

Metode PVD dan *Preloading* sebagai Upaya Perbaikan Tanah Lunak di Proyek Jalan Tol Jambi Indonesia

DESTI SANTI PRATIWI^{1*}, FARIS NAUFAL ABDURRAHMAN²

¹Dosen Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

²Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

Email: destisantipratiwi@itenas.ac.id

ABSTRAK

Permasalahan tanah lunak sering menjadi fokus utama dalam pembangunan infrastruktur khususnya jalan tol. Tanah lunak akan mengalami proses konsolidasi yang merupakan proses terdisipasinya tekanan air pori berlebih akibat adanya beban dengan kurun waktu yang relatif lama. Hal tersebut dikarenakan tanah lunak memiliki ukuran dan nilai permeabilitas yang relatif kecil. Oleh karena itu upaya percepatan waktu konsolidasi perlu dilakukann untuk memangkas waktu konstruksi dan pada akhirnya dapat meminimalisir biaya konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kombinasi *preloading* dan PVD sebagai upaya perbaikan tanah lunak di area pembangunan Jalan Tol Jambi Indonesia dengan menggunakan pendekatan Metode Elemen Hingga yang berbasis Metode Numerik. Perencanaan PVD yang digunakan yaitu pola segitiga dengan spasi dan kedalaman yang divariasikan. Berdasarkan hasil analisis, PVD dengan kedalaman 4 m dan spasi 1,5m dapat mereduksi hingga 90% waktu penurunan yang akan terjadi, sehingga kombinasi tersebut disarankan dalam pengaplikasiannya di lapangan.

Kata kunci: tanah lunak, konsolidasi, metode elemen hingga, PVD, waktu penurunan

ABSTRACT

Soft soil problems are often the main focus of infrastructure development, especially toll roads. Soft soil will experience a consolidation process that dissipates excess pore water pressure due to loads over a relatively long period of time. This is because soft soil has a relatively small size and permeability value. Therefore, efforts to accelerate consolidation time need to be made to cut construction time and ultimately minimise construction costs. This research aims to determine the combination of *preloading* and PVD as an effort to improve soft soil in the Jambi Indonesia Toll Road construction area using a finite element method approach based on numerical methods. The PVD plan used is a triangular pattern with varied spacing and depth. Based on the analysis results, PVD with a depth of 4 m and a spacing of 1.5 m can reduce up to 90% of the settlement time, so this combination is recommended for application in the field.

Keywords: soft soil, consolidation, finite element method, PVD, settlement time

1. PENDAHULUAN

Tanah lempung lunak merupakan salah satu tanah bermasalah yang selalu menjadi tantangan bagi para insinyur geoteknik. Permasalahan yang dapat terjadi dari tanah lunak yaitu, kekuatan rendah, kompresibilitas tinggi, besarnya deformasi *creep*, dan permeabilitas renah [1]. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam terkait sifat tanah lunak diperlukan untuk dapat menentukan upaya perbaikan tanah secara tepat. Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk kasus tanah lunak di antaranya, *replacement*, *preloading*, dan *Prefabricated Vertikal Drain (PVD)* [1].

Preloading merupakan salah satu metode yang tradisional namun masih sering digunakan dalam dunia praktisi dikarenakan kemudahan dalam pengaplikasiannya namun sangat *powerful* [1]. Prinsip dari *preloading* ini, yaitu mengurangi angka pori dalam tanah melalui proses konsolidasi dengan cara memberikan beban di atas permukaan tanah dengan periode tertentu dan menghilangkannya pada saat pembangunan infrastruktur permanen akan dilakukannya [1]. Selama pembebanan *preloading*, penurunan tanah akan terjadi terhadap waktu dan pada saat pembangunan struktur permanen, penurunan yang terjadi akan relatif kecil. Namun, sangat penting pada perencanaan untuk menentukan waktu akhir dari *preloading*. Pada kasus tanah lunak, proses konsolidasi akan membutuhkan waktu yang lama dikarenakan nilai permeabilitas yang kecil. Oleh karena itu, apabila waktu yang dibutuhkan untuk tahap *preloading* melebihi waktu yang diberikan, maka PVD dapat ditambahkan untuk mengurangi jarak drainase sehingga mempercepat waktu konsolidasi dan penurunan [1].

Saat ini, penggunaan PVD sudah sangat banyak digunakan pada kasus-kasus tanah lunak. Tingkat efisiensi penggunaan PVD dapat ditentukan berdasarkan nilai permeabilitas tanah di sekitarnya, kedalaman, spasi dan pola dari PVD. Beberapa penelitian mengenai kombinasi *preloading* dan PVD sudah banyak dilakukan. Analisis pengaruh variasi spasi dan pola PVD dilakukan untuk mengetahui kombinasi PVD dan *preloading* yang paling efektif digunakan dalam upaya perbaikan tanah lunak [2][3][4]. Konfigurasi pola dan kedalaman pada perencanaan PVD pun menunjukkan adanya pengaruh yang cukup signifikan [5][6]. Selain itu, kombinasi *preloading* dengan PVD dapat ditambahkan dengan penggunaan *Prefabricated Horizontal Drain (PHD)* [7].

Tujuan dari penelitian ini, yaitu menentukan konfigurasi perbaikan tanah dengan menggunakan *preloading* dan PVD pada Proyek Jalan Tol Jambi Indonesia berdasarkan waktu penurunan konsolidasi. Pemodelan perbaikan tanah akan dilakukan dengan menggunakan pendekatan Numerik yaitu Metode Elemen Hingga. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pengetahuan bagaimana mendesain perbaikan tanah dengan menggunakan Program PLAXIS 3 dimensi dan meneliti pengaruh kedalaman dan jarak antar PVD terhadap efektifitas kinerja PVD tersebut.

2. METODOLOGI

2.1 Besar dan Waktu Konsolidasi

Peningkatan tegangan pada tanah lempung jenuh air akibat beban struktur di lapangan akan mengakibatkan tekanan air pori meningkat [8]. Waktu yang relatif lama dibutuhkan untuk mengeluarkan tegangan air pori berlebih dan mentransfer beban kepada partikel tanah dikarenakan sifat hidraulik tanah lempung yang kecil. Besar penurunan konsolidasi primer 1-dimensi dapat ditentukan dengan **Persamaan 1** di bawah ini [8].

$$S_c = \frac{\Delta e}{1+e_0} H_c \quad \dots(1)$$

halmana:

- S_c = penurunan konsolidasi primer [m],
 Δe = total perubahan angka pori akibat pemberian beban tambahan,
 e_0 = angka pori sebelum pemberian beban,
 H_c = tebal lapisan lempung yang mengalami konsolidasi [m].

Sedangkan, tingkat terdispasinya air pori perlu diketahui untuk menentukan derajat konsolidasi (U) terhadap waktu setelah beban diberikan. Rata-rata derajat konsolidasi pada tanah lempung dapat diperoleh melalui **Persamaan 2** dan **Persamaan 3** menunjukkan persamaan untuk menentukan waktu penurunan konsolidasi [2].

$$U = \frac{S_c(t)}{S_c(max)} \quad \dots(2)$$

halmana:

- $S_c(t)$ = penurunan pada lapisan lempung pada waktu t setelah diberikan beban [m],
 $S_c(max)$ = penurunan konsolidasi maksimum pada lempung setelah diberikan beban [m].

$$t = \frac{T_v H^2}{C_v} \quad \dots(3)$$

halmana:

- t = waktu penurunan konsolidasi [detik],
 H = panjang maksimum arah drainase [m],
 T_v = waktu faktor nondimensional,
 C_v = koefisien konsolidasi.

2.2 Material Model *Hardening Soil*

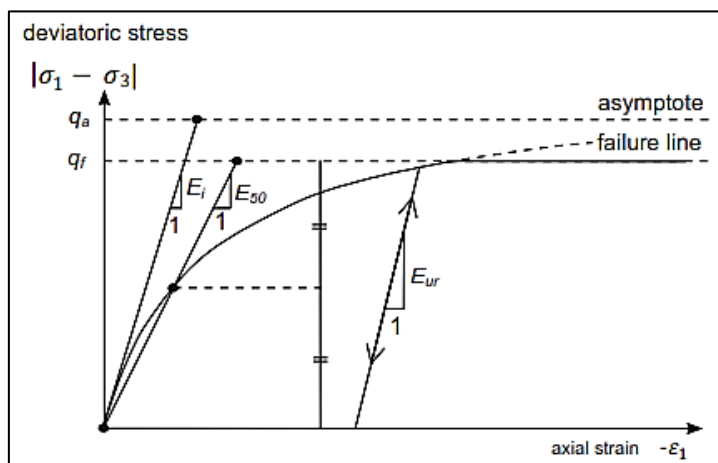
Upaya penentuan konstitutif model pada desain bangunan geoteknik merupakan hal yang sangat penting. Terlebih lagi, banyaknya konstitutif model yang tersedia membuat para perencana geoteknik dapat memilih material model sesuai dengan kasus yang dihadapi. Pada kasus tanah lunak, material model tanah yang dapat digunakan, yaitu *Mohr-Coulomb*, *Hardening Soil*, *Soft-Soil*, dan *Hardening Soil Small*. Namun, dari semua konstitutif model yang disebutkan memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing. Mohr Coulomb merupakan model material yang paling sederhana dan banyak digunakan dalam kasus timbunan pada tanah lunak [5][9][10]. Akan tetapi, pada penelitian ini akan menggunakan konstitutif model *Hardening Soil*.

Hardening soil adalah model mutakhir untuk melakukan simulasi sifat dari berbagai jenis tanah baik itu tanah lunak maupun kaku [11]. Ketika diberikan beban deviatorik primer, tanah menunjukkan sebuah penurunan kekakuan dan secara bersamaan membentuk regangan plastis yang permanen. Terdapat beberapa karakteristik dasar pada model ini, yaitu [12]:

1. Kekakuan yang bergantung pada tegangan (m),
2. Regangan plastis karena beban deviatorik primer (E_{50}^{ref}),
3. Regangan plastis karena kompresi primer (E_{oed}^{ref}),
4. *Elastic unloading/reloading* (E_{ur}^{ref}),
5. Keruntuhan menurut kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb (c, ϕ, ψ).

Pemikiran dasar untuk formulasi model *hardening soil* adalah hubungan *hyperbolic* antara regangan vertikal (ε_1 dan tegangan deviatorik (q) pada beban triaxial primer. Hubungan *hyperbolic* regangan-tegangan pada beban primer untuk sebuah pengujian triaksial teraliri

standar ditunjukkan pada **Gambar 1** di bawah ini. Gambar tersebut menunjukkan adanya hubungan dari 3 (tiga) kekuan, yakni E_i , E_{50} dan E_{ur} .



Gambar 1. Hubungan *hyperbolic* tegangan-regangan dari uji triaksial teraliri standar [12]

2.3 Parameter Tanah

Hasil penyelidikan tanah di lapangan berupa uji SPT dan bor dalam digunakan sebagai acuan dalam menentukan parameter tanah pada pemodelan. Parameter penting seperti kuat geser tanah, berat isi, permeabilitas didapatkan berdasarkan korelasi dari data N-SPT [13][14], sedangkan untuk jenis tanah ditentukan berdasarkan hasil bor dalam. Pada penelitian ini, jumlah lapisan tanah dibuat sebanyak 6 (enam) lapis berdasarkan hasil klasifikasi deskripsi tanah dan N-SPT. Parameter tanah yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada **Tabel 1** di bawah ini.

Tabel 1. Parameter yang Digunakan pada Pemodelan

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Timbunan	Satuan
Kedalaman	0-4	4-18	18-30,5	30,5-36	36-40	-	-
N-SPT	5	11	20	38	60	-	-
Jenis tanah	Lempung	Lempung	Pasir	Lempung	Pasir	Pasir	-
Klasifikasi	Lunak	Kaku	Padat sedang	Sangat kaku	Sangat padat	Padat	-
γ_{unsat}	16	16,5	16,5	20	23	16	[kN/m ³]
γ_{sat}	17	17,5	17,5	21	24	17	[kN/m ³]
$E_{50\ ref}$	3.200	9.600	12.000	20.000	40000	16.000	[kN/m ²]
$E_{oed\ ref}$	2.560	7.680	9.600	16.000	32000	12.800	[kN/m ²]
$E_{ur\ ref}$	9.600	28.800	36.000	60.000	120000	48.000	[kN/m ²]
m	1	1	0,5	1	0,5	0,5	-
c'	5	5	2	3	1	5	[kN/m ²]
ϕ'	23	25	26	25	32	25	°
ψ	0	0	0	0	2	0	°
k_x, k_y	0,000864	0,000864	0,0864	0,000864	8,64	8,64	[m/hari]

2.4 Metode Elemen Hingga / *Finite Element Method* (FEM)

Metode Elemen Hingga merupakan salah satu dari Metode Numerik berbasis metode *mesh*. Metode ini dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah teknik sipil sederhana maupun kompleks secara akurat. Pada saat ini, FEM digunakan lebih dari 100000 enjiner untuk menyelesaikan masalah teknik sipil [15][16]. Analisis menggunakan FEM menawarkan sebuah solusi pendekatan untuk model matematika.

Metode berbasis mesh membagi domain analisis menjadi sebuah Kumpulan dari subdomain yang disebut elemen, sehingga membentuk sebuah jaring [17]. Setiap elemen memiliki beberapa node dimana persamaan pengatur dikembangkan, dengan sejumlah elemen

terdekat yang telah ditentukan sebelumnya, yang dihubungkan dengan fungsi bentuk [15]. Terdapat 7 (tujuh) tahapan dalam penggunaan FEM ini [15], yaitu:

1. Menentukan persamaan dan kondisi batas,
2. Diskretisasi domain,
3. Menentukan persamaan elemen,
4. Mengumpulkan persamaan global,
5. Pengenaan kondisi batas dari pemodelan,
6. Menyelesaikan persamaan global,
7. Mempresentasikan hasil.

Namun, kesalahan perhitungan pada analisis numerik dapat mempengaruhi keakuratan hasil. Terdapat 5 (lima) jenis kesalahan umum yang dapat terjadi pada analisis numerik, di antaranya [15]:

1. Kesalahan dalam menentukan parameter tanah,
2. Kesalahan aljabar dalam perhitungan,
3. Kesalahan iterasi,
4. Kesalahan pendekatan,
5. Kesalahan pembulatan.

Walaupun kemungkinan kesalahan dapat terjadi, penggunaan FEM sangat membantu dalam menyelesaikan permasalahan kompleks salah satunya kasus tanah lunak. Beberapa peneliti telah menggunakan FEM sebagai pendekatan untuk menganalisis kinerja *preloading* dan PVD dalam upaya perbaikan tanah lunak, baik dalam model 2 dimensi maupun 3 dimensi [3][5] [18].

2.5 Pemodelan Studi Kasus

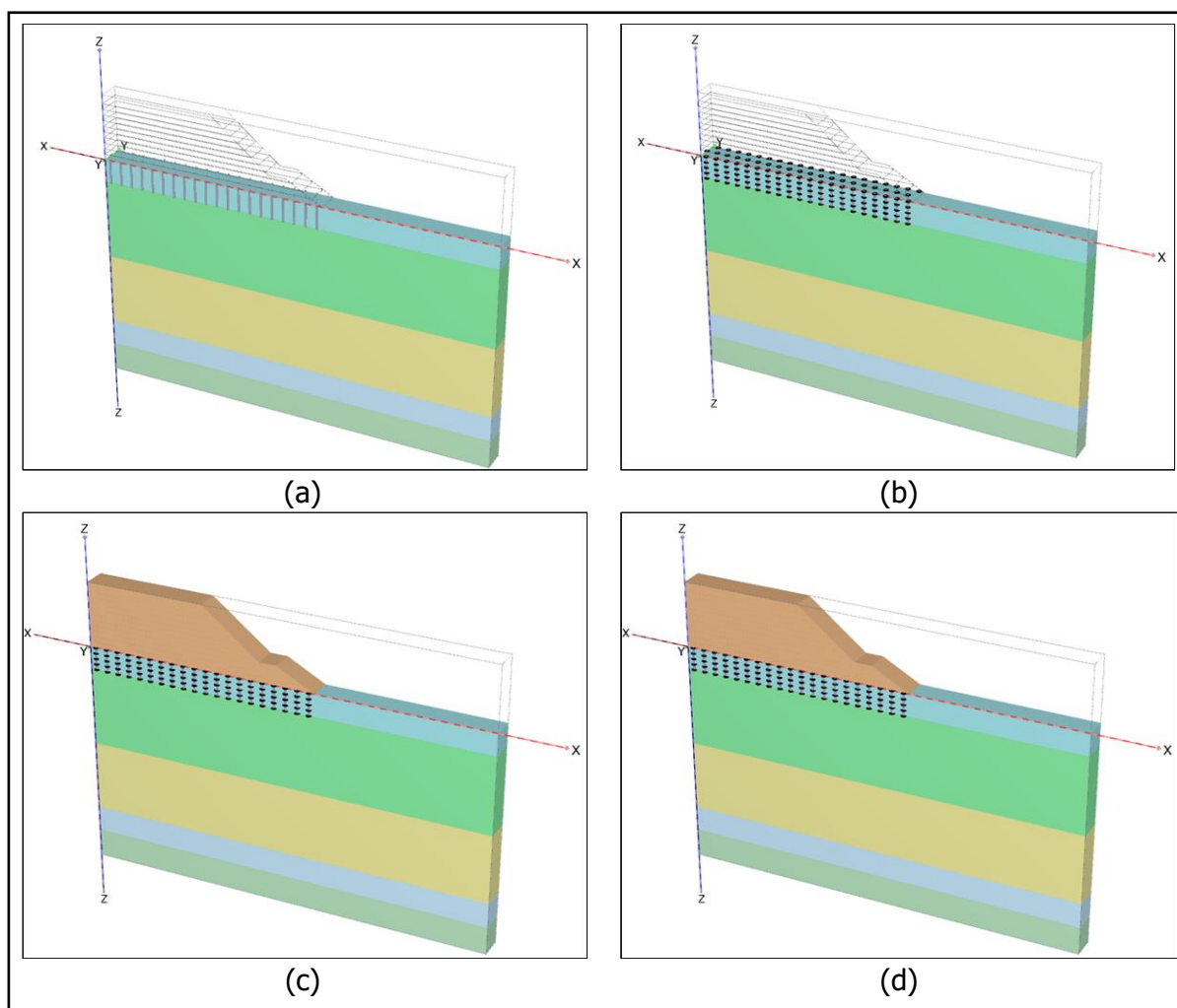
Pemodelan perbaikan tanah di Jalan Tol ruas Betung – Tempino – Jambi seksi 4 Indonesia dilakukan dengan menggunakan Program PLAXIS 3 dimensi yang berbasis Metode Elemen Hingga. Tujuan pemodelan ini, yaitu untuk mengetahui besaran dan waktu penurunan. Parameter desain yang digunakan diambil berdasarkan hasil penyelidikan tanah di lapangan. Hasil pengujian SPT menunjukkan bahwa kedalaman lapisan lempung lunak berada hingga kedalaman 4 (empat) meter. Beban *preloading* yang diberikan direncanakan setinggi 11,56 m dengan pengerjaan secara bertahap. Selain itu, demi mencapai kondisi kritis, muka air ditempatkan di permukaan tanah eksisting pada pemodelan. Stratigrafi dan parameter tanah yang digunakan sesuai dengan **Tabel 1**.

Pada penelitian ini, kedalaman PVD direncanakan untuk dipasang secara keseluruhan dan *floating*. Pemasangan PVD secara keseluruhan memiliki arti bahwa kedalaman PVD akan dimodelkan sedalam lapisan tanah lunak yakni 4 (empat) meter, sedangkan *floating* hanya dimodelkan sedalam 2 (dua) meter. Namun, untuk mengetahui efektivitas kedalaman PVD, terdapat pemodelan yang mengkombinasi kedalaman 2 (dua) dan 4 (empat) meter. Selain memvariasikan kedalaman, pada penelitian ini juga akan menggunakan beberapa jarak spasi antar PVD, yakni 1,5; 2; 2,5 meter. Sedangkan untuk pola yang digunakan hanya 1 variasi, yaitu pola segitiga. Rekapitulasi variasi pemodelan dapat dilihat pada **Tabel 2**. Adapun tahapan konstruksi yang digunakan pada penelitian ini (**Gambar 2**), yaitu:

1. Kondisi awal,
2. Pemasangan PVD,
3. Pemberian beban *preloading*,
4. Konsolidasi 90% *degree of consolidation* dan *minimum excess pore pressure* (MEPP).

Tabel 2. Variasi Pemodelan

Model	Spasi [m]	Kedalaman [m]
1		4
2	1,5	2
3		Kombinasi 4 dan 2
4		4
5	2	2
6		Kombinasi 4 dan 2
7		4
8	2,5	2
9		Kombinasi 4 dan 2



Gambar 2. Tahapan konstruksi pemodelan (a) kondisi awal, (b) PVD diaktifkan, (c) *preloading* diaktifkan, (d) konsolidasi MEEP

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis konfigurasi *preloading* dan PVD dilakukan untuk merencanakan desain perbaikan tanah lunak di area Proyek Jalan Tol Jambi seksi 4 Indonesia. Pemodelan menggunakan PLAXIS menghasilkan beberapa luaran yang sangat bermanfaat bagi alternatif desain perbaikan tanah, yaitu waktu penurunan, besar penurunan dan tekanan air pori berlebih. Besar dan waktu penurunan ditinjau hingga tanah terkonsolidasi 90%.

Tahap awal analisis yaitu pemodelan perbaikan tanah dengan hanya memberikan beban *preloading* yang selanjutnya akan diketahui berapa waktu yang dibutuhkan untuk mendisipasi

air pori berlebih hingga 90%. Selanjutnya, waktu tersebut akan dibandingkan dengan perbaikan tanah lunak yang dikombinasi PVD. Hasil dari perbandingan ini diharapkan dapat memberikan ketepatan dalam upaya perbaikan tanah lempung lunak. Berdasarkan hasil analisis, apabila tanah lunak hanya diperbaiki dengan beban *preloading* 11,56m, waktu penurunan menunjukkan angka yang cukup lama yakni di 3215 hari atau setara dengan kurang lebih 8 (delapan) tahun dengan penurunan sebesar 1,078 meter. Hal tersebut tentunya sulit untuk diaplikasikan di lapangan karena waktu tunggu yang lama pada proses konsolidasi. Oleh karena itu, penambahan PVD dijadikan alternatif untuk mereduksi waktu penurunan, dimana spasi dan kedalaman PVD divariasikan.

Gambar 3 menunjukkan grafik hubungan antara waktu dan besar penurunan untuk 9 (Sembilan) model dengan PVD dan tanpa PVD. Hasil analisis menunjukkan adanya pengaruh signifikan terhadap waktu penurunan, yakni dapat mereduksi hingga 80% waktu konsolidasi. Waktu penurunan pada setiap model PVD dapat dilihat pada **Tabel 3**. Pada tabel menunjukkan bahwa spasi dan kedalaman dapat mempengaruhi waktu penurunan. Model 1 dimana spasi PVD sebesar 1,5m dan kedalaman PVD sedalam 4m menunjukkan waktu tersingkat yakni 280 hari untuk proses konsolidasi hingga 90%. Selain itu, **Tabel 4** menunjukkan besar penurunan untuk 9 (Sembilan) model dengan PVD. Berdasarkan hasil analisis berupa besar penurunan pun menunjukkan bahwa Model 1 memiliki besar penurunan terkecil dibandingkan dengan model lainnya. Namun, perbedaan besar penurunan untuk seluruh model dapat dikatakan tidak begitu signifikan, mengingat fungsi utama PVD yaitu mempercepat waktu konsolidasi bukan mereduksi besar penurunan.

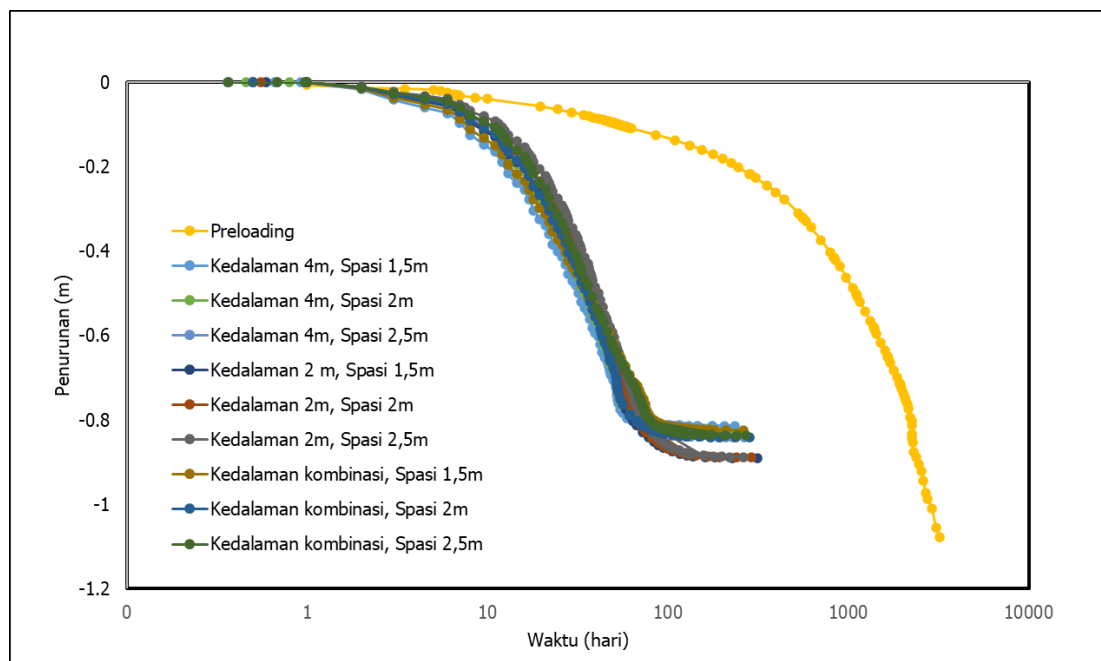
Tabel 3. Rekapitulasi Waktu Penurunan

Nomor Model	Spasi PVD [m]	Kedalaman PVD [m]	Waktu penurunan [hari]
Tanpa PVD	-	-	3,214
1		4	280
2	1,5	2	320
3		Kombinasi 4 dan 2	318
4		4	314
5	2	2	319
6		Kombinasi 4 dan 2	305
7		4	301
8	2,5	2	327
9		Kombinasi 4 dan 2	317

Tabel 4. Rekapitulasi Besar Penurunan

Nomor Model	Spasi PVD [m]	Kedalaman PVD [m]	Besar penurunan [m]
1		4	0,812
2	1,5	2	0,830
3		Kombinasi 4 dan 2	0,821
4		4	0,837
5	2	2	0,838
6		Kombinasi 4 dan 2	0,832
7		4	0,823
8	2,5	2	0,835
9		Kombinasi 4 dan 2	0,830

Selain besar dan waktu penurunan yang terjadi untuk mencapai kondisi MEPP, penelitian ini juga meninjau berapa tekanan air pori berlebih maksimum pada tahap konsolidasi MEPP. Rekapitulasi tekanan air pori berlebih maksimum ditunjukkan pada **Tabel 5** di bawah ini. Dapat dilihat bahwa tekanan air pori terbesar dihasilkan oleh Model 7, dimana memiliki konfigurasi spasi sebesar 2,5m dan kedalaman 4m.



Gambar 3. Grafik hubungan waktu dan besar penurunan untuk seluruh pemodelan

Tabel 5. Rekapitulasi Sisa Tekanan Air Pori Berlebih

Nomor Model	Spasi PVD [m]	Kedalaman PVD [m]	Tekanan Air Pori Berlebih [kPa]
1		4	16,056
2	1,5	2	17,358
3		Kombinasi 4 dan 2	8,063
4		4	24,699
5	2	2	20,042
6		Kombinasi 4 dan 2	24,898
7		4	33,854
8	2,5	2	20,958
9		Kombinasi 4 dan 2	18,790

4. KESIMPULAN

Pemodelan perbaikan tanah *preloading* dan *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* menggunakan Metode Numerik, khususnya Metode Elemen Hingga, dapat memberikan pendekatan yang *powerful*. Beberapa fitur yang tersedia dapat merepresentasikan kondisi aktual di lapangan, khususnya dalam menentukan tahapan konstruksi. Berdasarkan hasil analisis menunjukkan bahwa apabila perbaikan tanah lempung lunak di Tol Jambi seksi 4 hanya menggunakan *preloading* tidak menunjukkan hasil yang efektif dikarenakan waktu tunggu proses konsolidasi yang sangat lama. Oleh karena itu, perlu adanya kombinasi perbaikan tanah dengan PVD untuk mereduksi waktu konsolidasi.

Selanjutnya, pemilihan konfigurasi PVD perlu ditentukan untuk mengetahui efektivitas kinerja dari PVD. Berdasarkan hasil analisis, PVD yang paling optimum diperoleh dari konfigurasi kedalaman 4m (*full penetration*) dengan spasi 1,5m. Konfigurasi tersebut efektif serta efisien dalam mereduksi waktu penurunan dengan membutuhkan waktu selama 280 hari dengan besar penurunan sebesar 0,812 m, persentase reduksi waktu penurunan sebesar 91,29 %. Dalam hal tekanan air pori, model perbaikan tanah dengan konfigurasi *preloading* dan PVD dengan spasi 1,5 m serta kedalaman 4m memiliki nilai tekanan air pori berlebih 16,056 KPa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Han, J. (2015). *Principles and Practices of Ground Improvement*. Hoboken: Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Li, B., & Wang, X. (2018). Analysis of influence of different pressure and different depth of pvd on soft foundation treatment. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* (p. 012032). IOP.
- [3] Chen, J., Shen, S.-L., Yin, Z.-Y., Xu, Y.-S., & Horpibulsuk, S. (2015). Evaluation of Effective Depth of PVD Improvement in Soft Clay Deposit: A Field Case Study. *Marine Georesources & Geotechnology*, 1-11.
- [4] Chai, J., & Rondonuwu, S. G. (2015). Surcharge loading rate for minimizing lateral displacement of PVD improved deposit with vacuum pressure. *Elsevier: Geotextiles and Geomembranes*, 43(6), 558-566.
- [5] Rezania, M., Bagheri, M., Nezhad, M. M., & Sivasithamparam, N. (2017). Creep analysis of an earth embankment on soft soil deposit with and without PVD improvement. *Elsevier: Geotextiles and Geomembranes*, 45(5), 537-547.
- [6] El Kamash, W., Hafez, K., Zakaria, M., & Moubarak, A. (2021). Improvement of Soft Organic Clay Soil Using Vertical Drains. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25, 429-441.
- [7] Sagala, A. I. (2021). Analysis of Soil Subscription on Soil Lack Combination of PVD and PHD Analytical and Numerical Methods using 3D PLAXIS in STA 103+550 Construction of High Click Toll Road Range, Stage 1. *International Journal of Social Service and Research*, 2(1), 75-82.
- [8] Das, B. M. (2014). *Principles of Foundation Engineering Eight Edition*. Boston: Cengage Learning.
- [9] Roesyanto, Iskandar, R., Silalahi, S. A., & Fadliansyah. (2018). Soil settlement analysis in soft soil by using *preloading* system and prefabricated vertical draining runway of Kualanamu Airport. *IOP Cof. Series: Materials Science and Engineering 309* (p. 012024). IOP.
- [10] Ibrahim, M. A., & Yusof, M. F. (2023). Performance of Soft Soil Improved Prefabricated Vertical Drain (PVD) for Road Construction in Pontian, Johor. *Civil Engineering and Built Environment*, 4(1), 040-050.
- [11] Schanz, T. (1998). *Zur Modellierung des Mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien*. Jerman: Habilitation, Stuttgart Universität.
- [12] Bentley. (2020). *Material Models Manual*. Bentley.
- [13] Look, B. (2017). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. London: Taylor & Francis Group.
- [14] Ameratunga, J., Sivakugan, N., & Das, B. M. (2016). *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. New York: Springer.
- [15] Erhunmwun, I. D., & Ikponmwosa, U. B. (2017). Review on Finite Element Method. *J. Appl. Sci. Environ. Manage*, 21(5), 999-1002.
- [16] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. I., & Zhu, J. Z. (2005). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamental*. Barcelona: Elsevier.
- [17] Di Carluccio, G. (2021). *Doctor of Philosophy Thesis: Dynamic Large Deformation Modelling of Soils Including Static Liquefaction*. Barcelona: Universitat Politècnica De Catalunya.
- [18] Akan, R., & Seri, S. (2021). Investigation of the Consolidation Behavior of Soft Soil Improved with Vertical Drains by Finite Element Method. *International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS)*, 13(3), 93-105.