

# PERCEPATAN PROSES KONSOLIDASI TANAH LEMPUNG DENGAN APLIKASI TEKANAN VAKUM DAN DRAINASE VERTIKAL

Arhab<sup>1)</sup>, Nurly Gofar<sup>2\*)</sup>

<sup>1)</sup> Mahasiswa, Program Studi Magister Teknik Sipil, Pascasarjana Universitas Bina Darma,

<sup>2)</sup> Dosen, Program Studi Magister Teknik Sipil, Pascasarjana Universitas Bina Darma,

Jalan A Yani No 3 Palembang 30111

\*Korespondensi: [nurlygofar@binadarma.ac.id](mailto:nurlygofar@binadarma.ac.id)

## ABSTRACT

This paper presents the performance of PVD and vacuum consolidation as ground improvement method at the construction of Kayu Agung – Palembang Toll Road. The analysis was based on observation data collected between STA 00+000 and STA 09+000. The PVD was installed to a depth where the cone resistance of 80 kPa was achieved. Thus, the length of PVD varies from 5 to 13 m while the actual depth of clay deposit could reach 20 m. As many as 42 settlement plate data were collected and analyzed using Asaoka method to obtain the predicted final settlement, the coefficient of consolidation and the time to reach 90% degree of consolidation. The results were compared with the duration of vacuum consolidation application and the recorded settlement when the vacuum pressure was stopped i.e., when settlement plate recorded no differential settlement in three readings. The duration of vacuum consolidation application generally longer than the  $t_{90}$  predicted by the method and the actual settlement was larger than the predicted final settlement. This study concluded that the variation of the  $t_{90}$  and the magnitude of settlement at  $t_{90}$  have close relationship with the length of PVD and the condition of the soil layer.

**Keyword :** *Soft soil, vertical drainage, vacuum consolidation, settlement, rate of consolidation*

## 1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur di Indonesia yang pesat akhir-akhir ini memberikan dampak pada pemanfaatan lahan yang tidak ideal untuk pekerjaan konstruksi. Sebagai contoh sebagian besar pembangunan jalan bebas hambatan (Tol) di Sumatera Selatan dilaksanakan di atas rawa rawa sehingga tantangan pembangunan cukup besar. Misalnya dari 42,5 km panjang ruas Jalan Tol Kayu Agung – Palembang, 22 km berada di atas tanah rawa.

Di bawah rawa-rawa ini terdapat deposit tanah lempung lunak atau bahkan tanah organik dan gambut dengan kedalaman antara 12 dan 20 m. Seperti diketahui, tanah lempung mempunyai daya dukung rendah dan kompresibilitas tinggi serta permeabilitas rendah. Untuk tanah gambut, permeabilitas tanah lebih tinggi namun memiliki kompresibilitas sekunder sehingga waktu penurunan tanah lebih lama.

Pembangunan jalan di atas tanah lempung lunak dapat mengakibatkan keruntuhan dan penurunan yang besar pada tanah dasar serta

deformasi lateral dan vertikal di sekitar timbunan tersebut. Oleh karena itu dalam pembangunan jalan Tol Kayu Agung – Palembang diperlukan perbaikan tanah untuk mengatasi masalah daya dukung dan penurunan yang sangat besar akibat beban timbunan maupun beban jalan tersebut.

Besarnya penurunan tergantung dari kompresibilitas tanah. Rendahnya permeabilitas dan tebalnya deposit tanah lempung pada trase jalan ini menyebabkan proses konsolidasi memerlukan waktu yang cukup lama. Sebaliknya diharapkan bahwa jalan Tol dapat segera di gunakan segera setelah proses pembangunan selesai. Periode waktu pembangunan Jalan Tol adalah rata-rata 2 tahun.

Salah satu persyaratan terkait kriteria perencanaan desain perkerasan jalan tol adalah penurunan yang diizinkan selama masa masa operasional adalah maksimal 10 cm dalam 10 tahun atau kecepatan penurunan maksimum 2 cm per tahun [1]. Dengan demikian diperlukan suatu metode untuk mempercepat proses

konsolidasi supaya sebagian besar (>90%) penurunan terjadi selama masa konstruksi.

Besarnya penurunan ini dapat diatasi dengan metode pembebanan awal (*preloading*) yaitu dengan menggunakan beban timbunan tambahan (*surcharge*) atau tekanan vakum (*vacuum consolidation*) sehingga sebagian besar penurunan terjadi akibat pembebanan awal dan penurunan tanah setelah konstruksi (*post construction*) dapat dikurangi [2].

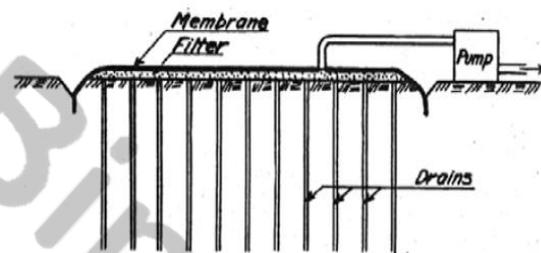
Percepatan penurunan tanah dapat dilakukan dengan memasang drainase vertikal. Salah satu jenis drainase vertikal yang umum digunakan sekarang adalah *prefabricated vertical drain* (PVD). Untuk dapat berfungsi, maka, PVD harus digunakan bersama sama dengan pembebanan awal berupa beban timbunan. Penggunaan beban timbunan bersama sama dengan PVD mempunyai beberapa kelemahan diantaranya penghamparan timbunan secara bertahap memerlukan waktu yang panjang; pembuangan sisa timbunan yang melebihi elevasi rencana; terjadinya keterlambatan dalam pengeluaran air melalui PVD (*drainage resistance*) serta naiknya muka air tanah pada saat penghamparan timbunan [3].

Alternatif dari penggunaan beban timbunan adalah adalah tekanan vakum untuk memicu terjadinya proses konsolidasi tanah di bawah timbunan [4]. Aplikasi tekanan vakum dapat dilakukan dengan memberikan tekanan sebesar 80 KPa atau setara dengan beban surcharge setinggi 4 m terhadap tanah yang mengalami konsolidasi [5]. Dengan demikian kedalaman pemasangan PVD ditentukan berdasarkan kedalaman tanah yang mempunyai tahanan konus sebesar 80 kPa, meskipun dibawahnya masih terdapat lapisan tanah yang mungkin mengalami konsolidasi [6].

Monitoring penurunan tanah di bawah timbunan dilakukan dengan pembacaan angka penurunan harian pada settlement plate dan tekanan air pori pada bacaan piezometer. Hal ini untuk memastikan apakah derajat konsolidasi 90% telah tercapai dan tekanan vakum dapat dihentikan. Data dari settlement plate dapat di analisis menggunakan metode Asaoka (Asaoka, 1978 as in [7]), untuk mendapatkan penurunan total dan koefisien konsolidasi arah horizontal, sedangkan data piezometer digunakan untuk memeriksa derajat konsolidasi yang telah tercapai. Metode Asaoka telah digunakan secara luas, termasuk di Indonesia, untuk menganalisis penurunan

tanah aktual berdasarkan data lapangan. Banyak publikasi yang menyatakan bahwa penurunan akhir yang di prediksi berdasarkan data pengamatan penurunan awal di lapangan menggunakan metode Asaoka lebih mendekati penurunan aktual [8, 9, 10].

Settlement plate ditempatkan dipermukaan tanah yang mengalami konsolidasi, sedangkan piezometer biasanya ditempatkan di tengah lapisan tanah yang mengalami tekanan air pori. Gambar 1 memperlihatkan diagram pemasangan PVD dan tekanan vakum pada lapisan tanah lunak.



Gambar 1. Perbaikan tanah dengan PVD dan tekanan vakum (Sumber: Dam et al., 2006 [4])

Studi mengenai efektifitas penggunaan tekanan vakum sebagai beban awal pada perbaikan tanah dengan PVD dipelajari oleh [11]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi PVD dan tekanan vakum secara efektif mempercepat proses konsolidasi menjadi hanya 83 hari. Selain itu, terjadi peningkatan kekuatan geser tanah, dalam hal ini kohesi meningkat sebanyak 2 – 3 kali. Penelitian oleh [12] untuk kasus jalan tol Semarang Demak menunjukkan bahwa penggunaan tekanan vakum sebagai pembebanan awal mengurangi tinggi timbunan yang diperlukan sebanyak 30%. Selanjutnya, penelitian oleh [13] berdasarkan perhitungan balik menggunakan metode Asaoka menyimpulkan bahwa perbaikan tanah dengan PVD dan vakum meningkatkan koefisien kecepatan konsolidasi sampai 10 – 15 kali terhadap nilai  $c_v$  yang didapatkan di laboratorium.

Perkiraan penurunan total merupakan tantangan dalam penggunaan kombinasi PVD dan tekanan vakum karena penyebaran beban vakum di bawah PVD dan konsolidasi yang terjadi pada lapisan dibawah PVD tidak dapat diketahui dengan pasti. Namun penelitian yang dilakukan oleh [6] menggunakan studi kasus di Shanghai China menunjukkan bahwa

tekanan vakum yang di aplikasikan dapat tersebar dengan baik di bawah lapisan PVD. Walaupun demikian, penelitian ini juga menunjukkan bahwa penurunan tanah akibat konsolidasi lapisan tanah di bawah PVD memberikan kontribusi terhadap penurunan total sehingga penurunan aktual lebih besar daripada yang diprediksi menggunakan metode Asaoka.

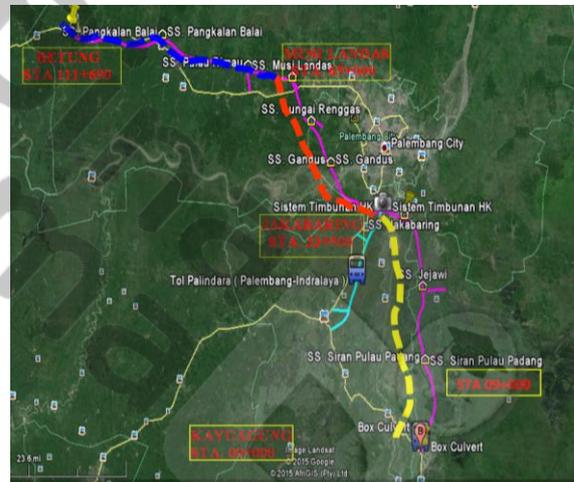
Meskipun penggunaan tekanan vakum dapat mengeliminir permasalahan berkaitan dengan tahanan drainase (*drainage resistance*) yang diakibatkan oleh tidak tegak lurusnya PVD, namun masalah efek gangguan di sekitar PVD (*smear*) masih harus diperhatikan. Gangguan ini dapat menyebabkan pengurangan kecepatan konsolidasi. Studi mengenai pengaruh *smear* terhadap kecepatan konsolidasi dilakukan secara numerik oleh [14] serta [15]. Gofar dkk. menyarankan untuk estimasi menggunakan analisis numerik digunakan ratio *smear* ( $d_s/d_e$ ) sebesar 7.

Pengaruh adanya lensa pasir dalam lapisan terkonsolidasi dipelajari secara numerik oleh [16]. Hasilnya menunjukkan pengaruh yang signifikan dari lensa dan karakteristiknya dalam proses disipasi tekanan air pori berlebih. Pada umumnya keberadaan lensa pasir mempercepat proses konsolidasi.

Kombinasi pembebanan awal menggunakan tekanan vakum dan percepatan proses konsolidasi menggunakan PVD merupakan metode yang dipilih untuk perbaikan tanah lunak pada beberapa ruas pembangunan jalan tol di Sumatera Selatan termasuk jalan Tol Palembang - KayuAgung. Beberapa studi telah dilakukan mengenai perbaikan tanah di ruas ini antara lain oleh [17] di STA 44+660 sampai STA 44+780 yang menyimpulkan bahwa pada saat tekanan pori dihentikan tanah telah mengalami konsolidasi hampir 100% berdasarkan pengukuran tekanan air pori. Penelitian ini juga menyimpulkan adanya kenaikan daya dukung tanah setelah perbaikan berdasarkan hasil pengujian sondir.

Berdasarkan latar belakang masalah tersebut diatas, maka perlu diteliti apakah aplikasi tekanan vakum dan PVD dapat secara efektif mempercepat proses konsolidasi tanah lempung yang menjadi pondasi jalan tol Kayu Agung – Palembang. Dalam hal ini dilakukan penelitian terhadap hasil observasi penurunan menggunakan *settlement plate* dan analisis menggunakan metode Asaoka. Meskipun

metode Asaoka telah digunakan secara luas untuk prediksi penurunan tanah lunak di bawah timbunan, namun penelitian umumnya dilakukan secara independent untuk satu atau beberapa titik pengamatan sehingga pengaruh kondisi tanah tidak dapat di evaluasi. Penelitian ini dilakukan pada ruas jalan Tol KayuAgung – Palembang antara STA 00 + 000 dan STA 09 + 000 (Gambar 2). Data penurunan dari 42 titik pengamatan yang di dapat dari 14 lokasi (dalam hal ini disebut cell) sepanjang ruas jalan tol tersebut dimana setiap cell terdiri dari 3 titik settlement plate (SP) yang terletak di sisi kiri, tengah dan kanan timbunan jalan. Jarak antara cell berkisar antara 65 – 120 m.



Gambar 2 Lokasi Penelitian (Sumber: Google Earth)

## 2. LANDASAN TEORI

### 2.1. Perbaikan tanah dengan PVD dan Tekanan Vakum

Dalam proses konsolidasi secara alami, panjang pengaliran air di kontrol oleh tebal lapisan tanah yang terkonsolidasi dan keberadaan lapisan pengaliran. Makin panjang alur pengaliran air pori, makin panjang durasi proses konsolidasi. Percepatan proses konsolidasi dapat dilakukan dengan memendekkan aliran air [18]. Salah satu metode yang umum digunakan adalah pemasangan drainase vertikal yang dikombinasikan dengan tekanan vakum. Ada banyak jenis drainase vertikal, namun yang paling sering digunakan adalah *prefabricated vertical drain* (PVD). PVD berfungsi mengalirkan air pori di dalam tanah menuju ke permukaan sehingga tekanan air pori yang

berlebih (*excess pore water pressure*) akibat penambahan beban dapat dikurangi.

Besarnya penurunan yang akan terjadi akibat konsolidasi dapat dihitung dengan menggunakan teori konsolidasi Terzaghi 1-D menggunakan rumus berikut:

$$S_f = m_v \Delta\sigma H \quad (1)$$

dimana  $m_v$  adalah koefisien kompresibilitas,  $\Delta\sigma$  adalah penambahan beban dan  $H$  adalah tebal lapisan terkonsolidasi. Lamanya proses konsolidasi dapat dihitung sebagai berikut:

$$t = c_v T_v / H_d^2 \quad (2)$$

dimana  $c_v$  adalah koefisien kecepatan konsolidasi dalam  $m^2/detik$ ,  $H_d$  adalah panjang aliran air  $T_v$  adalah faktor waktu yang ditentukan oleh derajat konsolidasi  $U_v$ .

Seperti diperlihatkan pada Gambar 1, pemasangan PVD pada lapisan terkonsolidasi menyebabkan aliran air kearah horizontal. Dengan demikian panjang aliran sesuai dengan jarak dan pola pemasangan PVD. Untuk rumus (2) di atas, maka subscript  $v$  digantikan dengan  $h$ , sedangkan panjang aliran digantikan dengan panjang aliran dalam arah horizontal:

$$t = c_h T_h / H_d^2 \quad (3)$$

Derajat konsolidasi adalah:

$$U_h = 1 - \exp(-8T_h/\mu) \quad (4)$$

dimana  $c_h$  adalah koefisien konsolidasi dalam arah horizontal,  $t$  adalah waktu konsolidasi. Variabel  $\mu$  dalam persamaan (4) disebut juga faktor efisiensi yaitu faktor yang mengatur efek kumulatif dari jarak PVD. Untuk kondisi tanpa gangguan, nilai  $\mu$  dapat dihitung dengan rumus dibawah ini (Hansbo, 1991 dalam [19]).

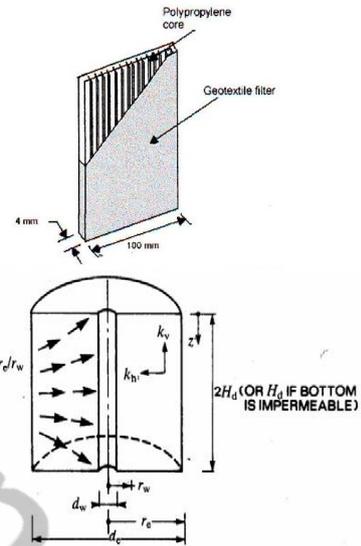
$$\mu = \ln n - 3/4 \quad (4)$$

Seperti diperlihatkan pada Gambar 3,  $n$  adalah perbandingan diameter efektif silinder tanah ( $D_e$ ) terhadap diameter drainase ( $d_w$ ) atau  $n = D_e/d_w$ . Untuk pola segitiga  $D_e = 1.05s$ , sedang untuk pola segi empat  $D_e = 1.13s$  dimana  $s$  adalah jarak PVD (Gambar 4). Rumus rumus ini diberikan untuk drainase vertical dengan penampang bentuk lingkaran (silinder). Untuk PVD yang berbentuk persegi panjang, maka digunakan diameter efektif yaitu:

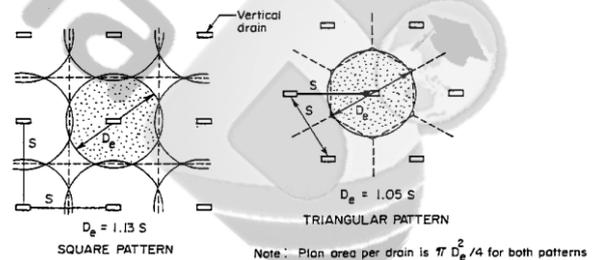
$$d_w = \sqrt{\frac{4bh}{\pi}}$$

$$d_w = \dots (5)$$

dimana  $b$  dan  $h$  adalah tebal dan lebar PVD.



Gambar 3. PVD dan bidang pengaruh drainase vertikal untuk kondisi ideal [16].



Gambar 4. Hubungan antara diameter efektif silinder tanah dengan jarak PVD [17].

## 2.2 Metode Asaoka

Prediksi penurunan total yang akan terjadi pada tanah yang diperbaiki dengan PVD dikembangkan oleh Asaoka pada tahun 1978 berdasarkan pembacaan penurunan awal. Metode grafis ini dikembangkan berdasarkan teori konsolidasi 1-D Terzaghi yang diperbaiki oleh Mikasa pada tahun 1963. Dalam teori ini penurunan ( $S$ ) pada waktu ( $t$ ) berbanding lurus dengan derajat konsolidasi. Maka  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_{n-1}, S_n$  pada waktu  $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, (n-1)\Delta t, n\Delta t$  dinyatakan secara matematis sebagai berikut:

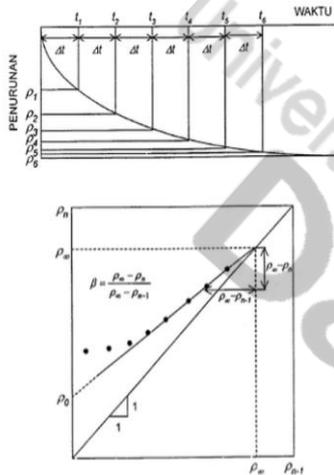
$$S_n = \beta_0 + \sum_{s=1}^n \beta_s S_{n-s} \quad (6)$$

dimana  $\beta_0$  adalah penurunan awal dan  $\beta_n$

adalah suatu ratio. Untuk  $s = 1$ , orde aproksimasi pertama adalah:

$$S_n = \beta_0 + \beta_1 S_{n-1} \quad (7)$$

Jika nilai  $S_n$  di plot pada sumbu vertikal dan nilai  $S_{n-1}$  di plot pada sumbu horisontal, maka persamaan (9) membentuk garis lurus. Dengan demikian,  $\beta_0$  adalah perpotongan terhadap sumbu vertikal,  $\beta_1$  adalah kemiringan garis tersebut terhadap horizontal (Gambar 6).



Gambar 6 Kurva penurunan dan plot Asaoka [16]

Berdasarkan teori, bila penurunan maximum sudah tercapai maka  $S_n$  akan sama dengan  $S_{n-1}$ . Garis  $S_n = S_{n-1}$  membentuk sudut  $45^\circ$  terhadap horizontal. Penurunan akhir didapatkan dengan mengganti  $S_n = S_{n-1} = S_f$  pada persamaan (9) sehingga:

$$S_f = \beta_0 + \beta_1 S_f \quad \text{atau} \quad S_f = \frac{\beta_0}{1 - \beta_1} \quad (8)$$

Menurut Teori Terzaghi's, derajat konsolidasi bisa dihitung berdasarkan bacaan penurunan pada waktu tertentu ( $S_t$ ) dan penurunan total yang diprediksi menggunakan metode Asaoka ( $S_f$ ) sebagai berikut:

$$U_v = \frac{S_t}{S_f} \times 100\% \quad (9)$$

Koefisien konsolidasi horizontal ( $c_h$ ) dapat dihitung berdasarkan diagram Asaoka menggunakan persamaan berikut:

$$-\frac{\ln \beta_1}{\Delta t} = \frac{8c_h}{d_r^2 \alpha} + \frac{\pi^2 c_v}{4H^2} \quad (10)$$

dimana  $d_e$  adalah seperti dijelaskan sebelumnya,  $H$  adalah panjang aliran. Koefisien konsolidasi vertikal ( $c_v$ ) di dapat dari pengujian laboratorium;  $\Delta t$  adalah interval

waktu, sedangkan  $\alpha$  diberikan dalam rumus berikut, dimana  $n$  seperti dijelaskan sebelumnya.

$$\alpha = n^2 \ln n / (n^2 - 1) - (3n^2 - 1) / 4n^2 \quad (11)$$

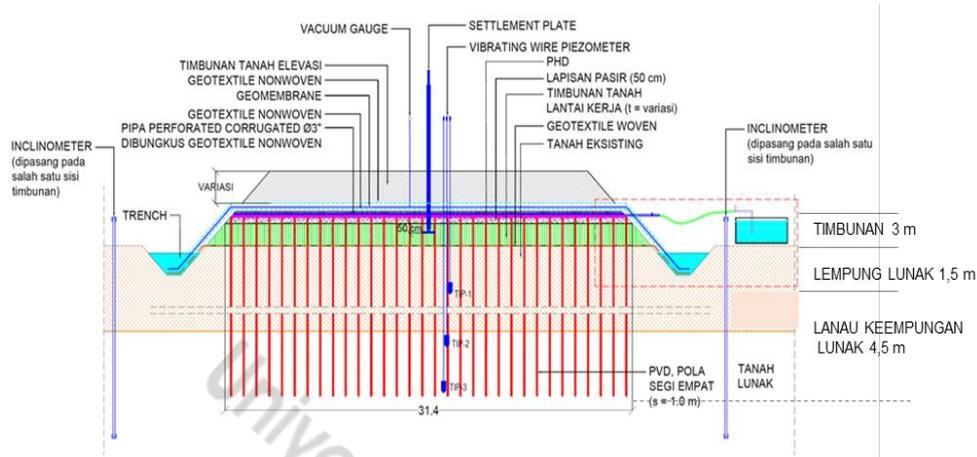
### 3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini berupa studi kasus berkaitan dengan proyek Pembangunan Jalan Tol Kayu Agung – Palembang pada STA. 00 + 000 sampai STA. 09 + 000. Lokasi penelitian diberikan pada Gambar 2. Data kondisi tanah pondasi dan tanah timbunan, geometri timbunan, beban jalan, dan konfigurasi PVD diperoleh dari konsultan perencana sedangkan data instrumentasi dan data observasi lapangan didapatkan dari kontraktor pelaksana dan konsultan pengawas.

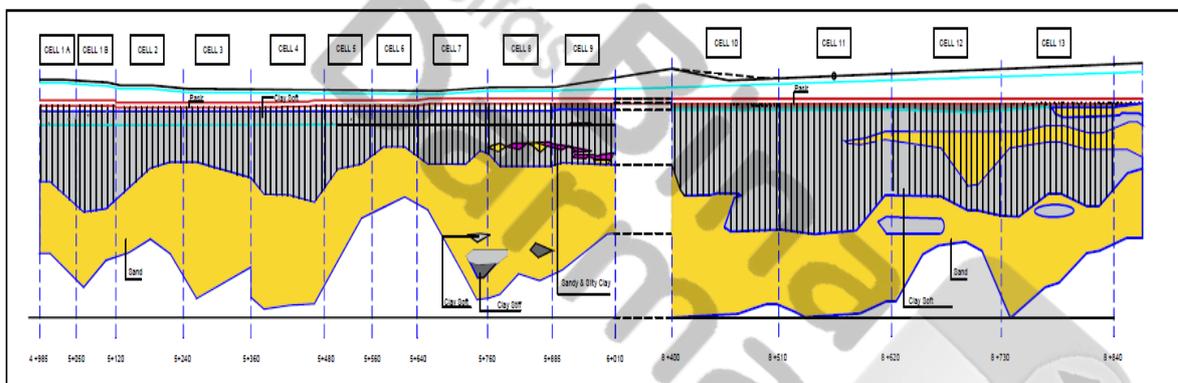
Penampang timbunan jalan yang ditinjau beserta posisi instrumentasi yang digunakan diperlihatkan dalam Gambar 7. Gambar 8 memperlihatkan stratifikasi tanah sepanjang ruas jalan yang ditinjau yaitu STA 00 + 000 sampai STA 09 +000 beserta panjang PVD pada setiap titik pengamatan.

Seperti dijelaskan sebelumnya, penelitian ini menggunakan data observasi penurunan dari 14 titik pengamatan (dalam hal ini disebut Cell) sepanjang ruas jalan tol tersebut dimana setiap cell terdiri dari 3 titik settlement plate (SP) yang terletak di sisi kiri, tengah dan kanan timbunan jalan. Jarak antara sel berkisar antara 65 – 120 m. Total data yang digunakan dalam penelitian ini adalah 42 titik pengukuran.

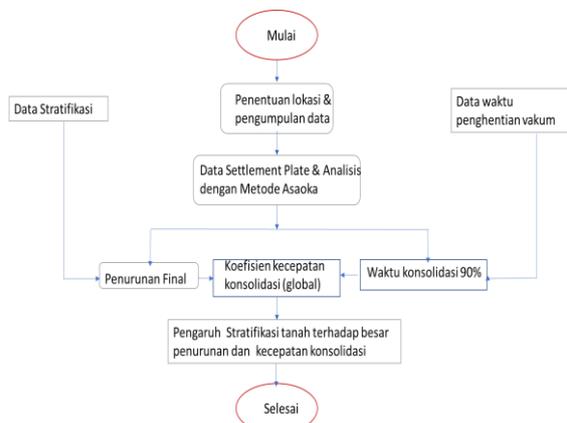
Prediksi besarnya dan waktu penurunan dilakukan berdasarkan data observasi menggunakan *settlement plate* yang di analisis menggunakan metode Asaoka seperti dijelaskan pada Bagian 2.2. Selanjutnya prediksi besarnya dan waktu penurunan yang di prediksi dengan metode Asaoka dibandingkan dengan kondisi aktual yaitu durasi aplikasi tekanan vakum serta besarnya penurunan yang dicatat oleh settlement plate pada saat tekanan vakum dihentikan. Hasil observasi ini di evaluasi dan dihubungkan dengan kondisi tanah (stratifikasi) pada setiap cell. Secara rinci diagram penelitian dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 7 Penampang timbunan yang ditinjau dan posisi instrumentasi



Gambar 8 Stratifikasi tanah dan panjang PVD sepanjang ruas jalan yang ditinjau



Gambar 9 Bagan Alir Penelitian

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian dan pembahasan di paparkan dengan urutan sebagai berikut (1) evaluasi stratifikasi tanah, (2) analisis grafik penurunan terhadap tekanan vakum dan tekanan air pori yang dicatat oleh piezometer (3) analisis hasil perhitungan penurunan total berdasarkan metode Asaoka, (4) analisis hasil

perhitungan waktu konsolidasi, dan (5) analisis hasil perhitungan kembali koefisien kecepatan konsolidasi menggunakan metode Asaoka.

##### 4.1. Evaluasi stratifikasi tanah

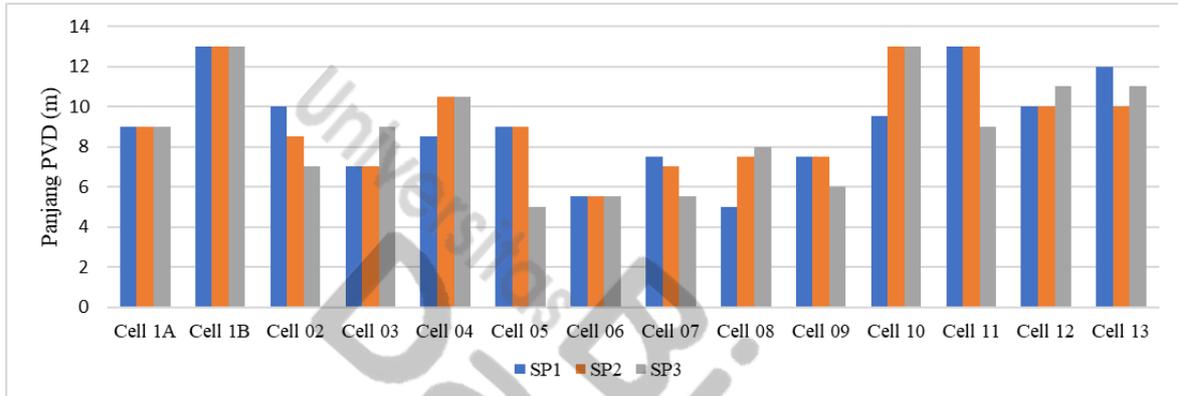
Stratifikasi tanah sepanjang ruas jalan yang diteliti diperlihatkan pada Gambar 8. Secara umum terdapat dua lapisan tanah yaitu lempung lunak (abu abu), dan pasir (kuning). Seperti dijelaskan pada Bagian 1, untuk perbaikan tanah dengan PVD dan tekanan vakum, pemasangan PVD dilakukan sampai kedalaman dimana nilai konus mencapai 80 kPa. Gambar 10 memperlihatkan panjang PVD yang digunakan bervariasi dari 5 m sampai 13 m sedangkan tebal lapisan lempung sendiri bervariasi dari 12 sampai 20m.

Berdasarkan [5] lapisan tanah lempung yang berada di bawah ujung PVD dapat mengalami proses konsolidasi meskipun dengan kompresibilitas yang lebih rendah

karena memiliki konsistensi yang lebih padat. Hal ini dapat menyebabkan proses konsolidasi tanah tetap berlangsung setelah jalan digunakan.

Pada Cell 8 dan 9 terdapat lapisan lensa yang umumnya memiliki koefisien

permeabilitas lebih tinggi serta memperpendek aliran air selama proses konsolidasi. Dengan demikian proses konsolidasi pada lapisan ini berlangsung lebih cepat [20].



Gambar 10 Panjang PVD yang digunakan pada setiap titik pengamatan

#### 4.2. Penurunan Tanah

Gambar 11 a-c memperlihatkan tekanan vakum, penurunan tanah yang di catat oleh *settlement plate* pada SP1 cell 1a dan tekanan air pori yang dicatat oleh *piezometer*. Untuk proses perbaikan tanah yang baik maka ke tiga grafik tersebut harus memiliki keterkaitan satu sama lain [21]. Untuk SP1 cell 1a, dapat dilihat dari Gambar 11a, tekanan vakum yang diaplikasikan cukup constant pada 80 kPa. Tekanan ini tercapai pada dua hari setelah mulai aplikasi. Gambar 11b memperlihatkan bahwa *settlement plate* bereaksi terhadap tekanan vakum yang diberikan. Terlihat pada beberapa waktu (misalnya hari ke 26 sampai 29) dimana tekanan vakum terganggu, maka bacaan *settlement plate* juga terganggu, namun tidak begitu mempengaruhi bacaan selanjutnya. Grafik penurunan mempunyai bentuk yang baik karena beban yang diberikan stabil. Demikian juga Gambar 11c menunjukkan reaksi yang baik dari *piezometer* yang terletak pada kedalaman 5 m dimana tekanan air pori hampir konstan pada 30 kPa. Terdapat gangguan bacaan pada hari ke 26 dan 28.

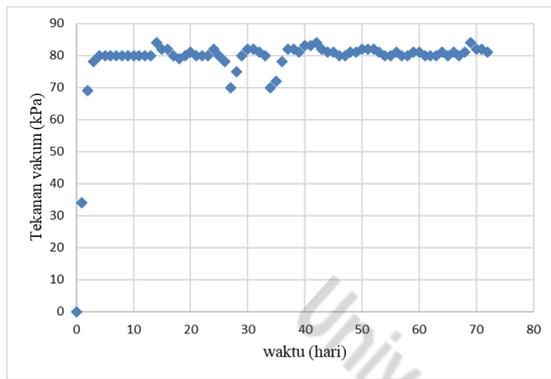
#### 4.3. Analisis Data Penurunan dengan Metode Asaoka

Metode Asaoka digunakan untuk memperkirakan besarnya penurunan tanah dan

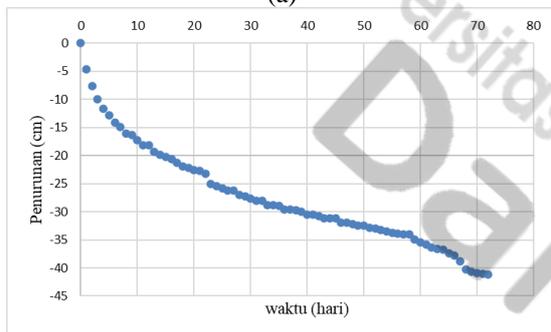
waktu yang diperlukan untuk mencapai derajat konsolidasi yang ditentukan. Dalam hal ini waktu mencapai derajat konsolidasi 90% menjadi indikasi waktu untuk menghentikan tekanan vakum. Namun pada lokasi yang diteliti, ditentukan bahwa tekanan vakum baru dapat dihentikan bila perubahan bacaan *settlement plate* sangat kecil selama tiga hari.

Gambar 12 memperlihatkan grafik Asaoka untuk SP1 cell 1a. Dari Gambar 12 didapatkan penurunan total sebesar 39 cm dan waktu penurunan sampai derajat konsolidasi 90% selama 58 hari dengan asumsi  $c_h = 2 c_v$  dari laboratorium.

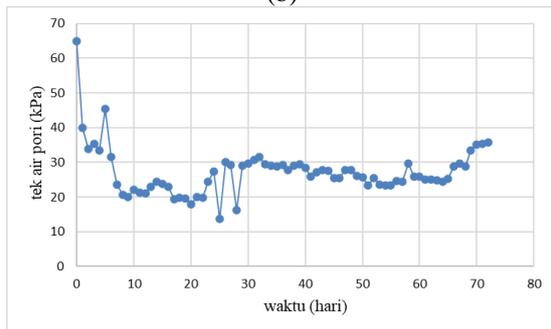
Besarnya penurunan total yang diprediksi dengan Metode Asaoka untuk semua titik yang diteliti dibandingkan dengan besarnya penurunan yang dicatat pada saat penghentian tekanan vakum diperlihatkan pada Gambar 13. Penurunan total bervariasi kurang dari 10 cm sampai 76.24 cm. Terdapat korelasi antara panjang PVD dengan besarnya penurunan total misalnya penurunan yang lebih kecil terjadi pada cell 05 – cell 09 sedangkan penurunan yang lebih besar terjadi pada cell 01 – 04 dan cell 10 – 13. Hal ini berbanding lurus dengan panjang PVD untuk masing masing cell.



(a)

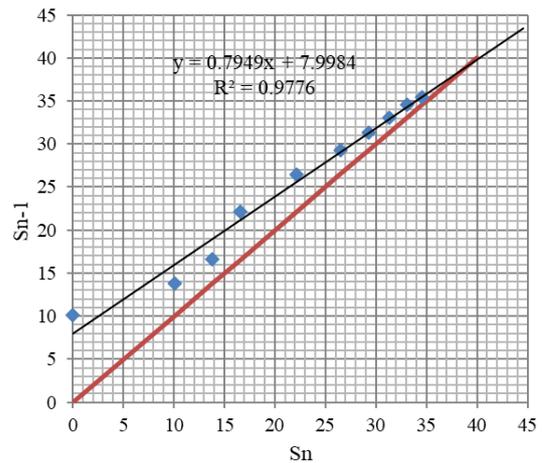


(b)



(c)

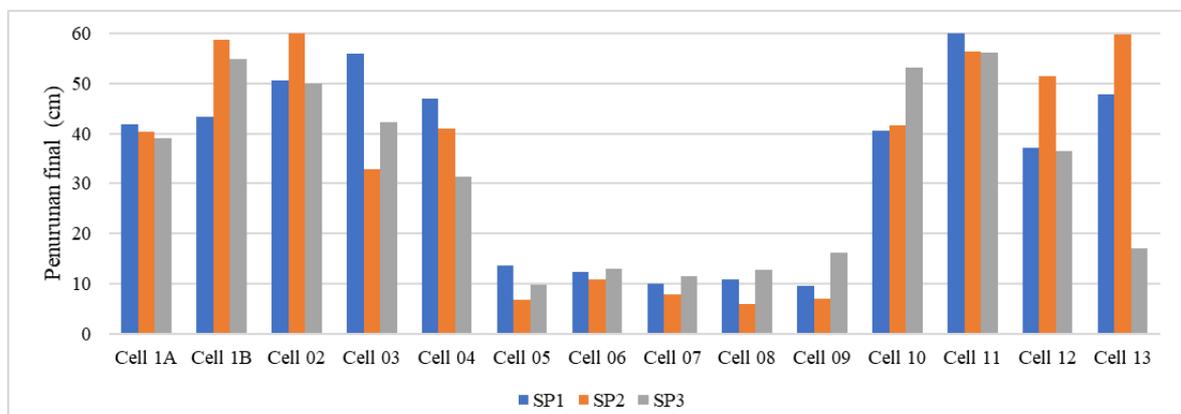
Gambar 11, Grafik (a) tekanan vakum, (b) penurunan yang dicatat oleh settlement plate dan (c) tekanan air pori yang dicatat oleh piezometer



Gambar 12 Grafik Asaoka untuk titik SP1 Cell 1a.

Penghentian tekanan vakum dilakukan serentak pada SP1-SP3 untuk setiap cell sehingga perbandingan besarnya penurunan yang dicatat oleh settlement plate saat penghentian vakum terhadap penurunan maximum yang diprediksi dengan Metode Asaoka antara SP1-SP3. Dari Gambar 13 dapat dilihat bahwa penurunan aktual yang dicatat pada saat penghentian tekanan vakum lebih besar daripada penurunan yang diprediksi dengan metode Asaoka kecuali cell 4, 8, 9, dan 10. Untuk cell 8, 9, 10 mungkin disebabkan oleh adanya lapisan lensa pasir yang memiliki kompresibilitas yang lebih tinggi dari prediksi.

Hasil penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian [6] dimana penurunan aktual lebih besar daripada estimasi menggunakan Metode Asaoka disebabkan oleh konsolidasi lapisan di bawah PVD.



Gambar 13 Besarnya penurunan total untuk semua titik pengamatan

#### 4.4. Analisis durasi konsolidasi dengan Metode Asaoka

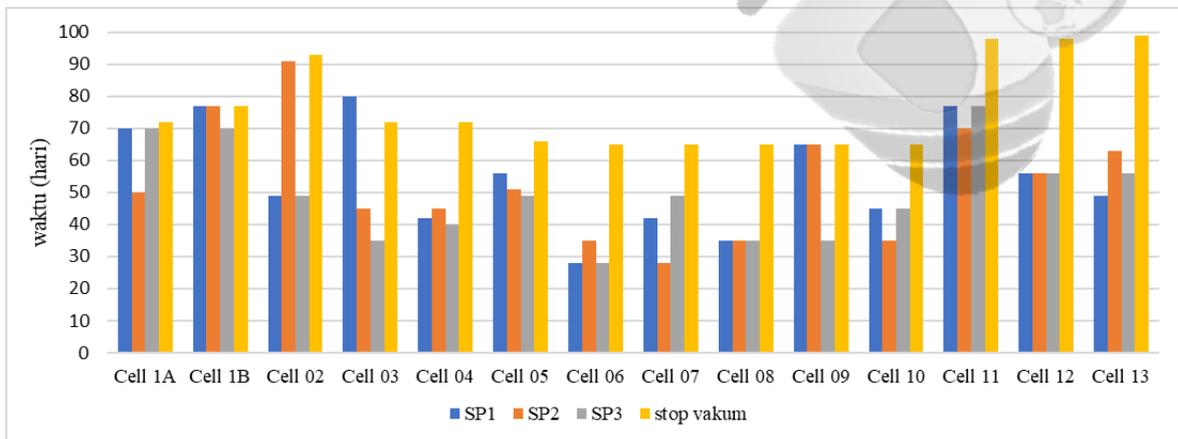
Gambar 14 memperlihatkan prediksi waktu yang diperlukan untuk mencapai 90% konsolidasi dengan menggunakan metode Asaoka dibandingkan dengan waktu penghentian tekanan vakum. Waktu untuk mencapai 90% konsolidasi di prediksi menggunakan metode Asaoka bervariasi dari 28 hari (cell 6) hingga 80 hari (cell 3), sedangkan aplikasi tekanan vakum pada semua titik dihentikan setelah bacaan *settlement plate* tidak memperlihatkan perubahan dalam 3 kali pembacaan yaitu antara 65 hari dan 99 hari. Tidak terdapat korelasi yang kuat antara panjang PVD dengan waktu konsolidasi. Hal ini disebabkan oleh variasi koefisien kecepatan konsolidasi dalam tanah.

#### 4.5. Perhitungan balik koefisien kecepatan konsolidasi global

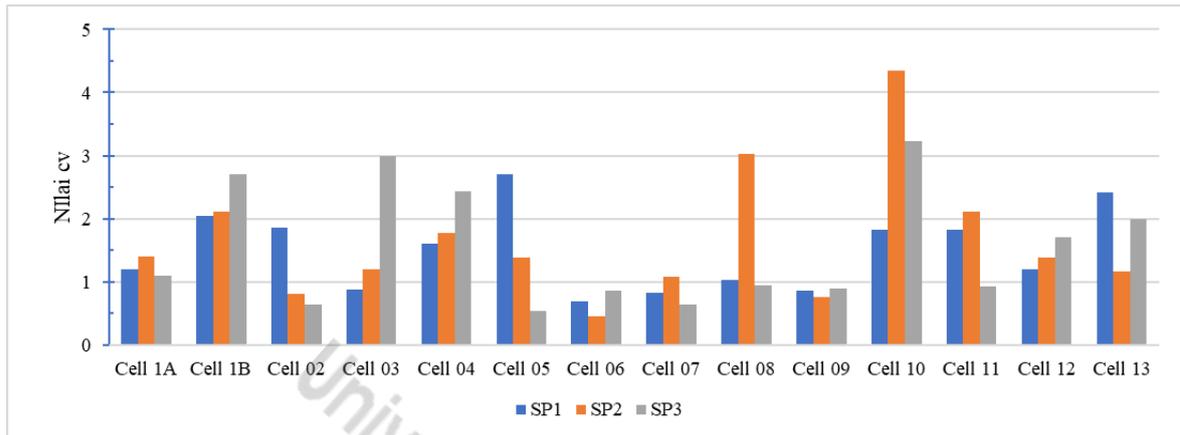
Koefisien kecepatan konsolidasi vertikal hasil perhitungan balik menggunakan metode Asaoka untuk setiap titik pengamatan diperlihatkan pada Gambar 15. Nilai koefisien kecepatan konsolidasi global yang didapatkan

adalah antara  $0.46 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{det}$  dan  $4.35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{det}$ . Sebagai perbandingan nilai  $c_v$  tanah yang didapatkan di laboratorium adalah antara  $1,08 \times 10^{-8}$  dan  $4,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{det}$ . Terdapat kenaikan satu skala magnitudo atau 10 kali lipat terhadap koefisien kecepatan konsolidasi. Koefisien kecepatan konsolidasi terendah terjadi pada Cell 06 SP2, sedangkan yang tertinggi pada Cell 10 SP2. Cell 08 SP2 dan Cell 10 SP3 memiliki koefisien kecepatan konsolidasi yang tinggi mungkin karena PVD menembus lapisan lensa pasir.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian oleh [13] berdasarkan perhitungan balik menggunakan metode Asaoka, dimana perbaikan tanah dengan PVD dan vakum meningkatkan koefisien kecepatan konsolidasi global sampai 10 – 15 kali terhadap nilai  $c_v$  yang didapatkan di laboratorium. Namun hasil penelitian oleh [6] menunjukkan peningkatan hanya sampai 4 kali terhadap nilai  $c_v$  dari laboratorium. Variasi hasil ini disebabkan karena nilai  $c_v$  dari laboratorium didapat dari pengujian terhadap sampel tanah yang tidak dapat mewakili kondisi sebenarnya di lapangan [6].



Gambar 14 Prediksi waktu mencapai 90% konsolidasi dan waktu penghentian tekanan vakum



Gambar 15 Variasi nilai koefisien kecepatan konsolidasi global berdasarkan hitungan balik menggunakan rumus Asaoka

## 5. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang dilakukan terhadap data hasil observasi menggunakan settlement plate dan analisis menggunakan metode Asaoka, dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Perbaikan tanah dengan PVD dan tekanan vakum telah memberikan perbaikan terhadap daya dukung dan kecepatan konsolidasi tanah lunak sebagai pondasi jalan Jalan Tol Kayu Agung – Palembang, dari STA 00 + 000 sampai STA 09 + 000.
2. Tebal lapisan tanah lempung bervariasi antara 12 m sampai 20 m, sedangkan panjang PVD yang digunakan berkisar antara 5 dan 13 m.
3. Prediksi penurunan total bervariasi antara 10 cm dan 76.24 cm, sedangkan penurunan aktual pada saat tekanan vakum dihentikan antara 10 cm dan 84.64 cm. Terdapat korelasi antara panjang PVD dengan besarnya penurunan total.
4. Prediksi waktu yang diperlukan untuk mencapai 90% konsolidasi berkisar antara 26 dan 76 hari, sedangkan durasi aplikasi tekanan vakum adalah 65 – 99 hari. Tidak terdapat korelasi antara panjang PVD dengan besarnya penurunan total karena kondisi lapisan tanah yang bervariasi.
5. Analisis perhitungan balik menggunakan Metode Asaoka menunjukkan koefisien kecepatan

konsolidasi global berkisar antara  $0,46 - 4,35 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{det}$ . Terjadi peningkatan sampai 10 kali terhadap nilai  $c_v$  yang didapatkan di laboratorium.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT. Waskita Sriwijaya yang telah banyak membantu dalam menyediakan data yang diperlukan dalam penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1.] Direktorat Jenderal Bina Marga (2017) Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 02/M/BM/2013.
- [2.] Hardiyatmo (2016) Metode Vacuum Preloading sebagai Salah Satu Alternatif Solusi Pembangunan Timbunan di atas Tanah Lunak. Penerbit Universitas Gadjah Mada–Yogyakarta
- [3.] Gofar, N & Mohamed, R. Ground Improvement by Preloading and Vertical Drain. IN Gofar & Kassim. Ground Improvement and Stabilization, Published by Penerbit Universiti Teknologi Malaysia 2008.
- [4.] Dam, L. T. K., Sandanbata, I., & Kimura, M. (2006). Vacuum Consolidation Method-Worldwide Practice and the Latest Improvement in Japan. Research Report of Hazama Corporation
- [5.] Gouw, TL. and Gunawan, A. (2020) Vacuum preloading, an alternative soft ground improvement technique for a

- sustainable development, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 426 (1) 012003
- [6.] Chen, L., Gao, Y., Elsayed, A. and Yang, X. (2019) Soil Consolidation and Vacuum Pressure Distribution Under Prefabricated Vertical Drain. *Geotechnical and Geological Engineering* 37:3037-3048.
- [7.] Li, C (2014) A simplified method for prediction of embankment settlement in clays. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 6: 61-66
- [8.] Nawir, H., Apoji D., Fatimatuzahro, R., dan Pamudji M. D., 2012. Prediksi Penurunan Tanah Menggunakan Prosedur Observasi Asaoka, Studi Kasus: Timbunan di Bontang, Kalimantan Timur. *Jurnal Teknik Sipil ITB* 19 (2): 133-148.
- [9.] Le, H. V., Pham, B. T., Ho, L. S., and Nguyen, M. D. (2017) Analysis of Consolidation Degree using Settlement Observation Results and Asaoka Method: A Case Study of Route KM 94+340 - KM 94+440 of Hanoi – Haiphong Highway Construction Project. *Int. J. of Civil Engineering and Technology* 8 (11): 91-100.
- [10.] Ibrahim, F., Sandjaja, G., dan Kawanda, A., (2019) Studi Kasus Perbandingan Analisis Penurunan Akibat Timbunan di Tangerang, Banten. *Jurnal Mitra Teknik Sipil Universitas Tarumanagara* 2 (2): 85-94.
- [11.] Edwin, H. & Suhendra, A. (2019) Analisis Metode Vacuum Preloading untuk Mempercepat Konsolidasi pada Tanah Lempung Lunak Jenush Air. *Jurnal Mitra Teknik Sipil* 2(4): 87 – 94.
- [12.] Ralindra, D.F., Fauzi, A., Hikam, M.A.S., Wahyuni, F., Triaswati, M.N., Sukobar & Prajitno, A.F.H. (2022) Modifikasi perbaikan tanah dasar Tol Semarang – Demak: Metode Vacuum Preloading dan Prefabricated Vertical Drain. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil* 20(2): 13-170.
- [13.] Rani, R., Yusa, M., & Fatnanta, F. (2022) Evaluasi Kinerja Perbaikan Tanah menggunakan Metode Vacuum Consolidation pada Perluasan Bandara di Kota Jambi. *Jurnal Teknik* 16(1): 9 – 14.
- [14.] Gofar N., Maizir. H. and Yang, E.H. (2011) Effect of Smear on the acceleration of Consolidation Process by Preloading and Vertical Drains. *Proceedings PITHATTI XV, Yogyakarta: 447-452*
- [15.] Mariyana, Zaika, Y., & Harimurti (2021) The effect of the use of Prefabricated Vertical Drain (PVD) on Soft Soil Construction of Bandung City Road with Finite Element Analysis. *Jurnal Rekayasa Sipil*. 15(3): 192-198.
- [16.] Ramadan, G., Zaika, Y. & Harimurti (2021) Prefabricated Vertical Drain Improved Soft Soil Using Three-Dimension Finite Element Method. *Jurnal Rekayasa Sipil* 15 (2): 150 – 156
- [17.] Andi, NF. & Gofar, N. (2021) Estimasi Penurunan Jalan di atas Tanah yang diperbaiki dengan PVD menggunakan metode observasi. *Jurnal Rekayasa* 11(2): 136-152
- [18.] Ali, A.R. & Gofar N. (2010). Settlement of Embankment of Prefabricated Treated Soft Ground. *Proc. 8th Intl. Conf. Geotechnical & Transportation Engineering, Geotropika 2010, Kota Kinabalu* : 66 – 70
- [19.] Tabarsa, A. (2017) Numerical Simulation of the Consolidation in the Presence of Sand Lenses with Time-Dependent Drainage Boundaries. *Soil Mech Found Eng* 53. 385–390
- [20.] Prasetyo, A. & Prihatiningsih (2020) Analisis Penggunaan PVD pada Tanah Lempung Lunak yang terdapat Lapisan Lensa. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*. 3(1):119-134
- [21.] Lilabsari, Z.F., Munawir, A., Zaika, Y., & Kuswanda, W.P. (2018) Evaluasi Kinerja Perbaikan Tanah Lunak Dengan Menggunakan Preloading dan Prefabricated Vertical Drain (PVD) *Jurnal Rekayasa Sipil* 12(2):112-117.



**REKAYASA SIPIL**  
Departemen Teknik Sipil  
Fakultas Teknik  
Universitas Brawijaya

Jl. Mayjend Haryono 167 Malang 65145

Web: [rekayasasipil.ub.ac.id](http://rekayasasipil.ub.ac.id) / Email: [rekayasasipil@ub.ac.id](mailto:rekayasasipil@ub.ac.id)

### SURAT KETERANGAN

No. 1104/SK/17.03/TSUB/03.2023

Dengan ini kami menyatakan bahwa artikel di bawah ini:

Penulis : Arhab, Nurly Gofar  
Nomor artikel : 1104  
Judul artikel : PERCEPATAN PROSES KONSOLIDASI TANAH LEMPUNG DENGAN APLIKASI TEKANAN VAKUM DAN DRAINASE VERTIKAL  
Tanggal submit : 18 Februari 2023  
Status : **DITERIMA** untuk publikasi di **Rekayasa Sipil Volume 17 Nomor 3 Oktober 2023**

Demikian surat keterangan ini dibuat. Atas perhatian dan kerjasamanya kami ucapkan Terima Kasih.



Dr. Eng. Lilya Susanti  
Editor