

Analisis Perbaikan Tanah Lunak Metode *Preloading* Kombinasi *Prefabricated Vertical Drain* dengan Variasi Spasi Pemasangan PVD (Studi Kasus: Jalan Tol Indralaya – Prabumulih, Sumatera Selatan)

Received 30th May 2022
Accepted 20th June 2022
Published 31th July 2022

Open Access

Citra Puspita Lestari^{a*}, Erdina Tyagita Utami^a, Julita Hayati^a, Syahidus Syuhada^a

^a Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Sumatera, Lampung

* Koresponden E-mail: citrapuspita1213@gmail.com

Abstract: Indonesia has many areas with soft soil textures, one of which is on the Island of Sumatera. If this area has soft soil, it will be damaged when is built a building. Improvement of soft soil properties can be obtained through several soil improvement methods one of which is by reducing pore water pressure (*preloading* and *vertical drain*). PVD spacing analysis is at spacing 0.5 m; 1 m; 1.5 m; 2 m; and 2.5 m and the installation pattern between PVDs uses a triangular pattern. The embankment analysis is carried out by calculating the gradual embankment to give the soft soil time to consolidate and solidify so that its shear strength increases. The results of calculations using analytical obtained a decrease of 1.265 m and the finite element got a decrease of 1.305 m. Analytical calculation of the time required to achieve a degree of consolidation of 90% without PVD obtained 468 days. The finite element analysis of the time required to reach the maximum degree of consolidation without PVD was obtained at 478 days. Meanwhile, by using PVD, the time required is 23 days until 36 days where the closer distance between PVD will lead to faster consolidation.

Keywords: soft soil, soil improvement, *preloading*, *prefabricated vertical drain*, degree of consolidation, settlement.

Abstrak: Indonesia memiliki banyak daerah yang bertekstur tanah lunak, salah satunya Pulau Sumatera. Jika pada daerah ini memiliki tanah lunak akan mengalami kerusakan ketika dibangun suatu bangunan. Perbaikan sifat tanah lunak bisa diperoleh melalui beberapa metode perbaikan tanah salah satunya dengan melakukan pengurangan tekanan air pori (*preloading* dan *vertical drain*). Analisis spasi PVD berada pada spasi 0,5 m; 1 m; 1,5 m; 2 m; dan 2,5 m serta pola pemasangan antar PVD menggunakan pola segitiga. Analisis timbunan dilakukan dengan perhitungan timbunan bertahap dengan tujuan agar memberikan waktu tanah lunak berkonsolidasi dan memadat sehingga kuat gesernya bertambah. Hasil perhitungan menggunakan analisis didapatkan penurunan sebesar 1,265 m dan elemen hingga mendapatkan penurunan sebesar 1,305 m. Perhitungan analisis waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi 90% tanpa PVD didapat 468 hari. Analisis dengan elemen hingga waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi maksimum tanpa PVD didapat sebesar 478 hari. Sedangkan dengan menggunakan PVD waktu yang dibutuhkan selama 23 hari hingga 36 hari dimana semakin rapat PVD akan menyebabkan semakin cepat waktu penurunan.

Kata kunci: tanah lunak, perbaikan tanah, *preloading*, *prefabricated vertical drain*, derajat konsolidasi, penurunan.

Pendahuluan

Indonesia memiliki banyak daerah yang bertekstur tanah lunak, salah satunya di daerah Pulau Sumatera. Kondisi tanah yang ada pada daerah ini jika memiliki sifat-sifat yang tidak diharapkan dan begitu lunak akan mengalami penurunan dan mengalami kerusakan ketika di bangun suatu bangunan [1]. Untuk membenahi sifat tanah lunak bisa diperoleh melalui beberapa metode perbaikan tanah yaitu melakukan

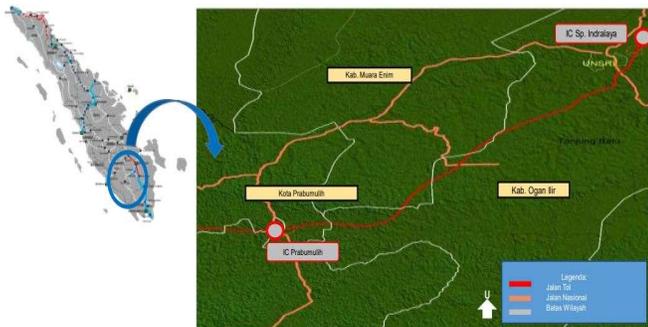
pemadatan pada tanah, penyesuaian gradasi, pengurangan tekanan air pori (*preloading* dan *vertical drain*). Pemadatan timbunan tanah sebagai pemberian beban disetiap lapisan dengan kepadatan dan ketebalan yang sudah direncanakan, hingga menyebabkan tanah termampatkan sebelum konstruksi didirikan disebut dengan *Preloading* atau pemberian beban awal. Tetapi, metode ini terlihat kurang efektif dikarenakan memerlukan waktu yang sedikit lama hingga mencapai konsolidasi. Satu diantara cara yang ada

dalam menghadapi masalah ini ialah digunakannya sistem *preloading* dikombinasikan dengan *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*.

Studi kasus penelitian perbaikan tanah lunak ini dilaksanakan di Proyek Pembangunan Jalan Tol Ruas Simpang Indralaya – Muara Enim Seksi Simpang Indralaya Prabumulih Sumatera Selatan. Pada saat dilakukannya *soil investigation* (analisis penyelidikan tanah) dan uji laboratorium pada kawasan proyek pembangunan jalan tol ini, didapatkan kawasan ini memiliki jenis tanah dasar berupa tanah lunak. Jika dilihat karakteristik tanah yang sudah dijelaskan, dilokasi proyek jalan tol ini diperlukannya perlakuan perbaikan tanah lunak. Metode perbaikan yang dipilih adalah *preloading* dikombinasikan dengan *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* yang umum digunakan dalam mengatasi penurunan konsolidasi pada tanah lunak. Dalam pemasangan PVD, jarak antar PVD perlu dikaji lebih dalam terkait pengaruh terhadap penurunan dan waktu konsolidasi.

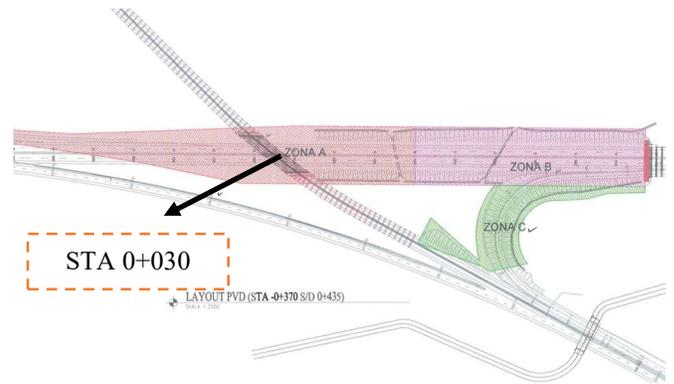
Metode

Lokasi analisis Tugas Akhir ini dilakukan di lokasi proyek pembangunan jalan tol ruas simpang Indralaya-Muara Enim seksi simpang Indralaya-Prabumulih terletak di Indralaya, Kabupaten Ogan Ilir, Kabupaten Muara Enim, Kota Prabumulih, Provinsi Sumatera Selatan. Peta lokasi bisa dilihat pada Gambar 1.



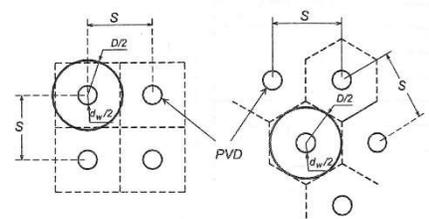
Gambar 1. Lokasi Studi Kasus

Berikut merupakan *layout* letak titik tinjau pada analisis ini berada pada STA 0+030. Gambar 2 zona A dan zona B menunjukkan arah lokasi Indralaya-Prabumulih.



Gambar 2. Layout Proyek

Penentuan jenis perbaikan tanah menggunakan acuan SNI 8460-2017 tentang Persyaratan Perencanaan Geoteknik [2]. Penelitian ini metode perbaikan tanah lunak yang digunakan yaitu dengan metode *preloading* kombinasi *prefabricated vertical drain (PVD)*. Pemasangan *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* ada 2 jenis pola, yaitu pola pemasangan segiempat dan pola pemasangan segitiga. Konfigurasi pemasangan PVD dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Pola Pemasangan Drainase Vertikal [3]

Daerah cakupan pola segiempat dapat dihitung dengan persamaan

$$de = 1,13 \times S$$

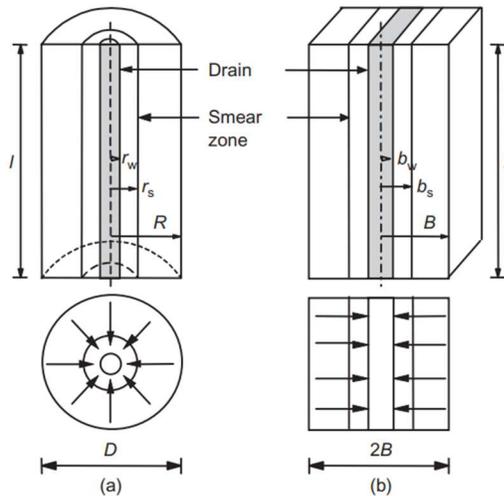
Sedangkan untuk cakupan pola segitiga dapat dihitung dengan persamaan

$$de = 1,05 \times S$$

Pola pemasangan segitiga memiliki cakupan drainase air yang lebih efektif. Dari pengalaman dilapangan, pemasangan PVD dengan pola segitiga sama sisi menghasilkan penurunan yang lebih seragam, sehingga banyak digunakan. Pada penelitian ini menggunakan pola pemasangan segitiga serta variasi spasi pemasangan PVD yang digunakan yaitu 0,5m; 1m; 1,5m; 2m; dan 2,5m. Analisis pada penelitian ini menggunakan perhitungan metode analitis dan metode elemen hingga (Plaxis 2D versi 20). Perlu dilakukan penyesuaian kondisi *axysimetric* ke kondisi *plain strain* dimana penyesuaian dengan kondisi yang sebenarnya dilapangan, penyesuaian geometri dan permeabilitas. Pemodelan konversi ekuivalen *axysimetric* ke kondisi *plane*

strain, menurut Indraratna (1997) dengan mengabaikan efek smear. Pengaruh smear effect diabaikan dikarenakan untuk meminimalisir permeabilitas tanah disekitar PVD akibat pemasangan PVD oleh mandrel. Rasio ekuivalen permeabilitas plane strain terhadap permeabilitas axisymmetric menjadi:

$$\frac{k_{h,ps}}{k_{h,ax}} = \frac{0,67 (n - 1)^2}{n^2 [\ln(n) - 0,75]}$$



Gambar 4. Konversi ke Kondisi Plane Strain [4]

Data yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan data penyelidikan lapangan dan hasil uji laboratorium BH 3 pada STA 0+030. Data awal yang diperoleh dari pengujian di lapangan didapatkan parameter tanah asli dan N-SPT dengan kedalaman 40 m yang kemudian dapat disimpulkan kedalaman perbaikan tanah yang diperbaiki mencapai 22 meter. Data parameter tanah yang didapatkan berupa permeabilitas (k), specific gravity (Gs), gradasi tanah, koefisien konsolidasi (Cv), indeks kompresi (Cc), dan tekanan prakonsolidasi (Pc'). Analisis menggunakan metode analitis hasil besar penurunan tanah yang telah diperoleh kemudian dilakukan perhitungan lama waktu konsolidasi hingga mencapai 90%. Analisis menggunakan metode elemen hingga pada tahapan konsolidasi menggunakan minimum tekanan eksese air pori untuk mendapatkan hasil sampai penurunannya mendekati konstan atau konsolidasi sempurna. Analisis hasil tekanan eksese air pori menggunakan metode elemen hingga (Plaxis 2D versi 20).

Tahapan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5 pemodelan yang akan direncanakan adalah pemodelan tanpa PVD dan pemodelan dengan PVD dimana variasi antar spasi PVD 0,5 m; 1 m; 1,5 m; 2 m; dan 2,5 m. Variasi jarak pemasangan PVD dilakukan untuk mendapatkan jarak

pemasangan PVD yang efisien. Output perhitungan untuk analisis pada perbandingan besar nilai penurunan tanah lunak ini dilakukan dengan membandingkan hasil penurunan dan waktu antara perbaikan tanah tanpa menggunakan PVD dan menggunakan PVD yang memiliki variasi spasi berbeda dengan program elemen hingga. Analisis ini juga akan menghasilkan lama waktu penurunan saat perbaikan dan besarnya tekanan eksese air pori.



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

Parameter pada analisis ini dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 1. Rekapitulasi Data Tanah

Nama	Nilai Parameter			Satuan
Kedalaman	1,25 - 8	8 - 14,7	14,7 - 22,15	m
Deskripsi Tanah	Lempung, lanauan	Lanau, pasiran	Pasir halus, lanauan	-
Konsistensi	Sedang	Sedang	Lepas	-
N-SPT	3	4	6	-
Cu	20	26,67	-	kN/m ²
γ _w	9,81			kN/m ³
γ _{sat}	17,5	19	14,8	kN/m ³
γ _{unsat}	14,84	16,84	11,39	kN/m ³
Angka pori	0,975	0,617	-	e _o
E	-	-	10000	kN/m ²
C _e	1,21	1,21	-	-
C _s	0,242	0,242	-	-
C _v	0,0821	0,0821	-	m ² /hari

Tabel 2. Parameter Tanah Timbunan untuk Pemodelan MEH

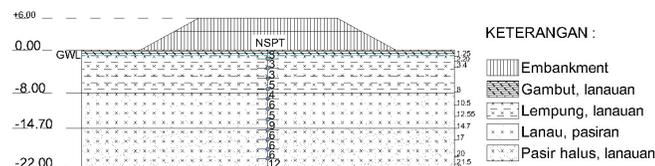
Parameter	Nama	Timbunan	Satuan
Ketebalan	-	+7,2	m
Material	Model	Mohr-Coulomb	-
Tipe Drainase	Tipe	Drained	-
Soil unit weight	γ_{sat}	18,5	kN/m ³
	γ_{unsat}	18,5	kN/m ³
Poisson's ratio	ν'	0,3	-
Effective cohesion	c'	10	kPa
Effective friction angle		35	o
Void Ratio	Einit	0,5	
Effective young's modulus	E'	13000	kN/m ²
Horizontal permeability	kx	0,3145	m/day
Vertical permeability	ky	0,3145	m/day

Tabel 3. Parameter Lapisan Tanah Dasar untuk Pemodelan MEH

Parameter		Lapisan Tanah Dasar			Satuan
		-6,75	-6,7	-7,3	
Ketebalan	-	-6,75	-6,7	-7,3	m
Material	Model	Soft Soil	Soft Soil	Mohr-Coulomb	-
		Lempung lanauan	Lanau kepasiran	Pasir kelanauan	
Tipe Drainase	Tipe	Undrained (A)	Undrained (A)	Drained	-
Soil unit weight	γ_{sat}	17,5	19	14,8	kN/m ³
	γ_{unsat}	14,835	16,84	11,39	kN/m ³
Poisson's ratio	ν'	-	-	0,3	-
Effective cohesion	c'	10	10	10	kPa
Effective friction angle	ϕ	30	30	35	o
Friction dilatansi	ψ	-	-	-	o
Young's modulus	E	-	-	10000	kN/m ²
Angka Pori	E _{mit}	0,975	0,617	-	-
Indeks Kompresi	Cc	1,21	1,21	-	-
Indeks Pemuai	Cs	0,242	0,242	-	-
Indeks kompresi tanah	λ^*	0,2664	0,3253	-	-
Indeks muai termodifikasi	k^*	0,1066	0,1301	-	-
Permeabilitas	kh/kv	0,2074	0,2074	0,1296	m/day

Hasil dan Diskusi

Berdasarkan hasil analisis, diperoleh hasil penelitian sebagai berikut:

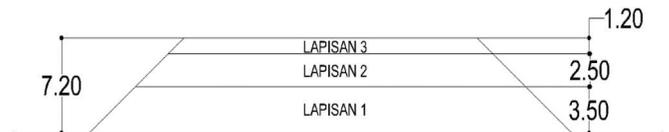


Gambar 6. Stratifikasi Tanah

Stratifikasi tanah adalah proses penyelidikan tanah upaya untuk mengetahui bentuk, jenis, ketebalan, dan kedalaman lapisan tanah yang berada di bawah permukaan tanah dasar. Dari Gambar 10 lapisan tanah dasar dengan kedalaman -1,25 m merupakan lapisan tanah gambut. Lapisan tanah di bawah tanah gambut memiliki kedalaman -6,75 m lempung lanauan, -6,7 m lanau pasiran, -7,3 m pasir halus lanauan. Pada tanah gambut dilakukan soil replacement.

Timbunan Awal

Pada penentuan tinggi timbunan dapat dihitung berdasarkan beban yang ada diatas tanah dasar berupa tinggi tanah timbunan, beban perkerasan, dan beban lalu lintas. Tinggi timbunan total yang diperoleh yaitu sebesar 7,2 m timbunan tersebut tidak langsung ditimbun diatas tanah dasar, tetapi ditimbun dengan timbunan bertahap guna menunggu kenaikan kuat geser tanah pondasi dibawah timbunannya. Penimbunan dilakukan secara bertahap dengan tujuan agar memberikan waktu tanah lunak berkonsolidasi dan memadat sehingga kuat gesernya bertambah. Pada tinggi timbunan kritis (Hcr) yang aman atau masih mampu diterima oleh tanah.



Gambar 7. Preloading secara Bertahap

Penurunan dan Waktu

Pada perhitungan penurunan dilakukan analisis menggunakan data yang sudah di dapatkan berdasarkan data laboratorim dan juga menggunakan korelasi parameter-parameter yang dibutuhkan pada perhitungan. Besarnya penurunan dihitung oleh beban preloading yang diberikan. Perhitungan penurunan pada penelitian kali ini yaitu menghitung besar penurunan konsolidasi primer dan besar penurunan elastik.

Tabel 4. Nilai Penurunan Konsolidasi Primer

Lapisan	Kedalaman (m)		h (m)	P'o (kN/m ²)	Ap (kN/m ²)	cs	eo	Sc (m)	
	Atas	Bawah							
1	1,25	8	6,75	49,079	130,470	0,242	0,975	0,465	
2	8	14,7	6,7	105,82	119,108	0,242	0,617	0,328	
Total Penurunan primer setelah diberikan beban timbunan									0,794

Tabel 5. Nilai Penurunan Elastik

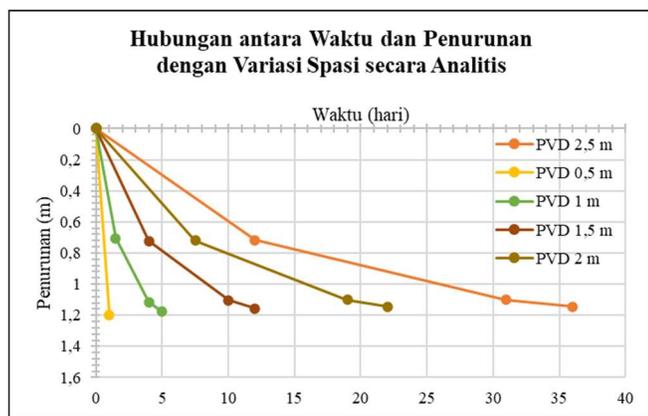
Lapisan	h (m)	Ap (kN/m ²)	B (m)	m	Poisson Ratio (μs)	E (kN/m ²)	Ip	Sc (m)	
									1
2	8-14,7	119,108	24	1,042	0,3	6000	0,396	0,172	
3	14,7-22	102,633	24	1,042	0,25	10000	0,396	0,091	
Total Penurunan elastic setelah diberikan beban timbunan									0,471

Dalam perhitungan analitis didapatkan hasil penurunan total sebesar 1,265 meter. Pada tahap ini menganalisis waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi 90%, dilakukan perhitungan dengan menggunakan metode konsolidasi 1D Terzaghi. Adapun hasil analisis waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi 90 %

preloading tanpa menggunakan PVD dapat dilihat pada Tabel 3. Analisis waktu konsolidasi yang dibutuhkan untuk spasi PVD 0,5 m; 1 m; 1,5 m; 2 m; dan 2,5 m, dapat dilihat pada Gambar 9.

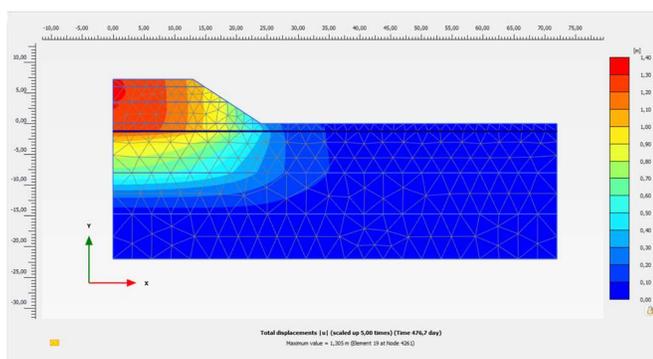
Tabel 6. Analisis Waktu Konsolidasi *Preloading* tanpa PVD

t (hari)	Cv (m ² /hari)	Tv	Uv	Penurunan (m)
1	0,082	0,002	0,048	0,061
150	0,082	0,272	0,584	0,738
200	0,082	0,363	0,667	0,844
250	0,082	0,454	0,734	0,929
300	0,082	0,544	0,788	0,997
350	0,082	0,635	0,831	1,052
400	0,082	0,726	0,865	1,095
450	0,082	0,817	0,892	1,128
468	0,082	0,849	0,900	1,138



Gambar 8. Grafik Waktu dan Penurunan pada Variasi Spasi secara Analitis

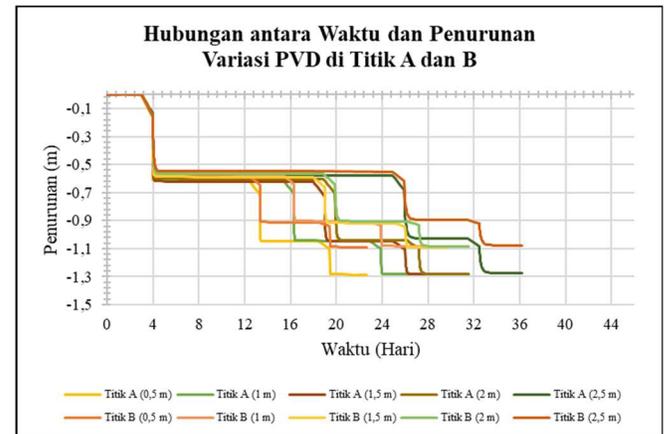
Berdasarkan analisis menggunakan program elemen hingga 2D untuk perbaikan tanah *preloading* tanpa adanya *prefabricated vertical drain*, besaran penurunan yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Total Displacement *Preloading* tanpa PVD secara MEH

Penurunan yang dihasilkan menggunakan program elemen hingga 2D yang diakibatkan oleh beban *preloading* memiliki nilai maksimum penurunan sebesar 1,305 meter dan waktu

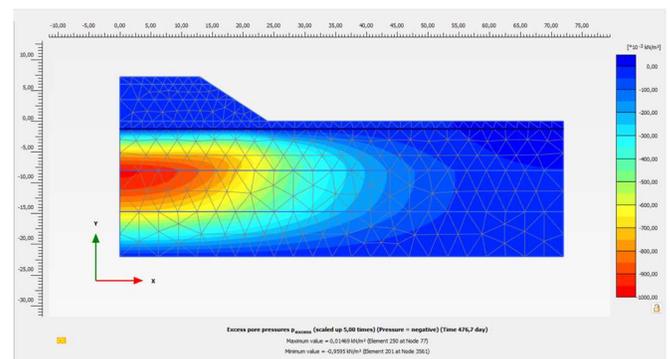
yang dibutuhkan untuk mencapai konsolidasi maksimum selama 477 hari. Rekapitulasi hasil dari waktu konsolidasi terhadap penurunan analisis mencapai *minimum excess pore pressure* pada pemasangan PVD pola segitiga secara metode elemen hingga dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Grafik antara Waktu dan Penurunan secara MEH

Tekanan Ekses Air Pori pada Elemen Hingga

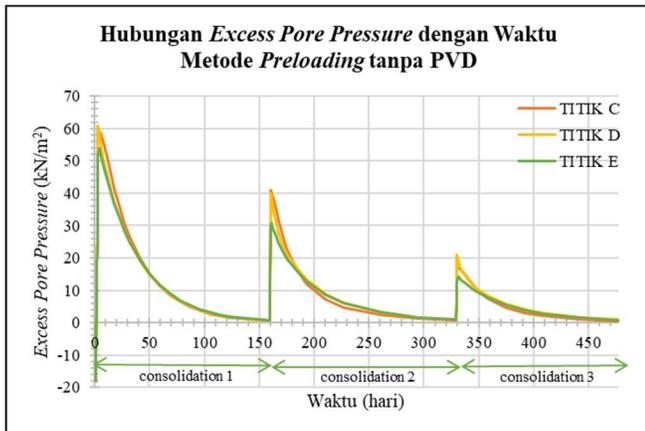
Adanya penambahan beban berupa beban timbunan yang diterima oleh air akan mengalami tekanan air pori. Pada tahapan konsolidasi, air akan keluar dari masa tanah yang akan menyebabkan tegangan air pori menjadi berkurang. Tekanan air yang mengalami pori tanah meningkat pada awalnya, namun seiring waktu, air akan berpindah dan tanah menjadi padat itu disebut proses *surcharging*.



Gambar 11. Hasil Tekanan Ekses Air Pori *Preloading* tanpa PVD

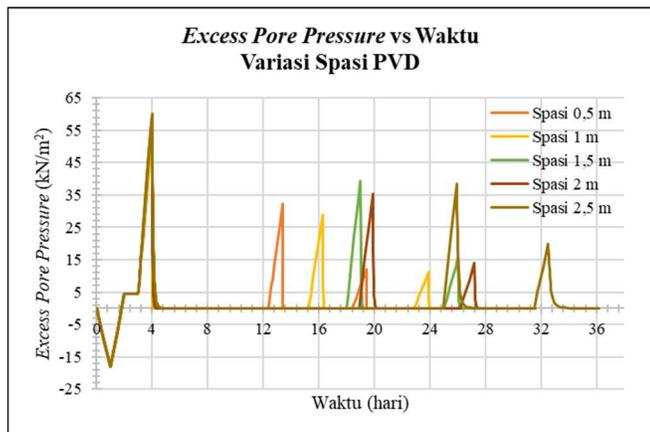
Nilai tekanan ekses air pori tanpa perbaikan pada tahap konsolidasi akhir didapat nilai *maximum* sebesar 0,001469 kN/m² dan nilai *minimum* didapat sebesar -0,9595 kN/m². Pada Gambar 11 dapat dilihat grafik hubungan tekanan air pori dengan waktu metode *preloading* tanpa *prefabricated vertical drain*. pada titik C nilai *minimum* sebesar -18,097 kN/m² dan nilai *maximum* sebesar 59,049 kN/m². Pada titik

D nilai minimum didapat sebesar $-18,127 \text{ kN/m}^2$ dan nilai maksimum didapat sebesar $61,019 \text{ kN/m}^2$. Pada titik E nilai minimum didapat sebesar $-18,110 \text{ kN/m}^2$ dan nilai maksimum didapat sebesar $53,751 \text{ kN/m}^2$.



Gambar 12. Grafik Tekanan Ekses Air Pori dengan Waktu tanpa PVD

Pada titik tinjau D berada pada kedalaman 11,5 meter di lapisan ketiga lanau kepasiran. Gambar 14 dapat dilihat spasi PVD sangat mempengaruhi nilai tekanan air pori, tekanan air pori terbesar dapat dilihat terjadi ketika spasi pemasangan antar PVD 2,5. Dapat disimpulkan bahwa semakin jauh spasi antar pemasangan PVD, maka semakin lebar spasi partikel tanah yang terdapat diantara PVD, maka tekanan air pori akan semakin besar. Hal ini disebabkan oleh air yang terdesak akibat beban timbunan akan membutuhkan spasi yang jauh dan waktu yang lebih lama untuk mencapai PVD.



Gambar 13. Tekanan Ekses Air Pori Maksimum setiap Spasi dititik Tinjau D

Kesimpulan

Berdasarkan analisa data yang telah dilakukan menggunakan program elemen hingga dan beberapa analisis lainnya dapat disimpulkan bahwa:

1. Proses pembebanan awal atau *preloading* yang diberikan sebesar $+7,2 \text{ m}$ pada tanah menyebabkan terjadinya penurunan $1,265 \text{ m}$ menggunakan metode analitis sedangkan menggunakan metode elemen hingga mendapatkan penurunan sebesar $1,305 \text{ meter}$. Besar penurunan yang terjadi setelah perbaikan dengan PVD dengan spasi PVD bervariasi yaitu $0,5 \text{ m}$ sebesar $1,309 \text{ m}$; 1 m sebesar $1,308 \text{ m}$; $1,5 \text{ m}$ sebesar $1,308 \text{ m}$; 2 m sebesar $1,308$; dan $2,5 \text{ m}$ sebesar $1,303$. Penurunan yang terjadi pada tanah dasar tidak jauh berbeda untuk kondisi dengan dan tanpa PVD.
2. Waktu konsolidasi yang didapat tanpa perbaikan *prefabricated vertical drain* dihitung secara analitis adalah 468 hari dan secara elemen hingga mendapatkan waktu konsolidasi sebesar 477 hari . Setelah perbaikan dengan metode elemen hingga didapat pada spasi PVD bervariasi yaitu $0,5 \text{ m}$ sebesar 23 hari ; 1 m sebesar 28 hari ; $1,5 \text{ m}$ 30 hari ; 2 m sebesar 32 hari ; dan $2,5 \text{ m}$ sebesar 36 hari . Pemasangan PVD menyebabkan waktu yang dibutuhkan untuk konsolidasi dapat direduksi.
3. Nilai maksimum tekanan ekses air pori tanpa perbaikan didapat $61,019 \text{ kN/m}^2$. Setelah perbaikan dengan variasi spasi PVD didapat nilai maksimum $0,5 \text{ m}$ sebesar $53,480 \text{ kN/m}^2$; 1 m sebesar $55,035 \text{ kN/m}^2$; $1,5 \text{ m}$ sebesar $57,735 \text{ kN/m}^2$; 2 m sebesar $59,976 \text{ kN/m}^2$; $2,5 \text{ m}$ sebesar $60,038 \text{ kN/m}^2$. Nilai maksimum akses air pori didapat pada saat tahapan timbunan pertama dikarenakan tinggi timbunan pada lapisan pertama lebih besar daripada lapisan kedua dan ketiga.

Konflik Kepentingan

Tidak ada konflik kepentingan dalam penelitian ini.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih disampaikan kepada semua pihak yang berperan dalam membantu penelitian ini.

1. Dr. Rahayu Sulistyorini, S.T., M.T., sebagai ketua Jurusan Infrastruktur dan Kewilayahan Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan.
2. Ir. Titi Liliani Soedirjo, M.Sc., sebagai ketua program studi Teknik Sipil Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan.
3. Erdina Tyagita Utami, S.T., M.T., selaku pembimbing I yang telah memberikan bimbingan hingga selesainya Laporan Tugas Akhir ini.

4. Julita Hayati, S.T., M.T., selaku pembimbing II yang telah memberikan bimbingan hingga selesainya Laporan Tugas Akhir ini.
5. Syahidus Syuhada, S.T., M.T., selaku penguji yang telah memberikan kritik dan saran hingga selesainya laporan Tugas Akhir ini.

Refrensi

- [1] Bowles, J.E., Sifat-sifat Fisis dan Geoteknik Tanah, Jakarta: Penerbit Erlangga, 1991.
- [2] FHWA, Dynamic Compaction for Highway Construction, Vol 1 : Design and Construction Guidelines, Vol 1 ed., Report FHWA/RD-86/133, 1986.
- [3] J. Han, Principles and practice of ground improvement, 2015 ed., New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 1964.
- [4] Bowles, J.E., Sifat-sifat Fisis dan Geoteknik Tanah (Mekanika Tanah II), Jakarta: Erlangga, 1991.
- [5] Das, B. M., Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik, Jakarta: Erlangga, 1994.
- [6] SNI 8460:2017, Persyaratan Perancangan Geoteknik, Indonesia: Badan Standarisasi Nasional, 2017.
- [7] H. C. Hardiyatmo, Perbaikan Tanah, 1 ed., Galih, Ed., Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2020.
- [8] K. v. Terzaghi, Mekanika Tanah berdasarkan pada sifat-sifat dasar fisik tanah, Vienna: Franz Deuticke, 1925.
- [9] Indrarnatna B. and Redana I. W, "Closure: Plane strain modeling of smear effects associated with vertical drains," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. ASCE, no. 125, pp. 96-99, 1999.
- [10] M. Y. H. I. N. Ohoimas, "Analisis Konsolidasi dengan Menggunakan Metode Preloading dan Vertical Drain pada Areal Reklamasi Proyek Pengembangan Pelabuhan Belawan Tahap II," *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, vol. 1, no. 1, pp. 1-11, 2015.
- [11] B. P. Statistik, "Pertumbuhan Ekonomi Indonesia Triwulan I-2019," *No. 39/05/Th.XXII*, p. 38, 06 Mei 2019.
- [12] L. P. Siahaan, ALTERNATIF PERBAIKAN TANAH DASAR DAN PERKUATAN TIMBUNAN PADA JALAN TOL PALEMBANG – INDRALAYA (STA 8+750 s/d STA 10+750), Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [13] R. Nur, Analisis Perbaikan Tanah Lunak Metode Preloading dan Metode Kombinasi Preloading dan Prefabricated Vertical Drainage (PVD) dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga Tiga Dimensi Studi Kasus Pembangunan Jalan Tol di Sumatera, Lampung Selatan: ITERA, 2020.