

## ANALISIS PENURUNAN KONSOLIDASI TANAH MENGGUNAKAN METODE *PRE-FEBRICATED VERTICAL DRAIN* (PVD) PADA *SHOULDER TAXIWAY* G DI BANDAR

UDARA INTERNASIONAL JENDERAL

AHMAD YANI SEMARANG

Goldi Ahasiweros Salo<sup>1</sup>, Linda Winiasri<sup>2</sup>, Siti Fatimah<sup>3</sup>

<sup>1,2) 3)</sup> Politeknik Penerbangan Surabaya

Jl. Jemur Andayani I/73, Surabaya 60236

Email: [goldibagus12@email.com](mailto:goldibagus12@email.com)

### Abstrak

Peningkatan lalu lintas udara mendorong pengembangan infrastruktur bandara, termasuk *shoulder taxiway* yang memerlukan kestabilan tanah untuk menjamin keselamatan operasional. Di Bandara Internasional Jenderal Ahmad Yani Semarang, ditemukan tanah lunak yang berisiko mengalami penurunan konsolidasi besar, berpotensi menimbulkan kerusakan struktur dan gangguan operasional. Penelitian ini mengevaluasi efektivitas metode *preloading* dalam mengurangi penurunan tanah serta memperkirakan besar penurunan pada kondisi saat ini. Metodologi yang digunakan mencakup perhitungan teoritis berdasarkan teori konsolidasi Terzaghi, simulasi numerik dengan perangkat lunak PLAXIS 2D, serta penggunaan PVD untuk mempercepat proses konsolidasi. Data diperoleh melalui investigasi geoteknik, termasuk uji sondir dan pengambilan parameter tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *preloading* mampu mempercepat konsolidasi hingga 90%. Perhitungan manual menunjukkan waktu konsolidasi 7,8 tahun, sementara penggunaan PVD mempercepat proses dengan penurunan sebesar 4,08 meter dalam waktu 5,1 tahun.

**Kata Kunci:** Konsolidasi tanah, PVD, PLAXIS 2D, *shoulder taxiway*, Teori Terzaghi

### Abstract

*The growth of air traffic necessitates improvements in airport infrastructure, including the shoulder taxiway, which requires stable ground conditions to ensure operational safety. At Jenderal Ahmad Yani International Airport in Semarang, soft soil was identified, posing a risk of significant consolidation settlement that could lead to structural damage and operational disruptions. This study evaluates the effectiveness of the preloading method in minimizing ground settlement and predicts the magnitude of settlement under existing conditions. The methodology includes theoretical calculations based on Terzaghi's consolidation theory, numerical simulations using PLAXIS 2D, and the application of PVD to accelerate the consolidation process. Data were obtained from geotechnical investigations, including cone penetration tests and soil parameter analysis. Results indicate that preloading can accelerate consolidation by up to 90%. Manual calculations estimate a consolidation period of 7.8 years, while the use of PVD reduces settlement to 4.08 meters over 5.1 years.*

**Keywords:** Soil consolidation, PVD, PLAXIS 2D, *shoulder taxiway*, *terzaghi theory*.

## PENDAHULUAN

Bandar Udara Internasional Jenderal Ahmad Yani berlokasi di Semarang, Jawa Tengah, dan diberi nama untuk menghormati Jenderal TNI (Anumerta) Ahmad Yani, seorang Pahlawan Nasional. Awalnya difungsikan sebagai pangkalan militer TNI, bandara ini mulai melayani penerbangan domestik sejak tahun 1966 dan tetap berperan sebagai fasilitas militer.

Pada tahun 2018, bandara ini termasuk salah satu yang mengalami pertumbuhan tercepat di dunia. Terminal barunya yang dibangun di atas perairan memiliki luas sekitar 58.652 m<sup>2</sup>, dengan kapasitas menampung 6,5 hingga 7 juta penumpang per tahun, dan diresmikan oleh Presiden Joko Widodo pada 7 Juni 2018. Panjang landasan pacunya mencapai 2.560 meter dengan lebar 45 meter. Namun, terhitung sejak 2 April 2024, status bandara sebagai bandara internasional dicabut dan kini hanya melayani rute domestik. Meningkatnya kebutuhan transportasi udara menyebabkan lalu lintas penerbangan menjadi semakin padat.

## Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif, yakni metode yang berbasis pada data numerik yang dianalisis secara statistik untuk menjawab pertanyaan penelitian atau menguji hipotesis. Data yang digunakan bersifat terukur, objektif, dan dapat dibuktikan secara matematis.

## Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder dari PT. Beton Budi Mulia, meliputi hasil uji lapangan dan laboratorium seperti data *Cone Penetration Test* (CPT), tabel, dan grafik sondir.

## Menghitung penurunan Manual

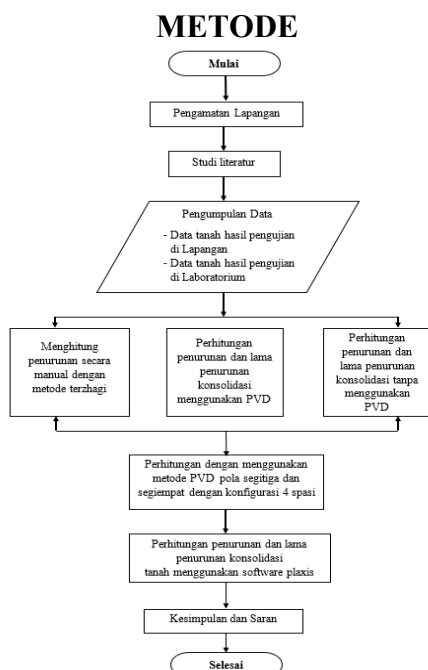
Perhitungan penurunan secara manual dilakukan dengan menggunakan teori Terzaghi untuk menentukan koefisien penurunan, yang menggambarkan kecepatan respons tanah terhadap beban, melalui analisis tegangan efektif, total, dan tekanan air pori.

## Perhitungan penurunan dan lama penurunan

Selanjutnya dilakukan perhitungan durasi konsolidasi, besaran penurunan, serta perencanaan tinggi timbunan secara bertahap.

## Perhitungan PVD dengan pola segitiga

Metode PVD diaplikasikan untuk mencapai derajat konsolidasi sebesar 90%, dengan konfigurasi pemasangan pola segitiga dan jarak antar PVD antara 1 hingga 1,6 meter. Perhitungan mencakup jari-jari ekuivalen PVD, diameter mandrel, serta radius zona pengaruh, dilanjutkan dengan estimasi derajat konsolidasi tanpa mempertimbangkan efek *smear zone*.



Gambar 1. Bagan Alur Perencanaan

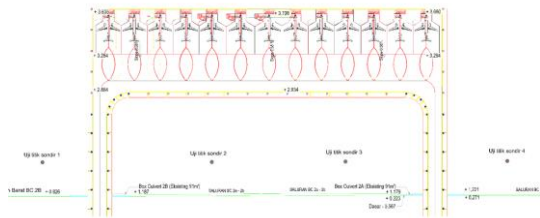
## Perhitungan penurunan dengan software plaxis

Analisis ini membandingkan hasil perhitungan metode PVD yang dilakukan di Microsoft Excel dengan simulasi menggunakan PLAXIS, untuk menilai efektivitas metode perbaikan tanah sekaligus menentukan solusi dengan waktu konsolidasi paling singkat.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Klasifikasi Tanah

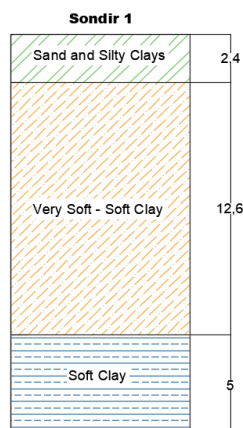
Lapisan tanah ditentukan dari hasil uji sondir di lapangan. Dari empat lokasi pengujian, penelitian ini hanya menggunakan data titik S-01 yang terdekat dengan area studi.



Gambar 2. Penentuan lokasi sondir

### 2. Karakteristik Tanah

Karakteristik tanah diidentifikasi dari hasil uji sondir (DCPT) pada titik S-01 sebagai acuan konsistensi tanah. Uji ini menghasilkan nilai cone resistance (QC) dan friction ratio (FR) yang bervariasi.



Gambar 3. Klasifikasi tanah

### 3. Korelasi Parameter Tanah

Dalam analisis laboratorium, parameter tanah ditetapkan dengan mengaitkan nilai rata-rata cone resistance ( $q_c$ ) yang dipilih secara teliti dengan tingkat kohesi tanah, untuk menjamin keakuratan hasil.

| S-01                                |              |                      |                       |              |
|-------------------------------------|--------------|----------------------|-----------------------|--------------|
| Lapisan                             | Timbunan     | Lay 1                | Lay 2                 | Lay 3        |
|                                     |              | sandy and silty clay | very soft - soft clay | soft clay    |
| Depth (m)                           |              | 0.0 - 2.4            | 2.4 - 15.0            | 15.0 - 20.0  |
| Material                            | Mohr-Coulomb | Mohr-Coulomb         | Mohr-Coulomb          | Mohr-Coulomb |
| Type                                | Drained      | UnDrained            | UnDrained             | UnDrained    |
| $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 18.00        | 16.00                | 13.00                 | 14.00        |
| $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 20           | 18.00                | 15.00                 | 15.00        |
| $k_x$ (m/day)                       | 1.7E+01      | 6.6E-03              | 1.3E-03               | 7.5E-04      |
| $k_y$ (m/day)                       | 8.6E+00      | 3.28E-03             | 6.3E-04               | 3.7E-04      |
| $\nu$                               | 0.35         | 0.3                  | 0.2                   | 0.2          |
| E (kPa)                             | 35000        | 32500                | 2750                  | 2750         |
| $c'$                                | 1            | 1                    | 1                     | 1            |
| $\phi'$                             | 40           | 27                   | 24                    | 25           |
| Cc                                  | -            | 0.56                 | 1.21                  | 1.68         |
| $e_0$                               | -            | 1.42                 | 2.2                   | 2.18         |
| Cv (m <sup>2</sup> /det)            | -            | -                    | 1.58E+00              | -            |

Gambar 4. Hasil korelasi tanah

### 4. Analisis Penurunan Tanah

#### 1. Lapisan Sondir 01

##### Lapisan Tanah A

$$\begin{aligned}\sigma_A &= H_1 \times \gamma_{sat} \\ &= 0,95 \times 18 \\ &= 17,1 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_A &= H_2 \times \gamma_w \\ &= 0,95 \times 9,81 \\ &= 9,3195 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

##### Lapisan Tanah B

$$\begin{aligned}\sigma_B &= (H_A \times \gamma_{sat}) + (H_1 \times \gamma_{sat}) \\ &= (1,9 \times 18) + (6,3 \times 15) \\ &= 128,7 \text{ kN/m}^2 \\ U_B &= H_2 \times \gamma_w \\ &= 8,2 \times 9,81 \\ &= 80,442 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

##### Lapisan Tanah C

$$\begin{aligned}\sigma_C &= (H_A \times \gamma_{sat}) + (H_B \times \gamma_{sat}) + (H_1 \times \gamma_{sat}) \\ &= (1,9 \times 18) + (12,6 \times 15) + (2,5 \times 15) \\ &= 260,7 \text{ kN/m}^2 \\ U_C &= H_2 \times \gamma_w \\ &= 17 \times 9,81\end{aligned}$$

Setelah selesai mengitung tegangan total dan tekanan air pori, maka selanjutnya menghitung tegangan efektif.

1. Lapisan Sondir 01

a. Lapisan Tanah A

$$\begin{aligned}\sigma_{A'} &= \sigma_A - U_A \\ &= 17,1 - 9,3195 \\ &= 7,7805 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

b. Lapisan Tanah B

$$\begin{aligned}\sigma_{B'} &= \sigma_B - U_B \\ &= 128,7 - 80,442 \\ &= 48,25 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

c. Lapisan Tanah C

$$\begin{aligned}\sigma_{C'} &= \sigma_C - U_C \\ &= 260,7 - 166,77 \\ &= 93,93 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

Total elevasi tersebut merupakan jumlah dari ketebalan timbunan dan kedalaman galian, yakni sebesar 1,33 meter. Beban yang diasumsikan berasal dari pesawat Airbus A-320 adalah 77 kN/m<sup>2</sup>. Rincian perhitungannya dijelaskan sebagai berikut:

a. Beban Struktur Perkerasan

$$\begin{aligned}SN &= a_1d_1 + a_2d_2 + a_3d_3 \\ &= 0,65 \times 20 \text{ kN/m}^3 + 0,4 \times 21 \\ &\quad \text{kN/m}^3 + 0,12 \times 22 \text{ kN/m}^3 \\ &= 24,04 \text{ kPa}\end{aligned}$$

b. Beban Pesawat

$$\begin{aligned}\frac{MTOW}{\text{tire pressure}} &= \frac{835,83}{14,34} = 58 \text{ kPa} \\ &= 50 \text{ kPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\sigma &= \text{Beban Pesawat} + (\gamma \text{ sat timbunan} \\ &\quad \times \text{elevasi total}) \\ &= 77 + (18 \times 1,33) \\ &= 100,94 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

**5. Perencanaan *Pre-Febricated Vertical Drain* (PVD)**

Langkah awal dalam merancang *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) adalah menetapkan dimensi yang akan digunakan. Dalam perencanaan ini, PVD memiliki spesifikasi sebagai berikut :

- a. 4 m
- b. 100 mm

• Perencanaan PVD dengan pola segitiga

Desain sistem PVD dengan pola konfigurasi segitiga diterapkan menggunakan empat variasi jarak antar drainase, yakni 1 m, 1,2 m, 1,4 m, dan 1,6 m. Tahapan perhitungan berikut ini menjelaskan pemodelan vertical drain dengan jarak antar drainase sebesar 1 meter.

a. Menentukan jari-jari ekuivalen PVD

$$\begin{aligned}d_w &= \frac{2(a+b)}{\pi} \\ &= \frac{2(0,004+0,10)}{3,14} = 0,066 \text{ m} \\ r_w &= \frac{0,066}{2} = 0,033 \text{ m}\end{aligned}$$

b. Menentukan diameter *mandrel*

$$\begin{aligned}d_m &= \sqrt{\frac{4 \times ab}{\pi}} \\ &= \sqrt{\frac{4 \times (0,004 \times 0,10)}{3,14}} = 0,023 \text{ m}\end{aligned}$$

c. Menentukan jari-jari ekuivalen zona pengaruh PVD

$$\begin{aligned}d_e &= 1,05 \times \text{Spasi} \\ &= 1,05 \times 1 = 1,05 \text{ m} \\ r_e &= \frac{1,05}{2} = 0,53 \text{ m}\end{aligned}$$

Nilai  $d_e$  dan  $r_e$  selanjutnya yang akan dihitung dengan spasi 1,2 m, 1,4 m, dan 1,6 m. Berikut merupakan hasil dari perhitungannya.

Tabel 1. Jari-jari Ekuivalen zona pengaruh PVD

| Spasi (m) | $d_e$ (m) | $r_e$ (m) |
|-----------|-----------|-----------|
| 1         | 1,05      | 0,53      |
| 1,2       | 1,26      | 0,63      |
| 1,4       | 1,47      | 0,74      |
| 1,6       | 1,68      | 0,84      |

Sumber : Olahan Penulis

**6. Perhitungan Derajat Konsolidasi tanpa efek *smear zone***

Untuk menghitung derajat konsolidasi akibat pemasangan PVD tanpa memperhitungkan pengaruh zona smear, digunakan metode perhitungan yang berdasarkan rumus dari Barron (1948) dan

disempurnakan oleh Kjellman (1949). Proses perhitungannya dijelaskan dalam tahapan berikut.

Lapisan Sondir 01

a. Menghitung nilai  $n$

Nilai  $n$  dengan konfigurasi segitiga dan spasi 1 m

$$n = \frac{de}{dw} = \frac{1,05}{0,066} = 15,85 \text{ m}$$

b. Nilai dari  $C_v$

$$C_v = 1,577 \text{ m}^2/\text{tahun} = 0,004 \text{ m}^2/\text{hari}$$

c. Menghitung nilai dari  $C_h$

$$C_h = 1,2 \times C_v = 1,2 \times 1,577 = 1,89 \text{ m}^2/\text{tahun} = 0,005 \text{ m}^2/\text{hari}$$

d. Menghitung besar faktor waktu pengaliran vertikal dan radial dengan *vertical drain*

$$t = 120$$

$$H^2 dr = 380,25$$

$$T_v = \frac{C_v \times t}{H^2 dr}$$

$$= \frac{0,004 \times 120}{380,25} = 0,0012$$

$$T_r = \frac{C_h \times t}{de^2}$$

$$= \frac{0,005 \times 60}{(1,05)^2} = 0,544$$

e. Menghitung derajat konsolidasi vertikal dan horizontal, karena  $T_v$  yang memiliki nilai sama.  $T_v \leq 0,2$  maka rumus yang akan digunakan sebagai berikut.

$$U_v = \sqrt{\frac{4 \times T_v}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,0012}{3,14}} = 0,0015 \times 100\% = 0,15\%$$

f. Menghitung nilai  $F(n)$

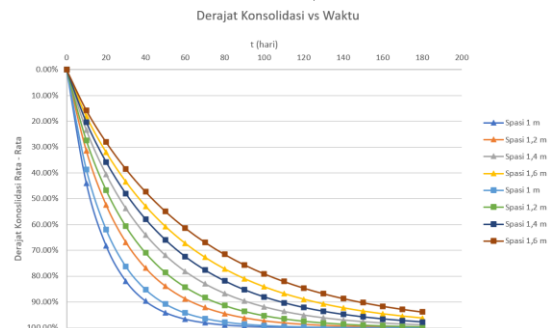
$$F(n) = \frac{n^2}{n^2-1} \ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2} = \frac{15,85^2}{15,85^2-1} \ln(15,85) - \frac{3 \times 15,85^2-1}{4 \times 15,85^2} = 2,03$$

g. Derajat konsolidasi rata-rata untuk arah horizontal ( $U_h$ )

$$U_h = 1 - \exp\left[\frac{-8T_r}{F(n)}\right] = 1 - \exp\left[\frac{-8 \times 0,544}{2,03}\right] = 0,882 \times 100\% = 88\%$$

h. Besar derajat konsolidasi total

$$U = 1 - [(1 - U_v) \times (1 - U_h)] = 1 - [(1 - 0,15) \times (1 - 0,882)] = 0,897 \times 100\% = 90\%$$

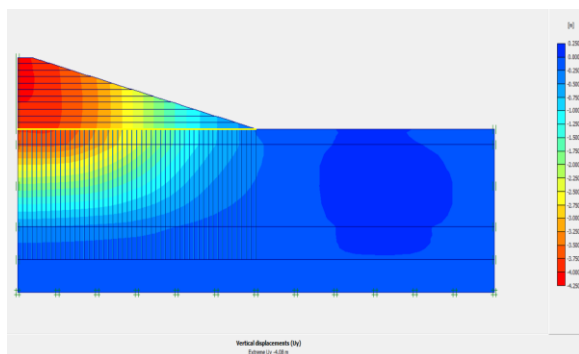


Gambar 5. Grafik hasil perhitungan konsolidasi

## 7. Pemodelan Plaxis

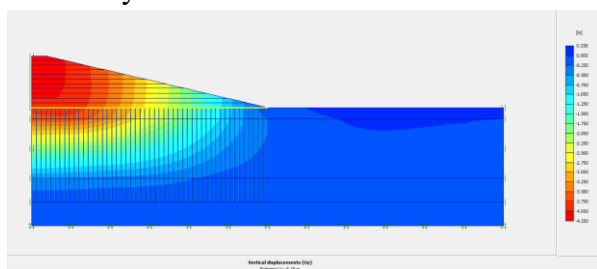
Simulasi dengan perangkat lunak Plaxis dilakukan pada dua skenario, yaitu dengan pemasangan Prefabricated Vertical Drain (PVD) dan tanpa PVD. Hasil dari simulasi ini memberikan gambaran mengenai besar penurunan tanah serta lamanya proses konsolidasi. Output Plaxis ditampilkan dalam bentuk gradasi warna yang menunjukkan tingkat deformasi tanah; warna yang semakin mendekati merah menunjukkan penurunan yang semakin besar.

- Hasil Perhitungan PVD dan Tidak Memakai PVD Menggunakan Aplikasi Plaxis 8.5



Gambar 6. Penurunan konsolidasi akibat timbunan memakai PVD

Untuk analisis penurunan tanah akibat konsolidasi di masa depan, dianjurkan menggunakan versi terbaru dari perangkat lunak PLAXIS agar hasil analisis lebih tepat dan sesuai dengan kondisi lapangan yang sebenarnya.



Gambar 7. Penurunan konsolidasi akibat timbunan tanpa memakai PVD

Berdasarkan hasil analisis, diketahui bahwa total penurunan akibat proses konsolidasi mencapai 4,19 meter, dengan estimasi durasi konsolidasi berlangsung selama sekitar 5,5 tahun.

## 8. Hasil perhitungan manual dan plaxis

Hasil konsolidasi dari perhitungan manual tanpa menggunakan PVD dengan teori terzagi sebagai berikut:

Tabel 2. Hasil Konsolidasi perhitungan manual

| Keterangan    | Sondir 01 |
|---------------|-----------|
| Penurunan (m) | 5,27      |
| Waktu (tahun) | 7,8       |

Sumber : Olahan Penulis

Sedangkan hasil aplikasi plaxis menggunakan PVD dan tidak menggunakan PVD sebagai berikut:

Tabel 3. Hasil plaxis menggunakan PVD

| Keterangan    | Memakai PVD | Tidak memakai PVD |
|---------------|-------------|-------------------|
| Penurunan (m) | 4,08        | 4,19              |
| Waktu (tahun) | 5,1         | 5,5               |

Sumber : Olahan Penulis

## PENUTUP

### Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan dan analisis yang telah dilakukan pada Bab 4, maka dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Dari hasil pemodelan dan analisis, diketahui bahwa total penurunan tanah di area shoulder Taxiway Golf setelah dilakukan perbaikan dengan metode Prefabricated Vertical Drain (PVD) mencapai 4,08 meter. Angka ini lebih kecil dibandingkan penurunan pada kondisi tanpa perbaikan, yang menunjukkan nilai lebih tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan PVD secara efektif mempercepat proses konsolidasi tanah lunak dan berperan dalam menurunkan potensi terjadinya penurunan yang berlebihan.
2. Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan PLAXIS, diketahui bahwa penerapan PVD memungkinkan tanah mencapai 90% derajat konsolidasi dalam waktu 5,1 tahun, sementara tanpa penggunaan PVD, waktu yang dibutuhkan mencapai 7,8 tahun.
3. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 90% derajat konsolidasi tanah pada shoulder Taxiway Golf adalah sekitar 5,1 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa metode PVD efektif dalam mempercepat proses konsolidasi tanah lunak di area proyek tersebut.

## Saran

Berdasarkan kesimpulan diatas, beberapa saran yang perlu dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Dalam pelaksanaan metode preloading di lapangan, disarankan agar Prefabricated Vertical Drain (PVD) dipasang sesuai dengan spesifikasi yang telah direncanakan, serta dilakukan pengawasan yang ketat selama proses pemasangannya untuk memastikan keberhasilan perbaikan tanah.. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa penurunan aktual sesuai dengan hasil simulasi dari PLAXIS, sekaligus mencegah terjadinya penurunan yang melebihi batas aman.
2. Pemantauan penurunan tanah perlu dilakukan secara berkala selama proses konsolidasi berlangsung. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa penurunan yang terjadi sesuai dengan hasil simulasi menggunakan PLAXIS, serta untuk menghindari penurunan yang melebihi ambang batas aman.
3. Temuan dari penelitian ini dapat dijadikan sebagai acuan dalam pelaksanaan proyek serupa, baik di area lain di Bandar Udara Internasional Jenderal Ahmad Yani Semarang maupun di bandara lain yang memiliki kondisi tanah lunak sejenis, guna meningkatkan efektivitas penggunaan metode PVD.
4. Untuk analisis penurunan akibat konsolidasi tanah di masa mendatang, disarankan menggunakan versi terbaru dari perangkat lunak PLAXIS agar hasil yang diperoleh lebih akurat dan merepresentasikan kondisi nyata di lapangan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ahsan, A. D., Yanti, G., & Megasari, S. W. (2022). Analisis Penurunan Tanah Menggunakan Metode Vacuum Consolidation Dengan Variasi Jarak Pemasangan Pvd. *Konstruksia*, 13(1), 54-60.
- [2] Barimbing, F.R. (2017). Analisis Penurunan dan Waktu Konsolidasi Tanah Lunak Menggunakan Metode Preloading dan Pre-Fabricated Vertical Drain. *Konstruksia*, 12(1), 42-52.
- [3] Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of Geotechnical Engineering*. USA: Cengage Learning.
- [4] Hansbo, S. (2004). Experience of Consolidation Process from Test Areas with and without Vertical Drains. Sweden: Chalmers University of Technology.
- [5] Menteri Perhubungan RI. (2017). Peraturan Direktur Jenderal Perhubungan Udara No. 326 Tahun 2017 tentang Standar Teknis dan Operasional Peraturan Keselamatan Penerbangan Sipil Bagian 139 (Manual of Standard CASR Part 139), Volume I Bandar Udara (Aerodrome). Jakarta: Direktorat Jenderal Perhubungan Udara.
- [6] Michael, Joshua dan Aksa Kawanda. (2020). Perencanaan Prefabricated Vertical Drain Menggunakan Metode Elemen untuk Memperoleh Pola dan Jarak yang Efektif. Jakarta: Universitas Tarumanegara.
- [7] Munthe, Daniel Anderson. (2020). Analisa Pengaruh Jarak dan Pola Pemasangan PVD Terhadap Derajat Konsolidasi pada Tanah Timbunan Reklamasi Belawab Fase II. Medan: Universitas Sumatra Utara.
- [8] Pasaribu H. T. dan Iskandar R. (2012). Analisa Penurunan pada Tanah Lunak Akibat Timbunan (Studi Kasus Runway

- Bandar Udara Medan). Medan:  
Universitas Sumatra Utara.
- [9] Satha nanthan, I., Rujikiatkomjorn, dkk. (2005). Analytical an Numerical Modelling Of Soft Stabilized by Prefabricated Vertical Drains Incorporating Vacuum Preloading. Australia: Internasional Jurnal of Geomechanics.
- [10] Surbakti, R. (2021). Prediksi Penurunan Konsolidasi Tanah Lunak Dengan Metode Analitis Dan Metode Element Hingga. *Prediction of Soft Soil Consolidation Settlement Using Analitical Method and Finite Element Method*. 5(1), 83–91.
- [11] Susiazti, H., Widiastuti, M., & Widayati, R. (2020). Jurnal Ilmu Pengetahuan dan teknologi sipil Metode Preloading Dan Prefabricated Vertical Drain ( PVD). 4(1), 1–8.
- [12] Tadulako, R. (2023). Analisis Penurunan Tanah Timbunan Menggunakan Metode Elemen Hingga pada Ruas Jalan Tolango-Bulontio STA 47 + 600. *Civil Engineering Journal on Research and Development*. 4(1), 41-48.
- [13] Widhiarto, H, Fatmawati, L.E., & Beatrix, M. (2018). Pengaruh Pvd (Prefabricated Vertical Drain) Dalam Mempercepat Proses Konsolidasi Pada Kontruksi Taxiway Di Bandara Juanda Surabaya. *Jurnal Hasil Penelitian LPPM Untag Surabaya*, 3(2), 74-82.
- [14] Zhafirah, A., & Amalia, D. (2019). Perencanaan Preloading Dengan Penggunaan *Prefabricated Vertical Drain* Untuk Perbaikan Tanah Lunak Pada Jalan Tol Pejangan-Pemalang. *Potensi : Jurnal Sipil Politeknik*, 21(1), 10-32.