

ANALISIS PERBAIKAN TANAH LUNAK MENGGUNAKAN METODE *PRELOADING*, PVD DAN PHD PADA JALAN KELAS I, SUMATERA BARAT

Danang Setiya Raharja¹ dan Muhammad Hilmi Hibatullah^{2*}

^{1,2} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Wijaya Kusuma Surabaya, Jalan Dukuh Kupang XXV No. 54, Kota Surabaya. Jawa Timur, Indonesia, 60225

E-mail: raharja.ds@uwks.ac.id^{1*}, hilmimuhammad344@gmail.com²

(*) Penulis Korespondensi

(Artikel dikirim : 07 Februari 2025, Direvisi: 17 April 2025, Diterima: 26 April 2025)

DOI: <http://dx.doi.org/10.30742/axial.v13i1.4260>

ABSTRAK: Tanah lunak merupakan tanah yang kohesif yang terdiri dari tanah yang sebagian besar terdiri dari butir-butir yang sangat kecil seperti lempung dan lanau. Lapisan tanah lunak mempunyai sifat gaya geser yang rendah, kemampatan yang tinggi, koefisien permeabilitas yang rendah, karakteristik daya dukung relatif rendah dan pemampatannya relatif besar serta lama. Provinsi Sumatera Barat, Padang merupakan tanah yang memiliki sifat tanah lunak yang terdiri dari tanah gambut dan tanah lempung. Penelitian ini bertujuan memperbaiki tanah lunak untuk jalan kelas I menggunakan metode *Preloading* kombinasi *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* dan *Prefabricated Horizontal Drain (PHD)* dengan berbagai variasi tinggi timbunan. Hkritis timbunan yang diperhitungkan dengan ketinggian sebesar 3,807 m. Perhitungan *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* dengan kedalaman tanah yang digunakan 12 m dengan tinggi timbunan 3 m, tinggi *Preloading* 5.2 m dan beban jalan 35.44 kN/m³. Hasil Perhitungan Matematis untuk mencapai derajat konsolidasi 90% tanpa penggunaan PVD lama waktu 1414 hari dan besar penurunan 0.479 m, penggunaan PVD dengan jarak 1.8 m didapat lama waktu 57 hari dan besar penurunan 0.482 m. Perencanaan PHD setiap 1 ujung PVD mengeluarkan air seluas 2.806 m² dengan panjang lajur maksimum PHD 75 m menghasilkan estimasi debit aliran air horizontal sebesar 0.00007584 m³/s.

KATA KUNCI : *Jalan Kelas I, Preloading, PVD, PHD, Tanah Lunak*

1. PENDAHULUAN

Menurut BPS (2024) peningkatan transportasi darat di Provinsi Sumatera Barat, Kota Padang sebesar 303.369. Menurut (Winarta dkk., 2018) Kota Padang merupakan ibukota provinsi Sumatra Barat, yang merupakan pusat segala aktivitas perekonomian. Dampaknya adalah lalu lintas yang terdapat di Kota Padang cukup padat, sehingga sering terjadi kemacetan di beberapa ruas jalan tertentu. Hal tersebut terjadi karena banyaknya kendaraan yang melalui jalur tersebut yang tidak diimbangi dengan kapasitas jalan. Pembangunan jalan di Provinsi Sumatera Barat, Kota Padang termasuk salah satu langka nyata program pemerintahan dalam meningkatkan ekonomi dan kemajuan suatu wilayah. Jalan adalah prasarana transportasi darat yang meliputi segala bagian jalan, termasuk bangunan pelengkap dan perlengkapannya yang diperuntukkan bagi lalu lintas, yang berada pada permukaan tanah, di atas permukaan tanah, di bawah permukaan tanah dan/atau air, serta di atas permukaan air, kecuali jalan kereta api, jalan lori, dan jalan kabel (Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 38 Tahun, 2024). Pembangunan infrastruktur di Sumatera Barat, Padang perlu diperhatikan pada proses

perencanaan jalan terutama untuk jalan kelas I pada kondisi tanah tersebut. Menurut Das (1995) tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan. Menurut Nena, dkk. (2022) tanah mempunyai peran penting pada suatu pekerjaan konstruksi sebab semua konstruksi melekat pada tanah serta ditopang oleh tanah. Dampak dari akibat tidak memperhatikan kondisi tanah pada pembangunan infrastruktur di Sumatera Barat, Padang salah satunya adalah penurunan tanah berlebih, kondisi infrastruktur tidak seimbang dan kerusakan infrastruktur. Menurut (ATLAS Sebaran Tanah Lunak Indonesia, 2019) sebaran tanah lunak di daerah Provinsi Sumatera Barat, Kota Padang merupakan tanah lunak yang terdiri dari tanah gambut dan tanah lempung. Tanah lempung lunak ini mempunyai karakteristik daya dukung relatif rendah dan pemampatannya relatif besar serta lama. dalam hal ini perlu dilakukan perbaikan tanah lunak agar daya dukung kuat tanah pada proses pembangunan infrastruktur. Tujuan perbaikan tanah adalah untuk mendapatkan nilai daya dukung atau stabilitas tanah yang diinginkan. Menurut Darwis (2017)

ANALISIS PERBAIKAN TANAH LUNAK MENGGUNAKAN METODE *PRELOADING*, PVD DAN PHD UNTUK TIMBUNAN PADA JALAN KELAS I, SUMATERA BARAT

(Danang Setiya Raharja, Muhammad Hilmi Hibatullah)

perbaikan tanah dengan metode konsolidasi secara umum dapat diartikan sebagai upaya yang dilakukan dengan menempatkan beban statis yang bersifat sementara (*Preloading*) di atas lapisan tanah yang akan diperbaiki, sedangkan menurut (Susiazti dkk., t.t.), *Preloading* adalah metode penimbunan beban yang besarnya sama dengan besar beban konstruksi yang akan dilaksanakan. Proses ini bertujuan untuk memperbaiki tanah yang dengan mengompres tanah, sehingga dapat meningkatkan kekakuan dan kekuatan geser, oleh karena itu metode ini hampir tidak pernah diaplikasikan sendiri, melainkan dikombinasi dengan metode lainnya, seperti sistem drainase air tanah (*Vertical Drain dan Horizontal Drain*).

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Skema Alur Penelitian

Skema Alur Penelitian dari analisis perbaikan tanah lunak menggunakan metode *Preloading*, PVD dan PHD untuk timbunan pada jalan kelas I. Sebelum memulai perhitungan, mulai dengan studi literatur dan pengumpulan data, seperti mencari jurnal-jurnal sebagai acuan dan penguat argumen, selanjutnya pengumpulan data sekunder yang dibutuhkan seperti data parameter tanah (*borings-log*) dari lapangan yang dimana data tersebut telah di uji di laboratorium (N-SPT), dan gambar tata letak pengeboran. Pengumpulan data tersebut kemudian analisis data yang dimana data tersebut akan dibutuhkan untuk memperhitungkan penelitian ini, setelah analisis data yang mendapatkan data yang dibutuhkan untuk suatu perhitungan, dilakukannya perhitungan perencanaan menggunakan metode *Preloading* tanpa penggunaan PVD dan PHD dan menggunakan metode *Preloading* dengan kombinasi PVD dan PHD untuk tinggi timbunan. Perhitungan penggunaan PVD dan tanpa penggunaan PVD, kemudian memperhitungkan 3 (tiga) yang dimana besar dan lama waktu penurunan, daya dukung tanah untuk beban Jalan kelas I.

2.2 Hubungan Beban Jalan dan Tinggi Timbunan

Untuk menentukan rencana beban total (q_0) di atas permukaan tanah, menggunakan hubungan antara beban jalan dan tinggi timbunan, dengan persamaan yang digunakan.

$$q_0 = (\gamma_{\text{timbunan}} \times H_{\text{timbunan}}) + \text{Beban Lalu lintas} + \text{Beban Perkerasan} - \text{Masa Tanah Dipindah} \quad (1)$$

2.3 Konsolidasi Tanah

Lapisan tanah jenuh air bila mana diberi penambahan beban, angka tekanan air pori akan naik secara mendadak. Pada tanah berpasir yang sangat tembus air (*permeable*), air dapat mengalir dengan cepat sehingga pengaliran air-pori ke luar sangat sebagai akibat dari kenaikan tekanan air pori dapat selesai dengan cepat. Menurut (Soedarmo dan Purnomo, 2001 di dalam Puspita & Capri, 2017) Konsolidasi tanah adalah suatu proses pengecilan volume pada tanah jenuh yang mempunyai permeabilitas yang rendah. Bilamana suatu lapisan tanah lempung diberi jenuh air yang mampu mampat (*compressible*) diberi penambahan tegangan, maka penurunan (*settlement*) akan terjadi segera (Das, 1995).

2.4 Penurunan Tanah (*Settlement*)

Menurut (Zhafirah & Amalia, t.t.) Jika lapisan tanah dibebani, maka tanah akan mengalami regangan atau penurunan (*settlement*). Regangan yang terjadi dalam tanah ini disebabkan oleh berubahnya susunan tanah maupun oleh pengurangan rongga pori/air di dalam tanah tersebut. Sebagian besar penurunan diakibatkan oleh pengurangan angka pori. Penurunan total (S_t) dari tanah berbutir halus yang jenuh adalah jumlah dari *penurunan segera* dan *penurunan konsolidasi*. Penurunan konsolidasi masih dapat dibedakan lagi menjadi penurunan akibat *konsolidasi primer* dan penurunan *konsolidasi sekunder*, dinyatakan penurunan total dengan persamaan di bawah ini.

$$S_t = S_i + S_c + S_s \quad (2)$$

Dengan,

S_t = Penurunan total

S_i = Penurunan segera

S_c = Penurunan akibat konsolidasi primer

S_s = Penurunan akibat konsolidasi sekunder

2.2.1 Penurunan Segera (S_i)

Penurunan langsung adalah penurunan yang terjadi pada pengaturan *undrained* atau ketika volume tidak bervariasi. Penurunan terjadi dengan segera sesudah beban bekerja, Menurut (Suardi dkk., 2021) Penurunan Segera (*Immediate Settlement*) terjadi seketika saat beban diletakan di atas tanah, Penurunan terjadi akibat proses penekanan udara keluar dari dalam pori tanah. Untuk kebutuhan perhitungan B1 dan B2 mengacu pada **Gambar 1**.

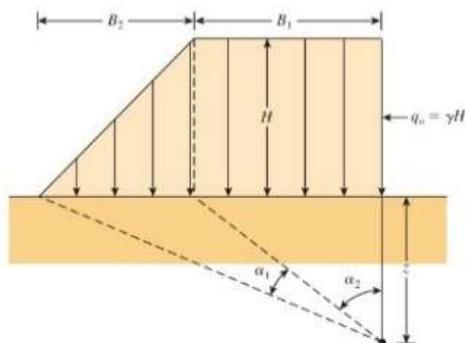
$$S_i = \frac{\Delta P}{E} \times H_{\text{tebal lapisan}} \quad (3)$$

Dimana ΔP ,

$$\Delta P = \frac{q_0}{\pi} \left[\left(\frac{B_1 + B_2}{B_2} \right) (a_1 + a_2) - \frac{B_1}{B_2} (a_2) \right] \quad (4)$$

Dengan,

- ΔP = Pertambahan tegangan (kN/m²)
- E = Modulus elastisitas (kN/m²)
- q_0 = Tegangan vertikal tanah = γH
- B_1 = Lebar atas timbunan
- B_2 = Lebar kaki timbunan
- $a_1 = \tan^{-1} \left(\frac{B_1+B_2}{z} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{B_1}{z} \right)$
- $a_2 = \tan^{-1} \left(\frac{B_1}{z} \right)$
- z = Kedalaman titik tinjau (m)



Gambar 1. Embankment loading (Das & Sivakugan, 2019)

2.2.2 Penurunan Konsolidasi Primer (Sc)

Menurut (S dkk., 2022) Penurunan yang dipengaruhi oleh kecepatan aliran air yang meninggalkan rongga pori tanah akibat adanya tambahan tekanan. Proses konsolidasi primer sangat berpengaruh oleh sifat tanah, seperti : permeabilitas, kompresibilitas, angka pori, bentuk geometri tanah termasuk tebal lapisan mampat, pengembangan arah horizontal dari zona mampat, dan batas lapisan lolos air, dimana air keluar menuju lapisan yang lolos air ini, dapat dilihat di bawah ini persamaan menggunakan normally consolidated.

$$S_c = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{p_0' + \Delta P}{p_0'} \tag{5}$$

- Dengan,
- C_c = Compression Index
- p_0' = Tekanan overburden efektif

2.5 Hkritis Timbunan

Menentukan H kritis dimana tinggi timbunan yang mampu ditopang oleh daya dukung lapisan tanah dasar. Dimana perhitungan membutuhkan nilai Su dengan cara perhitungan membutuhkan N-SPT, dengan persamaan di bawah ini.

$$H_{kritis} = \frac{q_{ijin}}{y_{timbunan}} \tag{6}$$

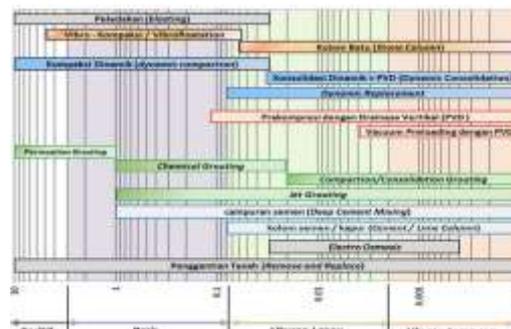
Dimana q_{ijin} sesuai (SNI 8460:2017) batas area jarang terjadinya longsor sebesar SF = 1,5.

$$q_{ijin} = \frac{qu}{SF} \tag{7}$$

- Dengan,
- qu = Kuat geser tekan bebas

2.6 Drainase Vertikal

Kecepatan konsolidasi yang rendah pada tanah-tanah lempung, dan tanah yang mudah mampat lainnya, dapat dipercepat dengan menggunakan drainase vertikal. Drainase vertikal ini memberikan lintasan air pori yang lebih pendek ke arah horizontal. Jarak drainase arah horizontal yang lebih pendek menambah kecepatan konsolidasi beberapa kali lebih cepat. Proses konsolidasi yang dipercepat ini mempercepat pula kenaikan kuat geser tanah aslinya. Koefisien konsolidasi terlalu rendah dan kondisi tanah lempung yang memiliki sifat permeabilitas rendah serta kompresibilitas yang tinggi, maka perlu adanya perbaikan tanah untuk mempercepat waktu proses konsolidasi menggunakan metode Prefabricated Vertical Drain (PVD). Perbaikan tanah perlu pemilihan tergantung pada karakteristik tanah yang di dapat dilihat pada Gambar 2.

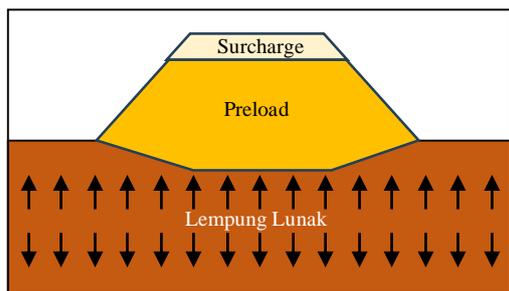


Gambar 2. Pemilihan Metode Perbaikan Tanah Berdasarkan Kriteria Tanah (SNI 8460:2017)

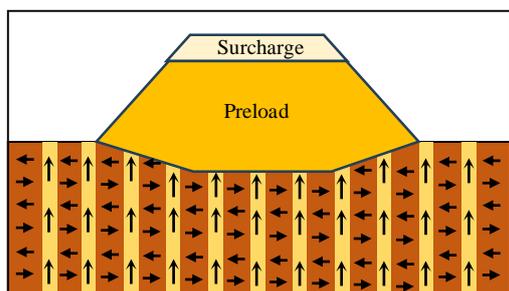
Menurut (Listyawan & Syahputra, 2020) Jalur drainase selama disipasi kelebihan air pori berada ke arah vertikal atas, sepanjang lapisan yang dapat dikompresi. Dalam lapisan permeable diletakkan di bawah lapisan terkompresi, drainase ke arah vertikal atas dan bawah, konsep tersebut berdasarkan konsolidasi Terzaghi, pada Gambar 3. merupakan jalur drainase selama konsolidasi tanpa PVD. Prefabricated Vertical Drain (PVD) merupakan salah satu produk geosintetik yang berfungsi sebagai pengaliran air (drainage). Karena rendahnya permeabilitas tanah penurunan akibat konsolidasi pada tanah lunak membutuhkan waktu yang sangat lama sehingga untuk mempercepat/memperpendek waktu proses konsolidasi PVD biasanya menggunakan kombinasi dengan Preloading, pada Gambar 4. merupakan jalur drainase selama konsolidasi menggunakan PVD. Lama waktu yang ditentukan sesuai dengan acuan yang dimana menentukan menggunakan acuan hingga derajat konsolidasi mencapai 90%.

ANALISIS PERBAIKAN TANAH LUNAK MENGGUNAKAN METODE PRELOADING, PVD DAN PHD UNTUK TIMBUNAN PADA JALAN KELAS I, SUMATERA BARAT

(Danang Setiya Raharja, Muhammad Hilmi Hibatullah)



Gambar 3. Jalur Drainase Selama Proses Konsolidasi Tanpa PVD (Kuswanda, 2015)



Gambar 4. Jalur Drainase Selama Proses Konsolidasi dengan PVD (Kuswanda, 2015)

2.4.1 Menentukan Waktu Penurunan Tanpa PVD

Lama waktunya penurunan yang diperhitungkan adalah waktu yang dibutuhkan oleh tanah untuk melakukan proses konsolidasi. Hal ini dikarenakan proses penurunan segera berlangsung sesaat setelah beban bekerja pada tanah ($t=0$). Dikarenakan arah aliran air 2 arah (*double drainage*) maka menggunakan.

$$Hdr = \frac{1}{2} \times H \quad (8)$$

Maka,

$$Uv = \frac{\sqrt{\frac{4 \times Tv}{\pi}}}{\left(1 + \left(\sqrt{\frac{4 \times Tv}{\pi}}\right)^2\right)^{0.179}} \quad (9)$$

$$S = Uv \times St \quad (10)$$

Dengan,

Hdr = Tebal lapisan tanah lunak (meter)

t = waktu konsolidasi (hari)

Tv = *Time factor*

Cv = Koefisien konsolidasi vertikal (cm^2/sec)

Uv = Derajat Konsolidasi

S = Besar Penurunan (meter)

2.4.2 Menentukan waktu Penurunan dengan Pola Segitiga dan Jarak Antar Spasi PVD

Penggunaan PVD, waktu konsolidasi tanah lempung, air pori mengalir ke arah horizontal sesuai dengan besarnya koefisien konsolidasi horizontal (C_h) sepanjang setengah dari jarak

pemasangan PVD (s). waktu konsolidasi (t) ditentukan oleh besarnya kuadrat dari setengah jarak pemasangan PVD (s) dibagi dengan koefisien konsolidasi horizontal (C_h). Dikarenakan arah aliran air 2 arah (*double drainage*) maka menggunakan.

$$Hdr = \frac{1}{2} \times H \quad (11)$$

1. Konsolidasi Horizontal (C_h) dengan menggunakan perumusan (Mochtar, 2000).

$$C_h = 2 \times C_v \quad (12)$$

2. Menghitung diameter pengaruh (D) penggunaan pola segitiga PVD, dikarenakan menggunakan pola segitiga, maka.

$$D = 1.05 \times S \quad (13)$$

$$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi} \quad (14)$$

$$n = \frac{d_w}{D} \quad (15)$$

3. Menghitung faktor jarak akibat PVD ($F(n)$) dengan menggunakan.

$$F(n) = \left(\frac{n^2}{n^2-1^2}\right) \left[\ln(n) - \frac{3}{4} - \left(\frac{1}{4n^2}\right) \right] \quad (16)$$

4. Mencari *Time Factor* (Tv).

$$Tv = \frac{t \times C_v}{(Hdr)^2} \quad (17)$$

5. Mencari Derajat Konsolidasi (Uv).

$$U_v = 2 \sqrt{\frac{Tv}{\pi}} \times 100\% \quad (18)$$

6. Faktor waktu horizontal (Th) dengan persamaan.

$$Th = \frac{C_h \times t}{D^2} \quad (19)$$

7. Derajat Konsolidasi rata – rata (λ) arah horizontal dengan persamaan.

$$\lambda = \frac{-8 \times Th}{F(n)} \quad (20)$$

$$Uh = 1 - \exp^{\lambda} \quad (21)$$

8. Derajat konsolidasi rata – rata (U) dengan persamaan.

$$U = 1 - (1 - Uv)(1 - Uh) \quad (22)$$

9. Penurunan Setelah Pemasangan PVD (S) dengan persamaan.

$$S = St \times U \quad (23)$$

2.7 Perencanaan PHD

PHD merupakan lembaran tipis memanjang terdiri dari inti yang diselubungi oleh *geotextile non woven*, yang dimana fungsi PHD digunakan untuk mengalirkan air pori dari PVD dan estimasi debit air pori yang diterima PHD, data yang dibutuhkan adalah besarnya pemampatan tanah dan waktu konsolidasi. Dengan perumusan.

$$\text{Debit} = N \times q \quad (24)$$

Dengan,

Debit = Estimasi debit minimum aliran air horizontal 1 lajur (m^3/s)

N = Jumlah titik PVD

Tabel 1. Data Tanah (*Shear Strength*)

No	Kedalaman	Deskripsi	N-SPT	γ (kN/m ³)	γ_{sat} kN/m ³	Cu kN/m ²	c' kN/m ²	ϕ' (deg)	Eu kPa	E' kPa	v
1	0 - 5	Berpasir	1	17.9	18.9	5	5	20	1250	1125	0.35
2	5 - 6	Pasir Berlanau	3	18.9	19.9	15	5	22	3750	3375	0.35
3	6 - 11.55	Pasir halus Berlumpur	2 - 4	18	19	15	3	25	3000	2660	0.33
4	11.55 - 25	Pasir	21 -26	19.9	20.9	115	3	35	24000	20960	0.31
5	25 - 26.3	Pasir	14	19.6	20.6	70	3	32	14000	12320	0.32
6	26.3 - 27.55	Pasir	7	19.6	20.6	35	3	29	7000	6206.67	0.33
7	27.55 - 31.05	Lanau berpasir	6	15.8	16.8	30	5	27	7500	6700	0.34
8	31.05-33.55	Lempung	1	15.8	16.8	5	5	20	1250	1108.33	0.33
9	33.55 - 35	Pasir	15	18.9	19.9	75	3	32	15000	13300	0.33
10	35 - 40	Pasir Berkerikil	35 - 49	19.9	20.9	200	3	38	44000	38426.67	0.31

(Sumber: Hasil analisis data borlog dan laboratorium)

Tabel 2. Data Tanah (*Consolidation Parameter*)

No	Kedalaman	Deskripsi	N-SPT	e ₀	C _c	C _s /C _r	C _v cm ² /sec	K _x / K _y m/day
1	0 - 5	Berpasir	1	2.468	0.727	0.071	2.96E-03	2.40E-06
2	5 - 6	Pasir Berlanau	3	2.468	0.727	0.071	2.96E-03	1.06E+00
3	6 - 11.55	Pasir halus Berlumpur	2 - 4	2.468	0.727	0.071	2.96E-03	7.13E+00
4	11.55 - 25	Pasir	21 -26	-	-	-	-	7.13E+00
5	25 - 26.3	Pasir	14	-	-	-	-	7.13E+00
6	26.3 - 27.55	Pasir	7	-	-	-	-	7.13E+00
7	27.55 - 31.05	Lanau berpasir	6	-	-	-	3.13E-03	1.06E+00
8	31.05-33.55	Lempung	1	-	-	-	3.13E-03	1.08E-01
9	33.55 - 35	Pasir	15	-	-	-	-	7.13E+00
10	35 - 40	Pasir Berkerikil	35 - 49	-	-	-	-	7.13E+00

(Sumber: Hasil analisis data borlog dan laboratorium)

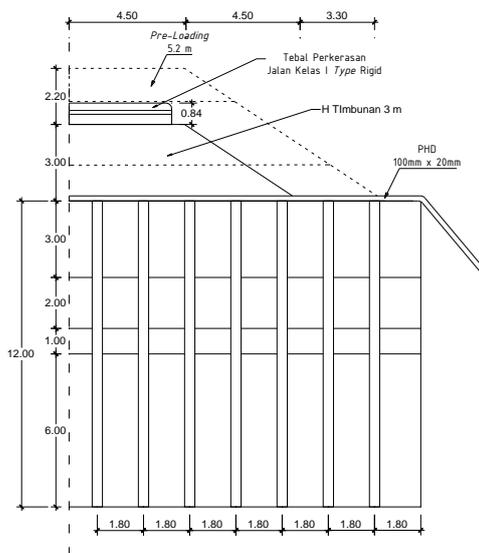
q = besar aliran 1 titik ujung PVD arah vertikal (m³/s)

2.8 Data Sekunder

Data tanah asli adalah data yang didapat dari kondisi lapangan dan uji laboratorium. Pada kondisi per lapisan tanah diketahui kedalaman 1 – 12 m, menggunakan data N-SPT. Data tanah 1-12 m yang di dapat berupa data volume tanah jenuh (γ_{sat}), *Water Content* (Wc), *Specific Gravity* (Gs), Sudut gesek (ϕ), Kohesi (C), *Coefficient of Consolidation* (Cv), *Compression Index* (Cc), dan *Swell Index* (Cs). Data yang digunakan dapat dilihat pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.

2.9 Stratifikasi Tanah

Stratifikasi tanah dapat dilihat pada **Gambar 5**. untuk tebal jalan beton yang digunakan sebesar 0.84 m. Lebar timbunan yang digunakan dengan panjang 4.5 m, dengan kemiringan timbunan yang digunakan 1:1.5. untuk rencana penggunaan PVD dan PHD, ukuran yang digunakan PVD 100 mm x 40 mm dengan kedalaman yang akan di pasang PVD sedalam 12 m, untuk PHD digunakan untuk mengaliri aliran air yang diterima oleh PVD dengan rencana ukuran PHD *CETEAU CT-SD100 – 20*.



Gambar 5. Stratifikasi Tanah

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Tinjauan Umum

Data tanah adalah data yang didapat sesuai keadaan di lapangan atau eksisting, data tanah diambil dari lapangan dan hasil pengujian laboratorium. Data tanah ini sangat penting, yang berguna sebagai perhitungan besar penurunan dan lama waktu yang diketahui dengan menggunakan metode timbunan dan jarak spasi PVD.

ANALISIS PERBAIKAN TANAH LUNAK MENGGUNAKAN METODE PRELOADING, PVD DAN PHD UNTUK TIMBUNAN PADA JALAN KELAS I, SUMATERA BARAT

(Danang Setiya Raharja, Muhammad Hilmi Hibatullah)

Tabel 3. Hubungan Beban Jalan dan Tinggi Timbunan

Deskripsi	Nilai	Nilai	Nilai	Nilai	Nilai	Satuan
Beban Lalu Lintas	15	15	15	15	15	kN/m ²
Beban Perkerasan	17.56	17.56	17.56	17.56	17.56	kN/m ²
γ timbunan	18	18	18	18	18	kN/m ³
Galian Tanah	15.12	15.12	15.12	15.12	15.12	kN/m ²
H timbunan Variasi	1	2	3	4	5	m
B1	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	m
B2	1.5	3	4.5	6	7.5	m
q₀	35.44	53.44	71.44	89.44	107.44	kN/m ³

(Sumber: Hasil perhitungan beban)

3.2 Hubungan Beban Jalan dan Tinggi Timbunan

Beban dan tebal jalan yang digunakan dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Data Beban dan Tebal Jalan

Lapisan	γ kN/m ³	Tebal m	Berat kN/m ²
Plat Beton	24	0.29	6.96
Fondasi LMC	20	0.15	3
Fondasi Agregat K.A.	19	0.4	7.6
TOTAL		0.84	17.56

(Sumber: Hasil perhitungan)

Menghitung q_0 , yang dimana q_0 adalah beban total dari hubungan antara beban jalan dan tinggi timbunan dapat dilihat pada **Tabel 4**.

3.3 Penurunan Konsolidasi Primer (Sc)

Konsolidasi primer pada lempung terjadi ketika terdapat penambahan beban di atas permukaan tanah, menyebabkan air pori keluar dari tanah sehingga terjadinya perubahan volume tanah jenuh. Pada kedalaman dari 0 – 3 m dilakukan penggantian (*replacement*) dengan material timbunan, maka pada kedalaman tersebut kita abaikan. Penurunan hanya memperhitungkan di area lapisan tanah dengan kondisi lempung,

Tabel 5. Penurunan Konsolidasi Primer (Sc) dengan Rencana Timbunan 1 m

Kedalaman m	Tebal m	e_0	C_c	P_0' kN/m ²	α_1 radian	α_2 radian	ΔP kN/m ²	S_c m
1	1	2,468	0,727	4,545	0,054	1,352	35,336	0,198
2	1	2,468	0,727	13,635	0,096	1,153	34,711	0,115
3	1	2,468	0,727	22,725	0,124	0,983	33,396	0,082
4	1	2,468	0,727	31,815	0,139	0,844	31,557	0,063
5	1	2,468	0,727	40,905	0,143	0,733	29,461	0,049
6	1	2,468	0,727	55,495	0,142	0,644	27,324	0,036
7	1	2,468	0,727	59,735	0,137	0,571	25,280	0,032
8	1	2,468	0,727	68,925	0,131	0,512	23,393	0,027
9	1	2,468	0,727	78,115	0,124	0,464	21,683	0,022
10	1	2,468	0,727	87,305	0,118	0,423	20,150	0,019
11	1	2,468	0,727	96,495	0,111	0,388	18,781	0,016
12	1	2,468	0,727	105,685	0,105	0,359	17,559	0,014
							$\sum S_c$	0,2787
							Dalam cm	27,870

(Sumber: Hasil perhitungan penurunan)

dengan tinggi timbunan 1m, 2m, 3m, 4m dan 5m. Perhitungan penurunan konsolidasi primer hanya diperhitungkan sampai di kedalaman 12 m, dengan contoh detail perhitungannya disajikan pada **Tabel 5**. Kompilasi hasil perhitungan Konsolidasi Primer (S_c) dengan variasi tinggi timbunan dapat dilihat di pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Penurunan Konsolidasi Primer (Sc) dengan Variasi Tinggi Timbunan

H Timbunan m	Konsolidasi Primer (Sc) cm
1	27,87
2	40,42
3	51,79
4	60,09
5	71,45

(Sumber: Hasil perhitungan)

3.4 Penurunan Segera (Si)

Penurunan hanya memperhitungkan di area lapisan tanah dengan kondisi pasir, dikarenakan kondisi ujung dari lapisan tanah yang terkonsolidasi. dinyatakan ke dalam dari kedalaman 4 – 25 m dengan tinggi timbunan 1m, 2m, 3m, 4m dan 5m. Contoh rincian perhitungan untuk ketinggian timbunan 2m ditunjukkan pada **Tabel 9**. Rangkuman hasil perhitungan

Tabel 9. Penurunan Segera (Si) dengan Rencana Timbunan 2 m

Kedalaman m	Tebal m	P ₀ kN/m ²	α ₁ radian	α ₂ radian	ΔP kN/m ²	Si cm
1	1	0,36	0,09	1,35	53,33	0,00
2	1	13,64	0,16	1,15	52,62	0,00
3	1	22,73	0,21	0,98	51,08	0,00
4	1	31,82	0,24	0,84	48,85	0,00
5	1	40,91	0,25	0,73	46,19	0,00
6	1	55,50	0,25	0,64	43,37	0,00
7	1	59,74	0,25	0,57	40,58	0,00
8	1	68,93	0,24	0,51	37,91	0,00
9	1	78,12	0,23	0,46	35,43	0,00
10	1	87,31	0,22	0,42	33,15	0,00
11	1	96,50	0,21	0,39	31,08	0,00
12	1	105,69	0,20	0,36	29,20	0,00
13	1	138,63	0,10	0,33	19,77	0,08
14	1	149,72	0,09	0,31	18,57	0,08
15	1	160,81	0,09	0,29	17,49	0,07
16	1	171,90	0,08	0,27	16,52	0,07
17	1	182,99	0,08	0,26	15,65	0,07
18	1	194,08	0,08	0,24	14,86	0,06
19	1	205,17	0,07	0,23	14,15	0,06
20	1	216,26	0,07	0,22	13,50	0,06
21	1	227,35	0,07	0,21	12,90	0,05
22	1	205,17	0,06	0,20	12,35	0,05
23	1	216,26	0,06	0,19	11,84	0,05
24	1	260,62	0,06	0,19	11,38	0,05
25	1	271,71	0,06	0,18	10,95	0,05
26	1	275,15	0,06	0,17	10,54	0,09
27	1	285,94	0,05	0,17	10,17	0,16
28	1	296,73	0,05	0,16	9,82	0,16
					ΣSi	1,20

(Sumber: Hasil perhitungan penurunan segera)

penurunan Segera (Si) dengan berbagai variasi tinggi timbunan disajikan pada **Tabel 7**.

Tabel 7. Penurunan Segera (Si) dengan Variasi Tinggi Timbunan

H Timbunan m	Penurunan Segera (Si) cm
1	1,00
2	1,20
3	1,46
4	1,74
5	4,44

(Sumber: Hasil perhitungan)

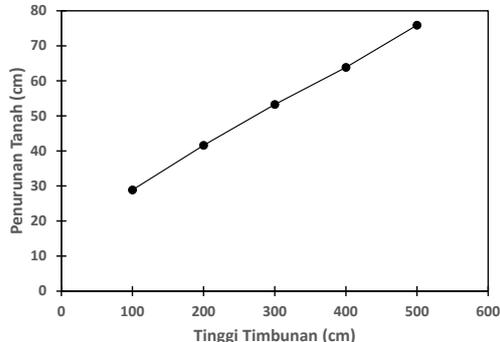
3.5 Penurunan Total (St)

Penurunan total dapat dilihat pada **Tabel 8**, pada **Gambar 6** merupakan grafik penurunan total dengan variasi tinggi timbunan.

Tabel 8. Penurunan Total (St)

H Timb. m	Penurunan Segera (Si) cm	Konsolidasi Primer (Sc) cm	Penurunan Total (St) cm
1	1,00	27,87	28,87
2	1,20	40,42	41,62
3	1,46	51,79	53,25
4	1,74	60,09	63,83
5	4,44	71,45	75,89

(Sumber: Hasil perhitungan)



Gambar 6. Grafik Penurunan Total (St)

3.6 Tinggi Timbunan Tambahan (Preloading)

Besar beban ini akan digunakan dalam perhitungan H-initial, dengan mengacu pada (SNI 8460:2017 pasal 6.10.5 no. c) untuk syarat kelayakan pra-pembebanan (*preloading*) dengan mengakomodasi lebih besar atau sama dengan 1,3 x beban yang direncanakan (**Tabel 10**).

Dengan timbunan yang dipakai 3 m, tinggi *Preloading* yang digunakan dengan tinggi 5.2 m, dengan tinggi H-final setelah proses penurunan segera dan konsolidasi menjadi 4,6m sehingga tinggi timbunan yang perlu di pangkas setebal 1,6 m (**Gambar 7**).

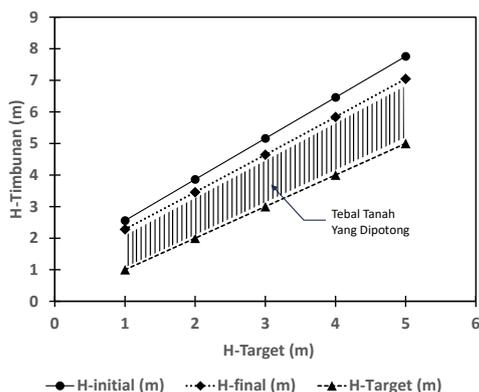
ANALISIS PERBAIKAN TANAH LUNAK MENGGUNAKAN METODE PRELOADING, PVD DAN PHD UNTUK TIMBUNAN PADA JALAN KELAS I, SUMATERA BARAT

(Danang Setiya Raharja, Muhammad Hilmi Hibatullah)

Tabel 10. Rangkuman tinggi timbunan *preloading*

H-Target m	γ timb. kN/m ³	q ₀ Beban Tambahan kN/m ²	Sc m	H-Initial m	H-Final m	H potong m
1	18	46,072	0,279	2,560	2,281	1,281
2	18	69,472	0,404	3,860	3,455	1,455
3	18	92,872	0,518	5,160	4,642	1,642
4	18	116,272	0,621	6,460	5,839	1,839
5	18	139,672	0,714	7,760	7,045	2,045

(Sumber: Hasil perhitungan)



Gambar 7. Grafik H-target dan H-Timbunan

3.7 H-kritis Timbunan

Dengan ketentuan sesuai SNI 8460:2017 batas area jarang terjadinya longsor sebesar 1,5.

$$q_{ijin} = \frac{qu}{SF} = \frac{102,8}{1,5} = 68,53 \text{ kN/m}^2$$

Dengan γ timbunan 18 kN/m³

$$H_{kritis} = \frac{q_{ijin}}{\gamma \text{ timbunan}} = \frac{68,53}{18} = 3,807 \text{ m}$$

Maka H_{kritis} 3,807 m adalah tinggi timbunan yang kuat di topang oleh tanah dasar pada tahap

pertama penimbunan sebelum tanah mengalami peningkatan kuat geser akibat proses konsolidasi tanah.

3.8 Menentukan Waktu Penurunan Tanpa PVD

Perhitungan lama waktu penurunan tanpa PVD didasarkan pada nilai derajat konsolidasi mulai dari 0% hingga 90% sebagai batas akhirnya. Nilai *time factor* dihitung menggunakan persamaan A untuk derajat konsolidasi 0-60% dan persamaan B untuk >60%. Lapisan tanah dianggap memiliki aliran dua arah (ke atas dan ke bawah) sehingga nilai tebal kritis (H_{dr}) adalah 6 m. Rangkuman hasil perhitungan disajikan pada **Tabel 11**.

Persamaan A

$$T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U\%}{100} \right)^2 \quad (25)$$

Persamaan B

$$T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - U\%) \quad (26)$$

Tabel 11. Perhitungan lama waktu konsolidasi tanpa PVD

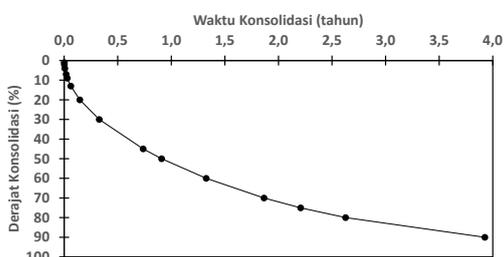
Hdr m	U%	T _v	C _v m ² /day	t = waktu konsolidasi	
				hari	tahun
6	1	0,0001	2,16E-02	0,13	0,000
6	2	0,0003	2,16E-02	0,52	0,001
6	4	0,0013	2,16E-02	2,09	0,006
6	7	0,0038	2,16E-02	6,41	0,018
6	9	0,0064	2,16E-02	10,60	0,029
6	13	0,0133	2,16E-02	22,12	0,061
6	20	0,0314	2,16E-02	52,36	0,145
6	30	0,0707	2,16E-02	117,81	0,327
6	45	0,1590	2,16E-02	265,07	0,736
6	50	0,1963	2,16E-02	327,25	0,909
6	60	0,2863	2,16E-02	477,13	1,325
6	70	0,4028	2,16E-02	671,41	1,865
6	75	0,4767	2,16E-02	794,54	2,207
6	80	0,5671	2,16E-02	945,23	2,626
6	90	0,8480	2,16E-02	1413,33	3,926

(Sumber: Hasil perhitungan)

Tabel 13. Penurunan Setelah Pemasangan PVD dengan Jarak Spasi 1.3 m

Hdr m	t hari	Cv m ² /hari	Tv	Uv m ² /hari	1-Uv	Ch m ² /hari	Th m ² /hari	λ	Uh	1-Uh	U %	s m
6	2	0,02160	0,0012	0,039	0,961	4,32E-02	0,0464	-0,163	0,1501	0,8499	18,3	0,021
6	4	0,02160	0,0024	0,055	0,945	4,32E-02	0,0927	-0,325	0,2777	0,7223	31,8	0,029
6	6	0,02160	0,0036	0,068	0,932	4,32E-02	0,1391	-0,488	0,3861	0,6139	42,8	0,036
6	8	0,02160	0,0048	0,078	0,922	4,32E-02	0,1855	-0,651	0,4783	0,5217	51,9	0,042
6	10	0,02160	0,0060	0,087	0,913	4,32E-02	0,2319	-0,813	0,5566	0,4434	59,5	0,047
6	12	0,02160	0,0072	0,096	0,904	4,32E-02	0,2782	-0,976	0,6231	0,3769	65,9	0,051
6	14	0,02160	0,0084	0,103	0,897	4,32E-02	0,3246	-1,139	0,6797	0,3203	71,3	0,055
6	15	0,02160	0,0090	0,107	0,893	4,32E-02	0,3478	-1,220	0,7047	0,2953	73,6	0,057
6	18	0,02160	0,0108	0,117	0,883	4,32E-02	0,4173	-1,464	0,7686	0,2314	79,6	0,062
6	20	0,02160	0,0120	0,124	0,876	4,32E-02	0,4637	-1,626	0,8034	0,1966	82,8	0,066
6	22	0,02160	0,0132	0,130	0,870	4,32E-02	0,5101	-1,789	0,8329	0,1671	85,5	0,069
6	24	0,02160	0,0144	0,135	0,865	4,32E-02	0,5565	-1,952	0,8580	0,1420	87,7	0,072
6	26	0,02160	0,0156	0,141	0,859	4,32E-02	0,6028	-2,114	0,8793	0,1207	89,6	0,075
6	27	0,02160	0,0162	0,144	0,856	4,32E-02	0,6260	-2,196	0,8887	0,1113	90,5	0,076

(Sumber: Hasil perhitungan)



Gambar 8. Hubungan derajat konsolidasi terhadap waktu penurunan tanpa PVD

3.9 Menentukan Waktu Penurunan Menggunakan PVD

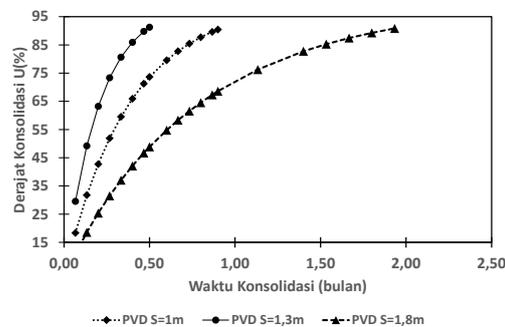
Perhitungan menggunakan tinggi timbunan 3 m dan tinggi *Preloading* 5.2 m dengan menggunakan pola segitiga dan 3 variasi jarak antar spasi 1m, 1,3m dan 1,8m dapat dilihat pada **Tabel 12**. Contoh detail perhitungan dengan variasi jarak PVD 1,3 m ditunjukkan pada **Tabel 13**.

Tabel 12. Perencanaan PVD

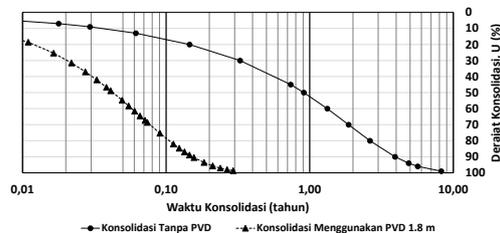
H. Tim m	Spasi m	D -	dw m	n -	F(n) -
3	1	1,05	0,066	15,859	2,021
	1,3	1,365	0,066	20,617	2,281
	1,8	1,89	0,066	28,546	2,604

(Sumber: Hasil perhitungan)

Dapat dilihat pada **Gambar 9** grafik di bawah ini perbedaan lama waktu penggunaan PVD dengan jarak antar spasi 1m, 1,3m, dan 1,8m, terlihat bahwa spasi yang lebih kecil atau rapat akan membutuhkan waktu konsolidasi yang lebih cepat. Sedangkan **Gambar 10** menunjukkan perbedaan lama waktu konsolidasi antara tanpa PVD dan dengan menggunakan PVD. Terlihat bahwa, penggunaan PVD dengan spasi 1,8 m akan mempercepat durasi waktu konsolidasi yang semula 4 tahun (jika tanpa PVD) akan menjadi hanya 2 bulan.



Gambar 9. Grafik Lama Waktu Penurunan dengan Penggunaan PVD



Gambar 10. Perbedaan Lama Waktu dengan Penggunaan PVD dan Tanpa Penggunaan PVD

3.10 Perencanaan PHD

Prefabricated Horizontal Drain (PHD) yang digunakan dalam pelaksanaan dilapangan dengan ukuran lebar 100 mm dan tebal 20 mm. Pemasangan dilapangan diberikan jarak dengan penyesuaian terhadap pemasangan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dengan jarak 1.8 m.

1. Estimasi debit maksimum aliran air horizontal pada 1 lajur

$$\begin{aligned}
 \text{Debit} &= N \times q \\
 &= 250 \text{ titik} \times 3.03\text{E-}07 \text{ m}^3/\text{s} \\
 &= 0.00007584 \text{ m}^3/\text{s} \\
 &= 7.58\text{E-}05 \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

2. Penggunaan PHD CETEAU CT-SD100 – 20
Kapasitas PHD CT-SD 100 – 20

ANALISIS PERBAIKAN TANAH LUNAK MENGGUNAKAN METODE PRELOADING, PVD DAN PHD UNTUK TIMBUNAN PADA JALAN KELAS I, SUMATERA BARAT

(Danang Setiya Raharja, Muhammad Hilmi Hibatullah)

$$= 3.77 \times 10^{-4}$$

$$= 0.00038 \text{ m}^3/\text{s}$$

Faktor keamanan dengan mengacu pada

$$SF = \frac{\text{Kapasitas pengaliran PHD}}{\text{Debit pengaliran air yang diperlukan}}$$

$$= \frac{0.00038}{0.00007584}$$

$$= 5.01$$

3.11 Hasil Perhitungan

Berdasarkan analisis perhitungan matematis diperoleh hasil penurunan tanah dengan konsolidasi untuk mencapai derajat konsolidasi 90% menggunakan tinggi timbunan variasi 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, dan 5 m dengan menggunakan PVD dapat dilihat pada **Tabel 14**. dan tanpa penggunaan PVD dapat dilihat **Tabel 15**.

Tabel 14. Perhitungan Matematis Tanpa Penggunaan PVD Untuk Mencapai Derajat Konsolidasi 90%

Timbunan (m)	Waktu (hari)	Penurunan (m)
1	1414	0,26
2	1414	0,37
3	1414	0,48
4	1414	0,57
5	1414	0,68

(Sumber: Hasil perhitungan)

Tabel 15. Perhitungan Matematis dengan Menggunakan PVD Untuk Mencapai Derajat Konsolidasi 90%

Jarak PVD (m)	Waktu (hari)	Penurunan (m)
1,0	15	0,486
1,3	27	0,482
1,8	57	0,482

(Sumber: Hasil perhitungan)

Perbandingan perhitungan matematis lama waktu dan besar penurunan dengan membandingkan tanpa penggunaan PVD dan penggunaan PVD dengan menggunakan tinggi timbunan 3 m dapat dilihat pada **Tabel 16**.

Tabel 16. Hasil Perbandingan Matematis Tanpa Menggunakan PVD dan Menggunakan PVD

Tipe	Waktu (hari)	Penurunan (m)
Tanpa PVD	1414	0,479
Dengan PVD	57	0,482

(Sumber: Hasil perhitungan)

Hasil perbandingan untuk mencapai derajat konsolidasi 90% tanpa menggunakan PVD dengan lama waktu 1414 hari dan besar penurunan 0,479 m, sedangkan menggunakan

PVD lama waktu 57 hari dan besar penurunan 0,482 m.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode matematis tanpa penggunaan PVD *Prefabricated Vertical Drain* untuk mencapai derajat konsolidasi 90% dengan pengambilan data di tinggi timbunan 3 m, tinggi *Preloading* 5.2 m, dan Beban total q_0 35.44 kN/m³, mendapatkan lama waktu 1414 hari dengan besar penurunan 0.479 m. Penggunaan PVD (*Prefabricated Vertical Drain*) yang digunakan dalam analisis ini untuk mencapai derajat konsolidasi 90%, kedalaman tanah dengan kondisi tanah lunak mencapai 12 m dengan rencana ukuran PVD 100 mm – 40 mm, tinggi timbunan 3 m, tinggi timbunan 3 m, tinggi *Preloading* 5.2 m, dan Beban total q_0 35.44 kN/m³. Perhitungan Hkritis didapat sebesar 3,807 m. Berdasarkan perhitungan dengan rencana PVD menggunakan pola segitiga dan jarak antar PVD 1.8 m diperoleh lama waktu 57 hari dan besar penurunan 0.482 m. Dari hasil perhitungan tanpa penggunaan PVD dan penggunaan PVD, penggunaan PVD mempercepat proses konsolidasi selama 57 hari. Berdasarkan hasil perhitungan PVD dengan pola segitiga, maka setiap 1 ujung PVD mengeluarkan air seluas 2.806 m² dengan panjang lajur maksimum PHD 75 m menghasilkan estimasi debit aliran air horizontal sebesar 0.00007584 m³/s.

5. DAFTAR PUSTAKA

- ATLAS Sebaran Tanah Lunak Indonesia. (2019). ATLAS Sebaran Tanah Lunak Indonesia, Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). Standar Nasional Indonesia. Persyaratan perancangan geoteknik. SNI 8460:2017. Jakarta. www.bsn.go.id
- BPS. (2024). Badan Pusat Statistik Provinsi Sumatera Barat BPS-Statistics of Sumatera Barat, 2024.
- Darwis. (2017). Dasar-Dasar Teknik Perbaikan Tanah, Nyutran MG II / 14020 Yogyakarta.
- Das, B. M. (1995). Mekanika Tanah jilid I (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis). Erlangga. Jakarta.
- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2019). Principles Of Foundation Engineering, 9th Edition, SI Edition-Cengage Learning, Inc. (2019).
- Kuswanda, Wahyu. P. (2015). Problematika Pembangunan Infrastruktur Pada Tanah

- Lempung Lunak dan Alternatif Metoda Penanganannya. www.geosistem.co.id
- Listyawan, A. B., & Syahputra, A. R. (t.t.). Perilaku Konsolidasi Tanah Lempung Dengan Kolom Pecahan Beton Sebagai Drainase Vertikal, Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2020, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Nena, H. U., Yuliatun, H. D., Praktiso, & Nafi'ah. (2022). Analisis Perbaikan Tanah Lunak Menggunakan Geosintetik Jenis Prefabricated Vertical Drain (PVD), Prefabricated Horizontal Drain (PHD), dan GEOTEKSTIL (Studi Kasus: Tol Semarang – Demak). *JURNAL ILMIAH SULTAN AGUNG*, 119–129.
- Puspita, N., & Capri, A. (2017). Analisa Penurunan Tanah Lunak Dengan Beberapa Metode Konsolidasi Pada Proyek Jalan Tol Palindra. *Cantilever*, 6(1). <https://doi.org/10.35139/cantilever.v6i1.49>
- S, H. N., Juniarso, Sulardi, Dimiyati, Suparman, A., & Pramono, D. (2022). Perencanaan Perbaikan Tanah Lunak dengan Metode Preloading dan Prefabricated Vertical Drain di Kawasan Ancol Timur. 6, 8700–8711.
- Suardi, E., Misriani, M., & Iqbal, I. (2021). Perbaikan Tanah Lempung Lunak dengan Metode Preloading pada Jalan Tol Palembang-Indralaya STA 1+670. Dalam *Jurnal Teknik Sipil* (Vol. 10).
- Susiazti, H., Widiastuti, M., Widyati, R., & Widayati, R. (t.t.). *Jurnal Teknologi Sipil Jurnal Ilmu Pengetahuan dan teknologi sipil Analisis Penurunan Konsolidasi Metode Preloading Dan Prefabricated Vertical Drain (PVD)*.
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 38 Tahun. (2024). Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2004 Tentang Jalan.
- Winarta, H., Fadhli, A., & As, M. H. (2018). Analisis Pengaruh Hambatan Samping Terhadap Kinerja Ruas Jalan Perintis Kemerdekaan Kota Padang. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 1(1). <https://ojs-ft.ekasakti.org/index.php/JAES/>
- Zhafirah, A., & Amalia, D. (t.t.). Perencanaan Preloading Dengan Penggunaan Prefabricated Vertical Drain Untuk Perbaikan Tanah Lunak Pada Jalan Tol Pejagan-Pemalang.