

Studi Pengaruh Spasi Prefabricated Vertical Drain (PVD) Terhadap Penurunan Tanah

Study of The Effect of Prefabricated Vertical Drain (PVD) Spacing on Subsidence

Merley Misriani¹, Enita Suardi², Liliwarti², Winda Fitria², Ibnu Iqbal²

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia

²Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Padang, Sumatera Barat, Indonesia

Article Info

Article history:

Received 31, Maret, 2024

Revised 30, Oktober, 2024

Accepted 31, Oktober, 2024

Kata Kunci

Penurunan konsolidasi

Prefabricated vertical drain

Preloading

Timbunan

Abstrak

Konstruksi infrastruktur jalan tol dapat mengalami kerusakan sebelum masa layanan yang direncanakan tercapai. Penurunan tanah dapat terjadi apabila infrastruktur transportasi dibangun di atas lapisan tanah lunak, sehingga menyebabkan kerusakan struktur dan geoteknik yang cukup besar. Penelitian menjadi sangat penting dengan mengambil studi kasus pada Jalan Tol Palembang-Indralaya STA 1+670 yang berada di atas lapisan tanah dengan nilai N-SPT < 10 dan tanah lunak mencapai kedalaman 16,95 m. Penelitian bertujuan untuk menguji efektivitas aplikasi *preloading* dan *prefabricated vertical drain* (PVD) dalam mempercepat proses penurunan tanah dasar pada jalan tol tersebut. Metode yang digunakan dalam penelitian adalah dengan mengombinasikan metode *preloading* dan PVD. Metode *preloading* menggunakan sistem *surcharge*, menempatkan beban timbunan pada tanah dasar dengan tinggi desain 5 m. Metode PVD dengan memasang alat *vertical drain* ke dalam lapisan tanah lunak. Data yang diperlukan meliputi *layout* lokasi dan data tanah dasar, yaitu data tanah hasil uji lapangan dan laboratorium. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan yang terjadi sebesar 1,556 m dengan derajat konsolidasi 90% selama 2,149 tahun. Selanjutnya, setelah memasukkan metode PVD, waktu penurunan tanah dasar dengan derajat konsolidasi 90% menjadi lebih cepat, yaitu dua bulan dengan pola pemasangan segitiga dengan jarak 3 meter. Pada jalan tol dari Palembang menuju Indralaya, pendekatan gabungan antara *preloading* dengan PVD terbukti bermanfaat dalam mempercepat proses penurunan tanah dasar. Penelitian mengimplikasikan bahwa kombinasi metode *preloading* dan *prefabricated vertical drain* (PVD) dapat dipilih sebagai metode perbaikan tanah lunak untuk mempercepat penurunan tanah dasar.

Abstract

Toll road infrastructure construction can fail before the planned service life is reached. Land subsidence can occur when transportation infrastructure is built on soft soil layers, causing considerable structural and geotechnical damage. The research becomes very important by taking a case study on the Palembang-Indralaya Toll Road STA 1+670 is on top of a layer of soil with N-SPT value <10, and the soft soil reaches a depth of 16,95m. This research aims to test the effectiveness of *preloading* and *prefabricated vertical drain* (PVD) applications in accelerating the subgrade settlement process on the toll road. The method used in this

research is to combine preloading and PVD methods. The preloading method uses a surcharge system, placing the embankment load on the subgrade with a design height of 5m. And the PVD method by installing a vertical drain device into the soft soil layer. The required data includes site layout and subgrade data, namely soil data from field and laboratory tests. The results showed that the settlement was 1,556 m with 90% consolidation degree for 2,149 years. Furthermore, after incorporating the PVD method, the subsidence time of the subgrade with 90% degree of consolidation became faster, namely two months with a triangular installation pattern with a distance of 3 meters. On the toll road from Palembang to Indralaya, South Sumatra, the combined approach of preloading with PVDs proved beneficial in accelerating the subgrade settlement process. This research implies that a combination of preloading and prefabricated vertical drain (PVD) methods can be selected as a soft soil improvement method to accelerate subgrade settlement.

Corresponding Author: Misriani, merley.misriani@eng.unri.ac.id

A. PENDAHULUAN

Pengembangan infrastruktur transportasi di Indonesia sangat penting untuk mendukung pertumbuhan ekonomi suatu wilayah. Transportasi sangat penting bagi pembangunan negara mana pun (Hore, dkk., 2020; Peng, dkk., 2023). Jalan raya memainkan peran penting dalam mengangkut orang dan barang dalam kegiatan ekonomi negara-negara berkembang (Gui, dkk., 2020; Hamim, dkk., 2021; Ifediniru & Ekeocha, 2022; Panchal & Shrivastava, 2022; Scholte, dkk., 2022; Indraratna, dkk., 2023). Salah satu pembangunan infrastruktur tersebut adalah Jalan Tol Palembang-Indralaya yang merupakan bagian dari Jalan Tol Trans Sumatera (Dermawan, dkk., 2021; Ghazi, dkk., 2021). Pembangunan Jalan Tol Palembang-Indralaya bertujuan untuk meningkatkan pertumbuhan ekonomi Provinsi Sumatera Selatan pada khususnya dan pertumbuhan ekonomi Pulau Sumatera pada umumnya (Amalindo, dkk., 2019).

Pembangunan infrastruktur transportasi di atas tanah dasar lempung lunak dapat gagal sebelum usia konstruksi yang direncanakan tercapai. Penurunan tanah dapat terjadi ketika bangunan, drainase, dan infrastruktur

transportasi dibangun di atas lapisan tanah lunak, yang menyebabkan kerusakan struktural dan geoteknik yang cukup besar (Santiago & Acosta, 2020; Hore, dkk., 2020; Muhammed, dkk., 2020; Fatmawati, dkk., 2023). Hal ini dikarenakan jenis tanah dasar di wilayah Sumatera pada umumnya berupa tanah lunak (Wu, dkk., 2021). Jenis tanah lunak berbahaya bagi struktur yang ada di atas lapisan tanah tersebut. Selain itu, tanah lempung lunak memiliki karakteristik daya dukung yang rendah dan kompresi yang signifikan, serta proses konsolidasi primer berlangsung lama (Muhammed, dkk., 2020; Zhafirah, dkk., 2020). Akibatnya badan jalan yang dibangun di atas tanah timbunan akan rusak. Untuk mengatasi kejadian ini, perlu dilakukan percepatan pemadatan tanah lunak akibat timbunan pembatas jalan (Hübner & Mahler, 2020; Fatmawati, dkk., 2023).

Metode rekayasa geoteknik harus dapat memecahkan masalah tanah lunak. Metode perbaikan tanah yang paling banyak digunakan adalah *preloading* atau *surcharge* (Fatmawati, dkk., 2023). Beban tambahan diterapkan hingga tingkat konsolidasi yang direncanakan tercapai. Timbunan dibongkar setelah selesai dan konstruksi dimulai (Kassou,

dkk., 2021). *Preloading* juga dikenal sebagai *surcharge*, merupakan pendekatan yang paling sering digunakan untuk mempercepat proses konsolidasi dan memperkuat tanah lempung yang lemah (Chrismaningwang, dkk., 2020; Meilani, dkk., 2020; Bergado, dkk., 2021; Indraratna, dkk., 2023). Penurunan konsolidasi akibat beban tambahan atau *preloading* cukup signifikan. Namun, waktu yang diperlukan untuk mencapai derajat konsolidasi 90% masih relatif lama, sehingga diperlukan kombinasi dengan metode *Prefabricated Vertical Drains* (PVD) untuk mempersingkat waktu pemadatan tanah dasar (Suardi, dkk., 2021; Fatmawati, dkk., 2023).

Studi ini menggabungkan metode *preloading* dan *prefabricated vertical drain* (PVD) untuk mempersingkat waktu penurunan tanah dasar. Mempercepat konsolidasi pada tanah lunak dengan *prefabricated vertical drain, preloading*, dan pembangunan bertahap (Kassou, dkk., 2021; Fatmawati, dkk., 2023). Penggunaan PVD yang dikombinasikan dengan beban tambahan atau *preloading* dapat secara signifikan mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk terjadinya pengendapan primer (Hore, dkk., 2020). Perbaikan tanah lunak dengan PVD dan *preloading* merupakan salah satu aplikasi paling sukses di lokasi ini. Salah satu teknik yang paling dapat diterima untuk mengatasi masalah ini adalah pendekatan perbaikan tanah dengan menggunakan PVD (Zhafirah, dkk., 2019; Chrismaningwang, dkk., 2020; Hore, dkk., 2020; Ayeldeen, dkk., 2021; Bhosle & Deshmukh, 2021). Tujuan utama dari sistem drainase vertikal adalah untuk memperpendek jalur drainase air pori dari lapisan permeabilitas rendah ke permukaan air bebas atau lapisan drainase yang telah terpasang sebelumnya, sehingga mempercepat laju konsolidasi atau penurunan primer (Hore, dkk., 2020; Bhosle & Deshmukh, 2021).

Penelitian ini penting dilakukan karena Jalan Tol Palembang-Indralaya STA 1+670 berada di atas lapisan tanah dengan nilai $N-SPT < 10$, dan tanah lunak mencapai kedalaman 16,95 m berpotensi mengalami kerusakan sebelum masa layanan yang direncanakan tercapai. Selain itu, konstruksi jalan tol memiliki umur layanan yang terbatas. Akan tetapi, pembangunan prasarana jalan tol harus dilaksanakan sesuai dengan waktu yang ditentukan. Hasil penelitian terdahulu (Suardi, dkk., 2021) menyatakan bahwa tanah dasar Jalan Tol Palembang-Indralaya STA 1+670 adalah 1,556 meter dengan mengambil derajat konsolidasi 90% selama 2,149 tahun. Namun nilai 2,149 tahun tersebut relatif tidak efektif karena dibatasi oleh masa konstruksi. Oleh karena itu, sangat dibutuhkan penelitian untuk mempersingkat waktu penurunan tanah dasar pada Jalan Tol Palembang-Indralaya STA 1+670.

B. TINJAUAN PUSTAKA

1. Prosedur Analisis *Preloading*

Tahapan analisis *preloading* adalah merencanakan tinggi timbunan di mana tinggi timbunan merupakan beban *preloading*. Penelitian sebelumnya meliputi material tanah timbunan, dimensi, dan data perkerasan (Suardi, dkk., 2021). Selanjutnya menentukan nilai penurunan tanah dasar dan waktu penurunan. Terakhir, penurunan tanah dasar dilakukan dengan menghitung penurunan langsung dan penurunan konsolidasi (Santiago & Acosta, 2020; Ayeldeen, dkk., 2021).

Parameter yang diperlukan untuk menghitung penurunan langsung meliputi *poisson ratio* (μ), *elastic modulus* (E), dan *oedometric modulus* (E'). Parameter yang diperlukan untuk menghitung penurunan konsolidasi adalah ketebalan lapisan kompresibel (H), tegangan tambahan akibat beban

(Δp), indeks kompresi (C_c), indeks rekompresi (C_r), rasio rongga awal (e_o), tekanan *overburden* (p_o) dan tekanan pra-konsolidasi (p_c'). Rumus yang digunakan dalam analisis *preloading* mengacu pada penelitian sebelumnya (Suardi, dkk., 2021).

2. Prosedur Analisis PVD

Tahap analisis PVD memperpendek jarak aliran air drainase. Hal ini membuat waktu penyelesaian konsolidasi menjadi lebih singkat berdasarkan jenis PVD, pola pemasangan PVD, jarak antar PVD, dan kedalaman pemasangan PVD. Pada desain ini, jenis PVD yang digunakan adalah *CeTeau Drain CT-D822* dengan spesifikasi berat 75 g/m, tebal (a) 100 mm, dan lebar (b) 4 mm.

- Kedalaman PVD: kedalaman drainase vertikal (Hdr) ditentukan oleh ketebalan lapisan tanah yang mengalami peristiwa konsolidasi, yaitu sedalam H. Pada penelitian ini kedalaman pemasangan PVD sebesar 16,95 m. Pola aliran *single drain* karena PVD mengalirkan air sepanjang kedalaman PVD sampai ke permukaan tanah.
- Waktu konsolidasi karena PVD: pengurangan panjang lintasan air pori sangat penting untuk mempercepat penurunan tanah. Kondisi ini dapat dimanfaatkan dengan memasang *prefabrikasi vertical drain* (PVD) pada tanah pada jarak tertentu dengan formasi segitiga atau persegi panjang.

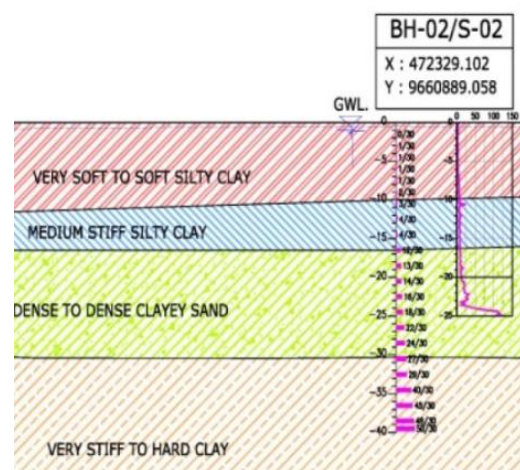
C. METODE PENELITIAN

1. Metode Penelitian

Penelitian menggunakan metode kuantitatif dengan melakukan pengujian metode *preloading* dan *prefabricated vertical drain* (PVD). Pengujian dilakukan pada Jalan Tol Palembang-Indralaya (Palindra) Sumatera Selatan

(STA 1+670). Penelitian memperoleh dua jenis data, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari hasil pengamatan di lapangan. Kontraktor utama yaitu PT. Hutama Karya menyediakan data sekunder berupa denah lokasi penelitian, profil lapisan tanah, dan data tanah hasil pengujian lapangan dan laboratorium. Selain itu, dilakukan penyelidikan untuk mengetahui nilai penurunan tanah dasar dan waktu penurunan hingga derajat konsolidasi 90%.

Jalan Tol Palindra berada di antara Kabupaten Ogan Ilir dan Kota Palembang, Sumatera Selatan. Dalam perencanaannya, panjang jalan tol Palindra mencapai 22 km. Jalan tol terbagi dalam tiga seksi. Seksi 1 adalah ruas Palembang-Pamulutan dengan panjang tol 7,10 km. Seksi 2 adalah ruas Pamulutan-KTM Rambutan dengan panjang tol 5,70 km serta seksi 3 adalah ruas KTM Rambutan – Indralaya dengan panjang tol 9,30 km. Gambar 1 menunjukkan profil tanah salah satu lokasi uji tanah (lubang bor 2).



Gambar 1. Profil lapisan tanah (lubang bor 2)

(Sumber: PT. Hutama Karya, 2021)

Berdasarkan Gambar 1, jenis lapisan tanah pada lubang bor 2 mulai dari lempung lanau sangat lunak sampai lunak, lempung lanau agak kaku, dan

lempung pasir padat sampai kedalaman 25 m dari permukaan tanah.

2. Analisis Data

Menurut [Barron, \(1948\)](#), penentuan waktu konsolidasi berdasarkan teori aliran air vertikal pada kolom pasir dapat dilihat pada Persamaan (1):

$$t = \left(\frac{D^2}{8Ch} \right) F(n) \ln \left(\frac{1}{1 - \bar{U}_h} \right) \quad (1)$$

Keterangan :

- t = Waktu untuk menyelesaikan konsolidasi primer
- D = Diameter ekuivalen lingkaran yang merupakan luas pengaruh PVD di mana 1,13S untuk pola susunan persegi dan 1,05S untuk pola susunan segitiga
- S = Jarak antar pusat PVD
- Ch = Koefisien konsolidasi untuk aliran air horizontal
- $\bar{U}_h$ = Derajat konsolidasi tanah (arah horizontal)
- F(n) = Fungsi dari tahanan akibat jarak antar titik pusat PVD

Menurut [Hansbo, \(1981\)](#), nilai F(n) didefinisikan dalam Persamaan (2):

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

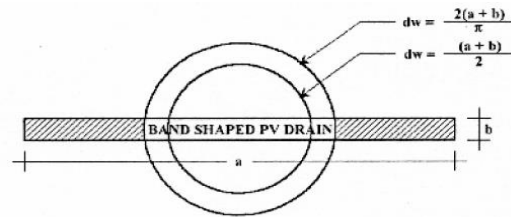
Keterangan :

- n = D/dw
- dw = Diameter ekuivalen drainase vertikal

Diameter ekuivalen drainase vertikal untuk PVD dapat dilihat pada Gambar 2.

Secara umum, $n > 20$ sehingga kita dapat mengasumsikan $1/n = 0$ dan seterusnya:

$$\begin{aligned} F(n) &= \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \ln(n) - \frac{3}{4} \\ &= \ln \left(\frac{D}{d_w} \right) - \frac{3}{4} \end{aligned} \quad (3)$$



Gambar 2. Diameter ekuivalen (dw) untuk PVD
(Sumber: [FHWA, 1986](#))

Waktu konsolidasi ditentukan oleh [Hansbo, \(1981\)](#) menggunakan Persamaan (4):

$$t = \left(\frac{D^2}{8ch} \right) \cdot (F(n) + F_s + F_r) \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - \bar{U}_h} \right) \quad (4)$$

Keterangan :

- Fr = Faktor tahanan drainase
- Fs = Faktor gangguan tanah

Nilai Fr dirumuskan sebagai berikut pada Persamaan (5):

$$F_r = \pi \cdot z \cdot (L - z) \left(\frac{kh}{q_w} \right) \quad (5)$$

Keterangan :

- z = Jarak di bawah permukaan atas lapisan tanah yang dipadatkan
- L = Panjang lintasan drainase efektif
- Kh = Koefisien permeabilitas pada arah horizontal
- qw = Kapasitas debit drainase vertikal (berdasarkan jenis PVD)

Dari Persamaan (4) dapat diketahui bahwa pengaruh gangguan tanah (Fs) dan tahanan drainase vertikal (Fr) cenderung menurunkan kecepatan konsolidasi. Faktor yang berperan adalah F(n), sedangkan nilai Fs dapat mendekati atau lebih besar dari F(n). Dari data lapangan diperoleh nilai Fs/F(n) berkisar antara 1 sampai 3. Oleh karena itu diasumsikan F(n)=Fs dan nilai Fr dianggap nol sehingga Persamaan (4)

berubah menjadi Persamaan (6):

$$t = \left(\frac{D^2}{8C_h} \right) \cdot (2F(n)) \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - \bar{U}_h} \right) \quad (6)$$

Dengan memasukkan nilai t tertentu, maka dapat dicari nilai t pada lapisan tanah yang dipasang PVD. Selain konsolidasi akibat aliran pori horizontal, terdapat konsolidasi akibat aliran air vertikal $\bar{U}_v$. Nilai $\bar{U}_v$ dapat dicari dengan Persamaan (7):

$$T_v = \frac{T \cdot C_v}{(H_{dr})^2} \quad (7)$$

Keterangan :

- Hdr = Ketebalan lapisan tanah yang dipasang PVD, pada penelitian ini Hdr sama dengan H sebesar 16,95 m
 Cv = Nilai Cv tanah pada lapisan setebal panjang PVD
 t = Waktu konsolidasi yang dipilih

Untuk nilai Cv yang berbeda pada setiap lapisan tanah, nilai Cv gabungan dihitung menggunakan Persamaan (8):

$$C_{v_{gab}} = \frac{(\sum H)^2}{\left(\left(\frac{H_1}{\sqrt{C_{v1}}} \right) + \left(\frac{H_2}{\sqrt{C_{v2}}} \right) + \left(\frac{H_3}{\sqrt{C_{v3}}} \right) \right)^2} \quad (8)$$

Rata-rata derajat konsolidasi drainase vertikal ($\bar{U}_v$) dapat ditentukan pada Persamaan (9) dan Persamaan (10). Untuk $\bar{U}_v$, antara 0 hingga 60% :

$$\bar{U}_v = \sqrt{\frac{4T_v}{\pi}} \quad (9)$$

Untuk $\bar{U}_v > 60\%$:

$$\bar{U}_v = (100 - 10^a)\% \quad (10)$$

Dimana:

$$a = \frac{1,781 - T_v}{0,933} \quad (11)$$

$$T_v = \frac{t \times C_v}{H_{dr}^2} \quad (12)$$

Sementara itu untuk menentukan derajat konsolidasi tanah horizontal, $\bar{U}_h$ digunakan Persamaan (13):

$$\bar{U}_h = 1 - \left(\frac{1}{e^{\left(\frac{t \times 8 \times C_h}{D^2 \times 2 \times F(n)} \right)}} \right) \quad (13)$$

Derajat konsolidasi rata-rata dapat ditemukan melalui Persamaan (14):

$$\bar{U} = 1 - (1 - \bar{U}_h)(1 - \bar{U}_v) \times 100\% \quad (14)$$

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Preloading

Penurunan total terjadi pada tanah dasar dengan metode *preloading* sedalam 1,556 m dengan derajat konsolidasi 90% mencapai 2,149 tahun. Oleh karena itu, penggunaan *prefabricated vertical drain* (PVD) untuk mempercepat penurunan tanah lempung lunak menjadi sangat penting.

2. Drainase Vertikal Pracetak (PVD)

Perencanaan PVD dilakukan dengan dua pola pemasangan PVD, yaitu pola segitiga dan pola persegi panjang dengan variasi jarak atau spasi 0,8 m; 1,0 m; 1,2 m; 1,5 m; 1,7 m; 2,0 m; 2,3 m; 2,5 m dan 3,0 m. Desain ini memperoleh jarak pemasangan PVD yang efisien untuk mencapai tingkat konsolidasi yang diantisipasi dan waktu yang dialokasikan untuk perencanaan.

3. Perhitungan Derajat Konsolidasi Vertikal, $\bar{U}_v$

Perhitungan derajat konsolidasi vertikal ($\bar{U}_v$) diasumsikan kurang dari 60%, sehingga untuk menghitung nilai $\bar{U}_v$ diperlukan faktor nilai T_v . Nilai T_v dihitung dengan menggunakan Persamaan (12), dan $\bar{U}_v$ menggunakan Persamaan (9) dalam perencanaan waktu dibuat dalam satuan minggu. Untuk waktu, $t = 1,0$ minggu; Hdr = 16,95 m; $C_{v_{gab}} = 0,0089 \text{ cm}^2/\text{detik} = 0,5436 \text{ m}^2/\text{minggu}$; $T_v = 0,0019$. Dengan

menggunakan Persamaan (9), diperoleh $\bar{u}_v = 0,0491$. Perhitungan T_v dan U_v pada minggu lainnya, dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1 menunjukkan hasil perhitungan faktor waktu (T_v) dan nilai derajat konsolidasi vertikal (U_v) mulai dari minggu ke-1 sampai minggu ke-15. Semakin besar faktor waktu, maka semakin tinggi derajat konsolidasi vertikal.

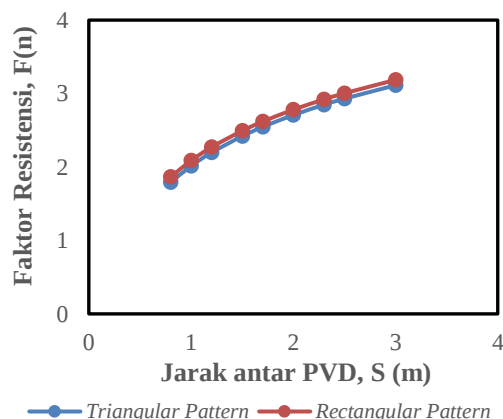
Tabel 1. Hasil perhitungan T_v dan $\bar{U}_v$

t (minggu)	T_v	$\bar{u}_v$
1	0,0019	0,0491
2	0,0038	0,0694
3	0,0057	0,0850
4	0,0076	0,0982
5	0,0095	0,1098
6	0,0114	0,1202
7	0,0133	0,1299
8	0,0151	0,1388
9	0,0170	0,1472
10	0,0189	0,1552
11	0,0208	0,1628
12	0,0227	0,1700
13	0,0246	0,1770
14	0,0265	0,1836
15	0,0284	0,1901

4. Perhitungan Derajat Konsolidasi Horizontal, $\bar{U}_h$

Derajat konsolidasi horizontal $\bar{U}_h$ diperoleh dari Persamaan (13). Dalam perhitungan, dibutuhkan beberapa

parameter seperti $F(n)$, Ch , dan D . Hasil perhitungan $F(n)$ pola segitiga dan persegi panjang dapat lihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Pengaruh jarak antara pola segitiga PVD dengan pola persegi panjang

Gambaran hubungan jarak antara PVD (S) dan faktor resistansinya, $F(n)$, setelah perhitungan dan analisis dapat dilihat pada Gambar 3. Gambar 3 menunjukkan bahwa semakin besar jarak antara PVD (S), semakin besar faktor hambatannya. Faktor hambatan lebih kecil pada pola pemasangan segitiga dari pada pola persegi panjang (Archenita, dkk., 2023).

Untuk perhitungan dengan pola instalasi segitiga dengan variasi ruang yang lain, dapat dilihat pada Tabel 2 dan dengan pola instalasi persegi panjang dengan variasi ruang yang lain, seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 2. Nilai $\bar{U}_h$ untuk pola pemasangan PVD segitiga

t (minggu)	Tv	$\overline{U}_v$ -	Pola Segitiga								
			0,8	1	1,2	1,5	$\overline{U}_h$ 1,7	2	2,3	2,5	3
1	0,00	0,05	1,00	0,98	0,92	0,77	0,66	0,52	0,41	0,35	0,25
2	0,00	0,07	1,00	1,00	0,99	0,94	0,88	0,77	0,65	0,58	0,43
3	0,01	0,09	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96	0,89	0,79	0,73	0,57
4	0,01	0,10	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,95	0,88	0,82	0,68
5	0,01	0,11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,93	0,88	0,76
6	0,01	0,12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96	0,92	0,82

Tabel 2. Nilai $\bar{U}_h$ untuk pola pemasangan PVD segitiga (Lanjutan)

t (minggu)	Tv	$\bar{U}_v$ -	Pola Segitiga								
			0,8	1	1,2	1,5	$\bar{U}_h$ 1,7	2	2,3	2,5	3
7	0,01	0,13	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,95	0,86
8	0,02	0,14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,97	0,89
9	0,02	0,15	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,92
10	0,02	0,16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,94
11	0,02	0,16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,95
12	0,02	0,17	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97
13	0,02	0,18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97
14	0,03	0,18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98
15	0,03	0,19	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99

Tabel 3. Nilai $\bar{U}_h$ untuk pola pemasangan PVD persegi panjang

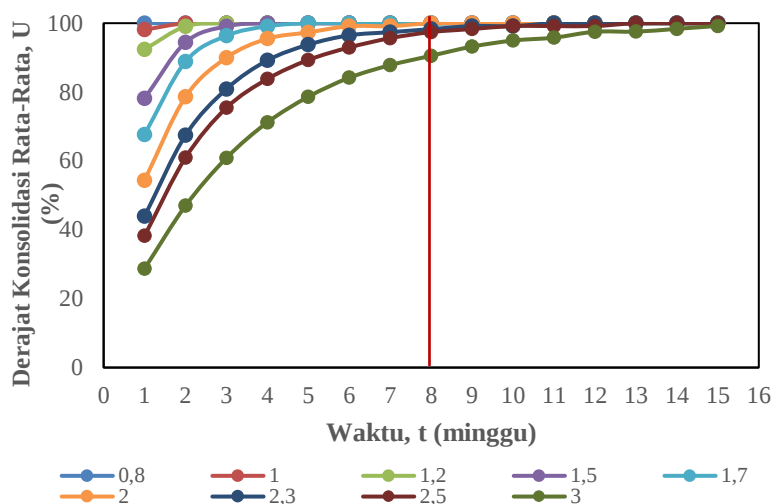
t (minggu)	Tv	$\bar{U}_v$ -	Pola Persegi Panjang								
			0,8	1	1,2	1,5	$\bar{U}_h$ 1,7	2	2,3	2,5	3
1	0,00	0,05	1,00	0,96	0,88	0,70	0,59	0,46	0,36	0,30	0,21
2	0,00	0,07	1,00	1,00	0,98	0,91	0,83	0,71	0,59	0,52	0,38
3	0,01	0,09	1,00	1,00	1,00	0,97	0,93	0,84	0,73	0,66	0,51
4	0,01	0,10	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,91	0,83	0,77	0,61
5	0,01	0,11	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,95	0,89	0,84	0,70
6	0,01	0,12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,93	0,89	0,76
7	0,01	0,13	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,95	0,92	0,81
8	0,02	0,14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,95	0,85
9	0,02	0,15	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,96	0,88
10	0,02	0,16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,91
11	0,02	0,16	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,93
12	0,02	0,17	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,94
13	0,02	0,18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,95
14	0,03	0,18	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,96
15	0,03	0,19	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97

5. Perhitungan Derajat Konsolidasi Rata-rata, $\bar{U}$

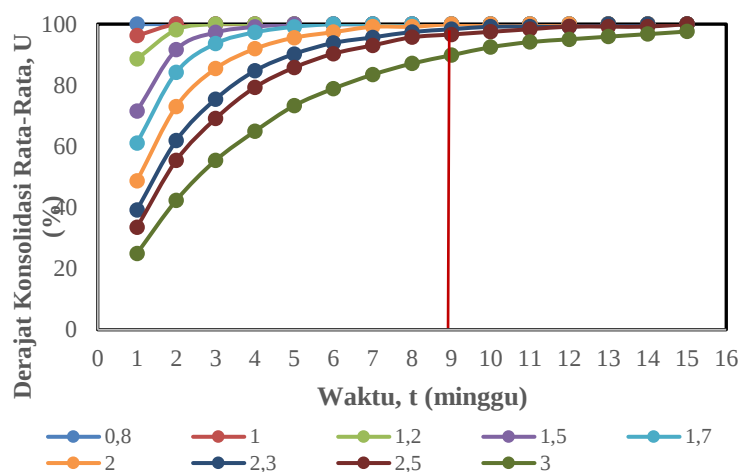
Setelah nilai $\bar{U}_v$ dan $\bar{U}_h$ diperoleh, maka perlu dilakukan perhitungan $\bar{U}$ berdasarkan persamaan (14). Hasil perhitungan derajat konsolidasi rata-rata untuk pola segitiga dengan jarak 3 m dan pola persegi panjang dengan jarak 3 m dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5. Dengan persamaan yang sama, semua variasi spasi PVD dihitung. Grafik derajat konsolidasi rata-rata ($\bar{U}$) menghasilkan hubungan antara waktu

yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi 90%.

Gambar 4 menunjukkan pola pemasangan segitiga pada semua variasi spasi. Berdasarkan grafik pada Gambar 4 dan hasil analisis, dapat diamati lama waktu yang dibutuhkan untuk mencapai konsolidasi 90% untuk pola pemasangan PVD segitiga, jarak pemasangan yang dipilih (S) 3 m dengan tingkat konsolidasi 90% sehingga waktu terakhir proses tahap penimbunan selesai delapan minggu.



Gambar 4. Grafik pemasangan PVD pola segitiga



Gambar 5. Grafik pemasangan PVD pola persegi panjang

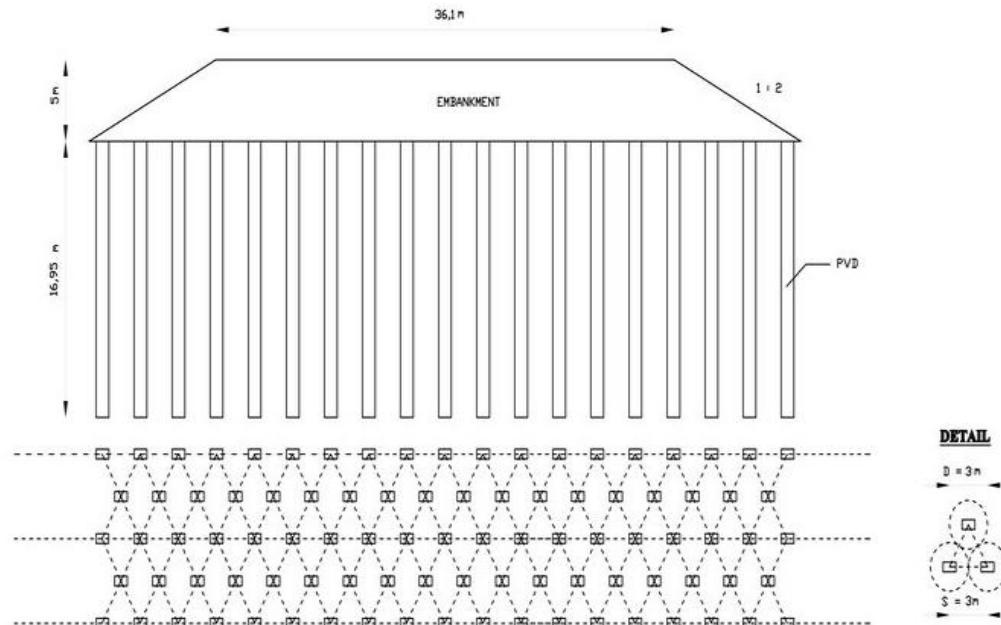
Gambar 5 menunjukkan pola pemasangan persegi panjang juga pada semua variasi spasi. Dengan cara yang sama pada Gambar 4, Gambar 5 memilih jarak pemasangan (S) 3 m dengan tingkat konsolidasi 90% untuk pola pemasangan persegi panjang, diperoleh waktu terakhir proses penimbunan selesai selama sembilan minggu. Sedangkan pada Gambar 6 menunjukkan pemasangan PVD *CeTeau Drain* CT-D822 di Jalan Tol Palindra STA 1+670 Sumatera Selatan, Indonesia.

Hasil penelitian sebelumnya (Suardi, dkk., 2021) memperbaiki tanah dasar Jalan Tol Palembang-Indralaya

STA 1+670, Sumatera Selatan. Tanah dasar tersebut dibebani dengan beban timbunan dan beban awal. Tinggi timbunan direncanakan setinggi 5 m, dengan lebar atas 36,1 m dengan kemiringan 1:2. Properti timbunan dengan $c = 0$, $\phi = 30^\circ$ $\gamma_{sat} = 1,85 \text{ t/m}^3$. Sebelum merencanakan tinggi timbunan, terlebih dahulu dihitung beban-beban yang diterima tanah dasar, yaitu beban timbunan dan beban perkerasan (*surchage*) (Archenita, dkk., 2016). Beban timbunan diperoleh dengan mengasumsikan tinggi timbunan, mulai dari asumsi tinggi timbunan 3 m sampai dengan 9 m. Beban perkerasan (*surchage*) dan beban lalu lintas

dikonversikan menjadi tanah timbunan, sehingga tinggi timbunan *surcharge* adalah 1,024 m. Tinggi timbunan awal 6,024 m, dengan tinggi timbunan

rencana 5 m. Besarnya penurunan akibat beban awal sebesar 6,024 m yaitu 1,556 m, serta waktu kompresi hingga derajat konsolidasi 90% selama 2,149 tahun.



Gambar 6. Sketsa instalasi PVD

Dengan menggabungkan metode *preloading* dan PVD berdasarkan waktu kompresi yang diperoleh, penelitian ini mengurangi waktu konsolidasi hingga 90%. Sehingga dapat dibuktikan bahwa waktu untuk mencapai derajat konsolidasi rata-rata 90% dengan pola pemasangan segitiga lebih cepat daripada dengan pola pemasangan persegi panjang.

Setelah digabungkan metode *preloading* dengan PVD, waktu konsolidasi 90% berjalan lebih singkat dari 2.149 tahun menjadi 8 minggu. Terdapat perbedaan waktu yang sangat signifikan. Menurut penelitian sebelumnya, menggabungkan metode *preloading* dan PVD dapat berhasil memperbaiki kondisi tanah lunak (Gui, dkk., 2020; Ayeldeen, dkk., 2021). Oleh karena itu, prosedur ini sangat direkomendasikan (Kassou, dkk., 2021). Berdasarkan data penurunan, penggabungan prosedur konsolidasi

drainase dan pra-pembebanan telah membantu konsolidasi drainase dan pengurangan penurunan pasca konstruksi (Gui dkk., 2020).

E. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini, setelah dikombinasikan dengan PVD, waktu penurunan tanah dasar hingga mencapai derajat konsolidasi 90% menjadi lebih cepat, yaitu delapan minggu. Oleh karena itu, rencana pemasangan PVD yang terbaik adalah pola segitiga dengan jarak 3 meter. Pada ruas jalan tol dari Palembang hingga Indralaya, Sumatera Selatan, pendekatan *preloading* gabungan dengan PVD terbukti bermanfaat dalam mempercepat proses penurunan tanah dasar. Penelitian ini mengimplikasikan bahwa metode ini dapat menjadi pilihan metode perbaikan tanah lunak untuk mempercepat penurunan tanah dasar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada PT. Hutama Karya (HKJT) dan HK, pemilik dan kontraktor utama, yang membantu dalam pengumpulan data.

DAFTAR PUSTAKA

- Amalindo, H., Saggaff, A., & Arliansyah, J. (2019). Infrastructure Development of Road Network for Regional Development Based on Accessibility Concept, *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 9(5), 1592–1599.
<https://doi.org/10.18517/ijaseit.9.5.4202>
- Archenita, D., Natalia, M., Hamid, D., & Misriani, M. (2016). Perkuatan Tanah Dengan Vertical Drain (Studi Kasus Sawahlunto), *Rekayasa Sipil*, XIII(2), 13–21.
<https://shorturl.at/cpvCn>
- Archenita, D., Misriani, M., & Refnaldo, A. (2023). Effect of Installation Pattern of Prefabricated Vertical Drain (PVD) on Degree of Consolidation in Soft Soils, *Fondasi : Jurnal Teknik Sipil*, 12(1), 110–120.
<https://doi.org/10.36055/fondasi>
- Ayeldeen, M., Tschuchnigg, F., & Thurner, R. (2021). Case Study on Soft Soil Improvement Using Vertical Drains-field Measurements and Numerical Studies, *Arabian Journal of Geosciences*, 14(5), 1–10.
<https://doi.org/10.1007/s12517-021-06701-7>
- Barron, R. A. (1948). Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells by Drain Wells, *Transactions of The American Society of Civil Engineers*, 113(1), 718–742.
<https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006098>
- Berawi, M. A., Zagloel, T. Y., Miraj, P., & Mulyanto, H. (2017). Producing Alternative Concept for the Transsumatera Toll Road Project Development using Location Quotient Method, *Procedia Engineering*, 171, 265–273.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.334>
- Bergado, D. T., Jamsawang, P., Kovittayanon, N., Baez, F., & De Zwart, P. T. (2021). Vacuum-PVD Improvement: a Case Study of The Second Improvement of Soft Bangkok Clay on The Subsiding Ground, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7(4), 1–20.
<https://doi.org/10.1007/s40891-021-00339-x>
- Bhosle, S., & Deshmukh, V. (2021). Experimental Studies on Soft Marine Clay Under Combined Vacuum and Surcharge Preloading With PVD, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(4), 461–470.
<https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1496004>
- Cascone, E., & Biondi, G. (2013). A Case Study on Soil Settlements Induced by Preloading and Vertical Drains, *Geotextiles and Geomembranes*, 38, 51–67.
<https://doi.org/10.1016/j.geotexme.2013.05.002>
- Chrismaningwang, G., Hardiyatmo, H. C., Adi, A. D., & Fathani, T. F. (2020). The Effect of Incremental Confining Pressure on The Hydraulic Properties of PVD, *International Journal of Geomate*, 19(73), 41–48.
<https://doi.org/10.21660/2020.73.40003>

- Dermawan, H., Hutapea, B. M., Susila, E., & Irsyam, M. (2021). Finite Element Simulation of Vacuum Preloading at Palembang – Indralaya Toll Project, *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 53(4), 736-753.
<https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.4.10>
- Espinosa-Santiago, A. L., & López-Acosta, N. P. (2020). Performance Monitoring and Numerical Assessment of a Test Embankment With Preloading and Vertical Drains on Texcoco Lacustrine soft Clays, *Geotextiles and Geomembranes*, 48(4), 546–560.
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.03.001>
- Fatmawati, R. E., Putra, P. P., & Nurtjahjaningtyas, I. (2023). Soil Improvement and Embankment Stability Using A Combination of Preloading and Prefabricated Vertical Drain (PVD), *Inersia Informasi dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur*, 19(1), 83–92.
<https://doi.org/10.21831/inersia.v19i1.58658>
- Federal Highway Administration - FHWA. (1986). *Vol.I: Engineering Guidelines Prefabricated Vertical Drains*.
<http://www.vulcanhammer.org>.
- Ghazi, A. B., Fitra, H. A. & Persada, C. (2021). Identification of Changes in The Morphological Space Structure of Bandar Lampung City Using Overlay Geographic Information System Analysis, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, UKICoSTE2020, 739, 1-10.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/739/1/012092>
- Gui, Y., Liu, S., Qin, X., & Wang, J. (2020). A Case Study of Combined Drainage Consolidation-Preloading Methods For a Highway Subgrade on Peat Soils, *Advances in Civil Engineering*, 1-10.
<https://doi.org/10.1155/2020/8816619>
- Hamim, O. F., Hossain, M. S., & Hadiuzzaman, M. (2021). Developing Empirical Model With Graphical Tool to Estimate and Predict Capacity of Rural Highway Roundabouts, *International Journal of Transportation Science and Technology*, 11(4), 726-737.
<https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2021.10.002>
- Hansbo, S. (1981). Consolidation of Fine-Grained Soils By Prefabricated Drains, *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 3, 677–682.
[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(84\)91874-6](https://doi.org/10.1016/0148-9062(84)91874-6)
- Hore, R., Chakraborty, S., & Ansary, M. A. (2020). A Field Investigation to Improve Soft Soils Using Prefabricated Vertical Drain, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 7(2), 127–155.
<https://doi.org/10.1007/s40515-019-00093-8>
- Hübner, B., & Mahler, A. (2020). Analysis of Seismic Fragility Functions of Highway Embankments, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(4), 1162–1169.
<https://doi.org/10.3311/PPci.16483>
- Ifediniro, C., & Ekeocha, N. E. (2022). Performance of Cement-Stabilized Weak Subgrade For Highway Embankment Construction in Southeast Nigeria, *International Journal of Geo-Engineering*, 13(1), 1–16.
<https://doi.org/10.1186/s40703-021-00166-z>

- Indraratna, B., Malisetty, R. S., Nair, L., & Rujikiatkamjorn, C. (2023). Instrumentation and Data Interpretation in Transportation Geotechnics, *Indian Geotechnical Journal*, 54(1), 40–62.
<https://doi.org/10.1007/s40098-023-00765-w>
- Kassou, F., Benbouziyane, J., Ghafiri, A., & Sabihi, A. (2021). A New Approach to Analyse, the Consolidation of Soft Soils, Improved by Vertical Drains and Submitted to Progressive Loading, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(1), 51–59.
<https://doi.org/10.1007/s12205-020-0060-z>
- Meilani, A., Ahmad, R., & Fikri, F. (2020). Analysis of Settlement Prediction Due to Preloading and Vertical Drain Applications on Runway Construction, *E3S Web of Conferences*, 4th ICEEDM 2019, 156, 1–5.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015602002>
- Muhammed, J. J., Jayawickrama, P. W., Teferra, A., & Ozer, M. A. (2020). Settlement of a Railway Embankment on PVD-improved Karakore Soft Alluvial Soil, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(5), 1015–1027.
<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.03.004>
- Panchal, S., & Shrivastava, A. K. (2022). Landslide Hazard Assessment Using Analytic Hierarchy Process (AHP): A Case Study of National Highway 5 in India, *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3), 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.021>
- Peng, H., Shi, N., & Wang, G. (2023). Remote Sensing Traffic Scene Retrieval Based on Learning Control Algorithm For Robot Multimodal Sensing Information Fusion and Human-machine Interaction and Collaboration, *Frontiers in Neurorobotics*, 17, 1–15.
<https://doi.org/10.3389/fnbot.2023.1267231>
- Scholte, W. J., Zegelaar, P. W. A., & Nijmeijer, H. (2022). A Control Strategy For Merging a Single Vehicle Into a Platoon at Highway On-ramps, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 136(4).
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103511>
- Suardi, E., Liliwarti, L., Misriani, M., & Iqbal, I. (2021). Perbaikan Tanah Lempung Lunak dengan Metode Preloading di Jalan Tol Palembang – Indralaya STA 1 + 670, *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 10(2), 191–201.
<https://doi.org/10.36055/fondasi.v10i2.12545>
- Wu, J., Xuan, Y., Deng, Y., Li, X., Zha, F., & Zhou, A. (2021). Combined Vacuum and Surcharge Preloading Method to Improve Lianyungang Soft Marine Clay for Embankment Widening Project: A Case, *Geotextiles and Geomembranes*, 49(2), 452–465.
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.10.013>
- Zhafirah, A., Somantri, A. K., Permana, S., & Roestaman, R. (2019). Study of PVD Effect on Modulus of Subgrade Reaction, *Journal of Physics: Conference Series*, 1402(2), 1–4.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1402/2/022007>
- Zhafirah, A., Syahril, S., & Somantri, A. K. (2020). Experimental Test of Concrete Plate Deflection on Soft Soil Improved by a Prefabricated

Vertical Drain, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 732, 1-5.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/732/1/012019>



© 2024 Siklus Jurnal Teknik Sipil
Hak cipta dilindungi undang-undang. Artikel ini merupakan artikel akses terbuka yang didistribusikan berdasarkan ketentuan Lisensi CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)