilitas arah horizontal model akan membesar sehingga disipasi tekanan air pori akan semakin cepat. Hal ini mirip dengan mekanisme yang terjadi di lapangan dengan adanya keberadaan PVD. Gambar 8 menyajikan model elemen hingga yang digunakan untuk analisa. Tabel data borelog terdapat pada Gambar 9 sedangkan data laboratorium pada Tabel 4.



Gambar 8. Model analisa pada Plaxis 2D



Gambar 9. Data N-SPT Borelog

Tabel 4. Data Laboratorium

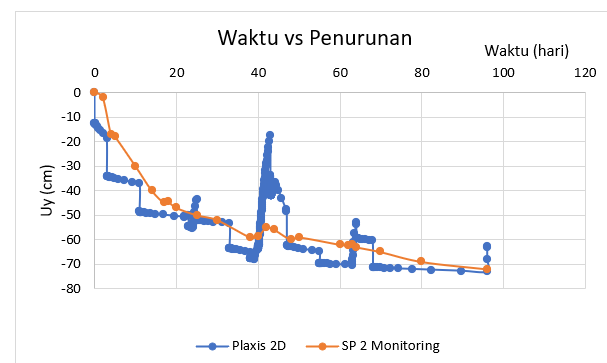
Depth (m)	2.00 – 2.50	6.00 – 6.50	10.00 – 10.50	14.00 – 14.50	18.00 – 18.50
Specific Gravity, G _s	2.591	2.591	2.628	2.649	2.639
Natural Water Content, w (%)	82.04	83.81	50.54	28.23	36.45
Natural Density, γ _n (gr/cm ³)	1.41	1.40	1.62	1.81	1.73
Dry Density, γ _d (gr/cm ³)	0.77	0.76	1.08	1.41	1.27
Saturation Density, γ _{sat} (gr/cm ³)	0.83	0.82	1.13	1.52	1.35
Depth (m)	2.00 – 2.50	6.00 – 6.50	10.00 – 10.50	14.00 – 14.50	18.00 – 18.50
Atterberg Limits					
Liquid Limits, LL (%)	102.00	118.00	76.00	-	-
Plastic Limits, PL (%)	37.67	38.27	38.34	-	-
Plasticity Index, PI (%)	64.33	79.73	37.66	-	-
Hidrometer Analysis					
Gravel (%)	0.10	0.00	0.00	-	0.90
Sand (%)	2.40	0.50	22.40	-	78.30
Silt (%)	37.30	34.50	55.90	-	19.00

Depth (m)	2.00 – 2.50	6.00 – 6.50	10.00 – 10.50	14.00 – 14.50	18.00 – 18.50
Clay (%)	60.20	65.00	21.70	-	1.80
Consolidation Test					
Effective overburden pressure, P_o (kg/cm ²)	-	-	0.64	-	-
Preconsolidation Pressure, P_c (kg/cm ²)	-	-	0.70	-	-
Compression Index, C_c	-	-	0.45	-	-
Recompression ratio, C_r	-	-	0.08	-	-
Overconsolidated ratio, OCR	-	-	-	-	-
Coeff. of consolidation, c_v (mv ² /year)	-	-	8.720	-	-
Coeff. of secondary compression, C_a	-	0.002	0.0038	-	-
Triaxial CU Test					
Cohesion Total (kPa)	10.66	-	-	-	-
Friction Angle Total (°)	9.04	-	-	-	-
Cohesion Effective (kPa)	9.41	-	-	-	-
Friction Angle Effective (°)	13.10	-	-	-	-
Triaxial UU Test					
Cohesion, c (kg/cm ²)	-	0.15	-	-	-
Friction Angle, f (°)	-	8.8	-	-	-
Permeability Test					
Coefficient of Permeability	-	-	1.01×10^{-6}	-	-
Organic Content					
Organic matter (% w/w)	2.0	2.2	0.8	-	0.9

Hasil back analysis

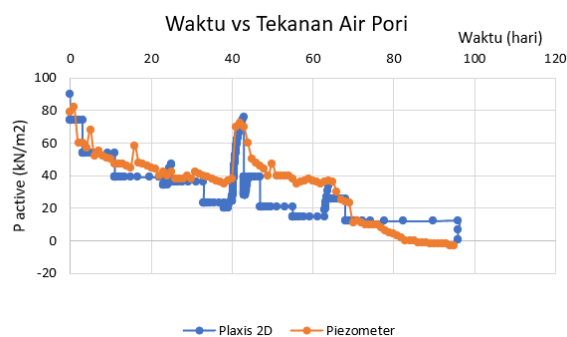
Gambar 10 menyajikan perbandingan kurva penurunan terhadap waktu antara hasil analisa dan pengukuran lapangan. Lokasi pengukuran berada pada *Settlement Plate* (SP) 2. Pada lokasi ini, besar penurunan maksimal yang terukur adalah sekitar 70 cm dengan waktu konstruksi selama 96 hari. Pada hari ke-38, pompa vakum rusak sehingga daya hisap menjadi 0. Hal ini menyebabkan grafik *rebound* pada kurva hasil pengukuran SP 2. Untuk hasil analisa, diperoleh kurva penurunan terhadap waktu yang memiliki *trend* yang serupa dengan pengukuran di SP 2. Penurunan *final* menunjukkan hasil mirip, yaitu di angka sekitar 70 cm. Namun ada hal yang sedikit berbeda yaitu ketika pompa vakum rusak. Pada hasil analisa, grafik *rebound* cenderung lebih tinggi dari pengukuran lapangan, yaitu sebesar 55 cm. Sedangkan grafik *rebound* yang terukur hanya sekitar 8 cm. Hal ini diduga karena model *Mohr-Coulomb* yang memiliki karakteristik *linear-fully plastic*, sehingga kurva *rebound/unloading* tidak mampu termodelkan dengan baik. Hal ini dikarenakan modulus tanah

pada kondisi *loading* dan *unloading* pada model *Mohr-Coulomb* adalah konstan dan identik. Umumnya, modulus tanah *unloading* lebih besar daripada modulus tanah *loading*. Untuk mengatasi masalah pemodelan ini, disarankan untuk kedepannya bisa menggunakan model tanah *non-linear plastic model*, seperti *Hardening Soil model* (Schanz, et al., 1999).



Gambar 10. Perbandingan kurva penurunan terhadap waktu antara hasil analisa dan pengukuran lapangan

Gambar 11 menunjukkan perbandingan kurva tekanan air pori terhadap waktu antara pengukuran di lapangan dan hasil analisa. Secara umum, hasil analisa juga sudah menunjukkan *trend* yang identic dengan hasil pengukuran di lapangan. Kurva *rebound* tekanan air pori cukup mendekati dengan hasil pengukuran di lapangan. Namun, setelah pompa aktif kembali pada hari ke-43, ada perbedaan tekanan air pori yang cukup signifikan antara pengukuran *piezometer* dan hasil analisa. Hal ini diduga ketika pompa nyala kembali, daya hisap vakum belum sempurna bekerja di seluruh area. Namun, pada kondisi pemodelan, ketika pompa aktif kembali, daya hisap vakum secara ideal akan bekerja sempurna di seluruh area. Selain itu, model *Mohr-Coulomb* juga patut diduga belum mampu menghasilkan estimasi tekanan air pori yang akurat. Salah satu saran untuk penelitian selanjutnya adalah menggunakan *non-linear model*, seperti *Hardening Soil model* (Schanz, et al., 1999) untuk analisa.



Gambar 11. Perbandingan kurva tekanan air pori terhadap waktu antara hasil analisa dan pengukuran lapangan

KESIMPULAN

Stratifikasi pelapisan tanah digunakan berdasarkan korelasi data *borelog*, data laboratorium, dan asumsi pendekatan dari jenis tanah. Parameter tanah yang didapat merupakan parameter hasil analisa balik, disesuaikan terhadap kurva penurunan terhadap waktu di lapangan. Dengan keberadaan PVD, permeabilitas tanah arah horizontal model akan membesar sehingga disipasi tekanan air pori akan semakin cepat. Hal ini mirip dengan mekanisme yang terjadi di lapangan dengan adanya PVD. Stratifikasi pelapisan tanah yang cukup beragam juga dapat menyebabkan tekanan vakum di lapangan mengalami fluktuasi.

Kurva hasil pemodelan Plaxis untuk penurunan terhadap waktu dan tekanan air pori terhadap waktu memiliki hasil yang serupa dengan pengukuran di lapangan. Namun, terdapat perbedaan pada saat pompa vakum rusak. Model *Mohr-Coulomb* memiliki karakteristik *linear-fully*

plastic, menyebabkan grafik tidak mampu termodelkan dengan baik. Hal ini karena modulus tanah pada kondisi *loading* dan *unloading* pada model *Mohr-Coulomb* konstan dan identik, sedangkan pada umumnya modulus tanah *unloading* lebih besar daripada modulus tanah *loading*. Selain itu ketika pompa menyala kembali, daya hisap vakum belum bekerja secara sempurna di seluruh area. Pada kondisi pemodelan daya hisap vakum bekerja secara ideal pada seluruh area ketika pompa aktif kembali, menyebabkan adanya perbedaan yang cukup signifikan antara hasil analisa dan hasil pengukuran lapangan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Bapak Ryan Alexander Lyman untuk diskusi selama studi.

DAFTAR PUSTAKA

- Basu, D., & Madhav, M. (2000). Effect of Prefabricated Vertical Drain Clogging on the Rate of Consolidation: A Numerical Study. *Geosynthetics International*, 189-215. 10.1680/gein.7.0172
- Bjerrum, L., & Simons, N. (1960). Comparison of shear strength characteristics of normally consolidated clays. *Norwegian Geotechnical Institute. Publ.*, 35, 13-22. ISSN 0078-1193
- Bo, M. W., Arulrajah, A., & Nikraz, H. (2007). Preloading and prefabricated vertical drains design for foreshore land reclamation projects: a case study. *Ground Improvement*, 67-76. 10.1680/grim.2007.11.2.67
- Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations*. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 978-0-470-55684-9
- Chai, J., Carter, J. P., & Liu, M. D. (2014). Methods of vacuum consolidation and their deformation analyses. *Ground Improvement*, 35-46. 10.1680/grim.13.00017
- Chai, J., Miura, N., & Bergado, D. T. (2008). Preloading clayey deposit by vacuum pressure with cap-drain: Analyses versus performance. *Geotextiles and Geomembranes* 26, 220-230. 10.1016/j.geotexmem.2007.10.004
- Craig, R. F. (2004). *Craig's Soil Mechanics*. Spon Press. ISBN 0-203-57441-9
- Engineers, U. A. (1990). *Engineering and Design Settlement Analysis*. Washington DC. EM 1110-1-1904

- Indraratna, B., Bamunawita, C., Redana, I., & McIntosh, G. (2003). Modelling of prefabricated vertical drains in soft clay and evaluation of their effectiveness in practice. *Ground Improvement*, 127-137. 10.1680/grim.2003.7.3.127
- Punmia, B. C., Jain, A. K., & Jain, A. K. (2005). *Soil Mechanics and Foundations*. New Delhi: Laxmi Publications (P) LTD. ISBN 81-7008-081-9
- Rivanga, N. U., & Hamdhan, I. N. (2018). Analisis Vacuum Consolidation pada Perbaikan Tanah Lempung Lunak dengan Model Axisymmetric. *Reka Racana*, 68-79. 10.26760/rekaracana.v4i1.68
- Rixner, J. J., Kraemer, S. R., & Smith, A. (1986). *Prefabricated Vertical Drains Vol. I, Engineering Guidelines*. Report No. FHWA/RD-86/168
- Schanz, T., Vermeer, P., & Bonnier, P. (1999). The hardening soil model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. ISBN 90 5809 040 X
- Taqwa, F. M. L., Hutabarat, L. E., Ilyas, T., & Prakoso, W. A. (2019, November). Estimation of settlement induced land subsidence of marine clay on Kamal Muara Area, Northern Jakarta, based on the change of pore water pressure. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1376, No. 1, p. 012007). IOP Publishing.
- Wani, K. M., & Showkat, R. (2018). Soil Constitutive Models and Their Application in Geotechnical Engineering: A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 137-145. 10.17577/IJERTV7IS040129