

ANALISIS PENGGUNAAN PREFABRICATED VERTICAL DRAINS (PVD) MENGGUNAKAN SIGMA/W GEOSTUDIO DENGAN MATERIAL TANAH LUNAK MODEL LINEAR ELASTIC

Pupung Borsalino, Bambang Setiawan, Galuh Chrismaningwang

¹Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret Surakarta,
Jln Ir. Sutami 36A, Surakarta, Jawa Tengah 57126.

*Email: bambangsetiawan@staff.uns.ac.id

Abstract

Soil is an important material in construction work, one of its characteristics is soft soil. Soft soil has a large consolidation settlement and low bearing capacity, the nature of the large risk to the development carried out on it, therefore it needs to be improved. One of the efforts to improve is by using Prefabricated Vertical Drains (PVD) material to shorten the flow rate of water from the soil. The analysis was carried out using Hansbo's theory (1979) and analysis using the GeoStudio 2018 application, this study aims to compare the results of manual analysis and software analysis. Conditions were improved on conditions by taking into account the effect of the smear zone and without taking into account the effect of the smear zone. The two methods obtained will obtain a graph of the decrease in time and the time required for comparison. The results of the study were based on the results of conventional analysis, the decrease was 0.868 m with a time of 90% degree of consolidation in conditions without improvement, improvement without smear effect and improvement with smear effect, the results of the analysis required were 20,296 days, 67 days, and 187 days respectively. The results of the analysis using the GeoStudio model software for linear elastic material without reinforcement obtained a deformation of 0.916 m for 9,418 days, the condition with reinforcement without taking into account the effect of the smear obtained a deformation of 0.934 m for 40 days, and the condition with the effect of the smear obtained a deformation of 0.914 m for 167 days. The results of the analysis using conventional methods and software modeling methods have the same time pattern, namely the fastest time to reach U90% in conditions with PVD without a smear zone, followed by conditions with a smear zone and the longest time in conditions without improvement. The deformation results in the analysis results in the GeoStudio software have varying values in each modeled condition.

Keywords : consolidation, deformation, PVD, linear elastic, dan geostudio

Abstrak

Tanah merupakan material penting dalam pekerjaan konstruksi, salah satu karakteristiknya adalah tanah lunak. Tanah lunak memiliki penurunan konsolidasi yang besar dan daya dukung yang rendah, sifat ini beresiko besar terhadap pembangunan yang dilakukan di atasnya, oleh karena itu tanah perlu dilakukan perbaikan. Salah satu upaya untuk memperbaiki dengan menggunakan material *Prefabricated Vertical Drains* (PVD) untuk memperpendek laju aliran air dari dalam tanah. Analisis dilakukan dengan teori Hansbo (1979) dan analisis menggunakan *software* GeoStudio 2018, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan hasil analisis secara manual dan hasil dengan analisis *software*. Kondisi perbaikan ditinjau pada kondisi dengan memperhitungkan efek *smear zone* dan tanpa memperhitungkan efek *smear zone*. Kedua metode yang diperoleh akan diperoleh grafik hubungan waktu penurunan dan waktu yang diperlukan untuk dilakukan perbandingan. Hasil penelitian diperoleh berdasarkan hasil analisis konvensional besar penurunan sebesar 0,868 m dengan waktu derajat konsolidasi 90% pada kondisi tanpa perbaikan, perbaikan tanpa efek *smear*, dan perbaikan dengan efek *smear*, hasil analisis diperoleh waktu yang diperlukan secara berturut-turut selama 20.296 hari, 67 hari, dan 187 hari. Hasil analisis menggunakan model *software* GeoStudio material *linear elastic* tanpa perkuatan diperoleh deformasi sebesar 0,916 m selama 9.418 hari, kondisi dengan perkuatan tanpa memperhitungkan efek *smear* diperoleh deformasi sebesar 0,934 m selama 40 hari, dan kondisi dengan efek *smear* diperoleh deformasi sebesar 0,914 m selama 167 hari. Hasil analisis menggunakan metode konvensional dan metode pemodelan *software* memiliki pola waktu yang sama, yaitu waktu tercepat untuk mencapai U90% pada kondisi dengan PVD tanpa smear zone lalu diikuti kondisi dengan *smear zone* dan waktu terlama pada kondisi tanpa perbaikan. Hasil deformasi pada hasil analisis pada *software* GeoStudio memiliki nilai yang bervariasi pada setiap kondisi yang dimodelkan.

Kata Kunci : konsolidasi, deformasi, PVD, *linear elastic*, dan geostudio

PENDAHULUAN

Tanah merupakan salah satu aspek penting dalam dunia konstruksi, dimana terdapat beberapa jenis dan karakteristik tanah. Salah satu yang menjadi perhatian adalah tipikal tanah lunak. Das (1995) menjelaskan tanah lunak memiliki pemampatan yang besar, waktu konsolidasi yang lama, dan daya dukung yang rendah. Salah satu cara untuk mempercepat proses konsolidasi adalah menggunakan *Prefabricated Vertical Drains* (PVD), di mana metode ini telah banyak digunakan selama lebih dari tiga decade dan terbukti efektif dkk., 2018; Gong dan Chok, 2018; Cascone dan Biondi, 2013). Korner (1993) menjelaskan bahwa PVD memiliki kelebihan diantaranya proses analisis yang cukup mudah dilakukan, pemasangan yang cepat, dan alat pemancang yang relatif kecil. Analisis dapat dilakukan

menggunakan metode konvensional dan metode *Finite Element Model (FEM)*. Perhitungan analisis konvensional menggunakan teori Hansbo (1979). Analisis dengan metode FEM digunakan sebagai idealisasi konseptual dan pemodelan fisik suatu permasalahan. Pada penelitian ini menggunakan *software* GeoStudio dengan analisis *Sigma/W*, fitur *Sigma/W* digunakan untuk menganalisis tegangan tanah dan deformasi yang dihasilkan. Tanah lunak dimodelkan dengan model *linear elastic*, model ini sesuai untuk tanah yang mengalami *overconsolidation*. Hasil model *linear elastic* mampu menghasilkan hasil analisis yang lebih realistis (*An Engineering Methodology*, 2013). Penelitian yang dilakukan akan membandingkan kedua hasil analisis baik secara konvensional dengan hasil analisis *software* GeoStudio 2018.

Analogi mengenai proses konsolidasi menggunakan teori *one dimensional consolidation* dari Terzaghi. Teori ini memodelkan proses konsolidasi yang diakibatkan beban bekerja akan lebih maksimal dengan adanya lubang pori yang dapat mengalirkan air, lubang pori dimodelkan di lapangan sebagai pipa PVD. Material tersebut dipasang di area pekerjaan dengan dilakukan proses pemancangan menggunakan alat berat. Proses pemancangan menimbulkan gangguan tanah (*smear*) di sekitar PVD yang mempengaruhi nilai koefisien arah radial tanah. Hansbo (1979 dan 2004) analisis menggunakan metode Hansbo (1979) kondisi *smear* akan didefinisikan sebagai faktor penghambat dalam analisis derajat konsolidasi horizontal. Faktor penghambat tanpa efek *smear* hanya memperhitungkan faktor penghambat akibat jarak pemasangan PVD, sedangkan dengan efek *smear* faktor penghambat ditambahkan faktor akibat gangguan tanah dan faktor penghambat akibat tahanan drainase. Hasil analisis derajat konsolidasi arah vertikal dan horizontal dapat digunakan untuk menghitung derajat konsolidasi total pada proses konsolidasi.

METODE

Metode penelitian yang digunakan adalah metode analisis menggunakan perhitungan empiris, untuk nilai penurunan menggunakan teori *one dimensional consolidation* oleh Terzaghi dan analisis penggunaan PVD menggunakan teori Hansbo. Data tanah yang digunakan merupakan data tanah Tanjung Selor, Kalimantan Utara, berdasarkan data yang diperoleh wilayah tersebut didominasi tanah lunak berupa tanah lempung serta menurut Wardoyo (2019) daerah Tanjung Selor termasuk daerah yang ditemukan tanah yang berkarakteristik lunak. Data yang digunakan pada Tabel 1 berikut,

Tabel 1. Data parameter tanah

| Parameter | Simbol | Satuan | Tanah lapis 1 | Tanah lapis 2 | Tanah lapis 3 | Tanah lapis 4 |
|-------------------------|----------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Berat volume | γ | kN/m ³ | 12,900 | 13,140 | 12,840 | 13,150 |
| Kadar air | w | % | 46,09% | 40,68% | 38,61% | 41,08% |
| Berat jenis | G_s | - | 2,670 | 2,680 | 2,690 | 2,690 |
| Angka pori | e | - | 2,030 | 1,870 | 1,900 | 1,890 |
| Indeks plastisitas | PI | % | 5,407 | 5,742 | 5,717 | 5,737 |
| Jenis tanah | - | - | MH | CL | CL | CL |
| Sudut geser dalam | ϕ | ° | 4,560 | 6,020 | 7,240 | 6,220 |
| Kohesi | c | kN/m ³ | 1,275 | 6,178 | 5,492 | 6,220 |
| Koefisien kompresi | C_c | - | 0,694 | 0,902 | 0,875 | 0,906 |
| Koefisien konsolidasi | C_r | m ² /tahun | 0,00189 | 0,00175 | 0,00175 | 0,00266 |
| Koefisien permeabilitas | k | m/dt | 9,29 x 10 ⁻¹⁰ | 9,95 x 10 ⁻¹⁰ | 9,98 x 10 ⁻¹⁰ | 1,34 x 10 ⁻⁰⁹ |
| Indeks pemampatan | M_p | m ² /kN | 4,83 x 10 ⁻⁰⁴ | 5,88 x 10 ⁻⁰⁴ | 5,92 x 10 ⁻⁰⁴ | 5,09 x 10 ⁻⁰⁴ |

Tabel 1 merupakan data hasil pengujian yang digunakan dalam penelitian, dimana data merupakan hasil pengujian data *indeks properties* dan *mechanical properties* tanah. Data ini digunakan untuk analisis besaran penurunan konsolidasi dan parameter pada pemodelan *software*. Data tanah berdasarkan data uji akan disesuaikan dengan kebutuhan data *software* dan dilakukan pendekatan nilai mengacu pada Jay Ameratunga, dkk (2016).

Data spesifikasi PVD yang dianalisis dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Spesifikasi pemodelan

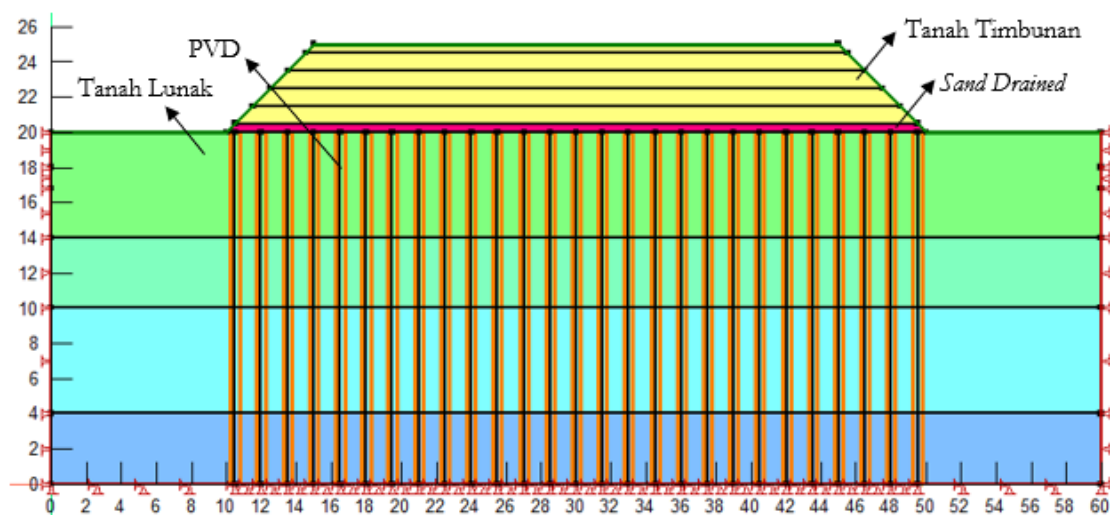
| Parameter | Simbol | Satuan | Keterangan |
|------------------|--------|---------|-----------------------|
| Tebal | a | m | 0,1 |
| Lebar | b | m | 0,003 |
| Jarak pemasangan | S | m | 1,50 |
| Pola pemasangan | - | - | Bujur sangkar |
| Kapasitas aliran | q_w | m^3/s | $8,72 \times 10^{-5}$ |

Tabel 2. menyajikan data material PVD untuk analisis dan pemodelan. Pola pemasangan dimodelkan bujur sangkar dikarenakan keterbatasan *software* yang digunakan sebatas dua dimensi (2D). Pada analisis yang dilakukan dengan beban yang bekerja merupakan beban berupa *sand drained* 0,50 m dan beban timbunan dengan ketinggian 4,50 m yang diasumsikan dapat memrepresentasikan beban yang akan bekerja pada area tersebut, dengan asumsi berat volume sebesar 18 kN/m^3 . Penggunaan *sand drained* didesain untuk membantu mengalirkan air dari dalam tanah menuju sisi tepi timbunan untuk dibuang. Pada pemodelan dengan GeoStudio material untuk analisis berupa material tanah lunak, tanah timbunan, *sand drained*, dan PVD. Definisi pemodelan disajikan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Definisi material pada pemodelan

| Parameter | Kategori material | Model material |
|---------------------|---|--------------------------------------|
| Tanah lunak | <i>Effective Parameters w/ PWP Change</i> | <i>Linear Elastic (w/PWP Change)</i> |
| Tanah timbunan | <i>Total Stress Parameters</i> | <i>Linear Elastic (Total)</i> |
| <i>Sand drained</i> | <i>Effective-Drained Parameters</i> | <i>Linear Elastic (Effective)</i> |
| PVD | <i>Effective Parameters w/ PWP Change</i> | <i>Linear Elastic (w/PWP Change)</i> |

Tabel 3. menyajikan pengaturan definisi material pada aplikasi *Sigma/W* GeoStudio, dimana terdapat daftar pengaturan mode material berdasarkan pengaturan kategori material. Pada setiap material dapat didefinisikan berdasarkan data yang digunakan. Data yang didefinisikan dapat dimasukkan pada setiap material, hasil input data disajikan pada Gambar 1. Berikut.



Gambar 1. Hasil input material pemodelan

Gambar 1. menunjukkan hasil material yang telah dimasukkan pada pemodelan, dimana tanah dimodelkan dan didefinisikan setiap lapisan tanahnya. Material untuk percepatan konsolidasi menggunakan PVD, material *sand drained*, dan tanah timbunan. Nilai parameter untuk permeabilitas PVD dikonversikan dari kondisi *axisymmetric* menjadi kondisi *plane strain* (Indratna dan Redana, 2010).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Beban timbunan yang diaplikasikan di atas tanah lunak mengakibatkan tanah lunak mengalami penurunan. Hasil perhitungan penurunan konsolidasi tanah lunak disajikan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Spesifikasi pemodelan

| Kedalaman (m) | Tebal tanah (m) | Satuan (m) | M_v m^2/kN | Δ_p (kN/m^2) | S_c (m) |
|----------------------------|--------------------|---------------|-------------------|----------------------------|--------------|
| 6,00 | 6,00 | 6,00 | 0,00048 | 88,607 | 0,257 |
| 10,00 | 4,00 | 4,00 | 0,00059 | 84,810 | 0,200 |
| 16,00 | 6,00 | 6,00 | 0,00059 | 75,904 | 0,270 |
| 20,00 | 4,00 | 4,00 | 0,00051 | 69,390 | 0,141 |
| Total Penurunan (m) | | | | | 0,868 |

Tabel 4 menyajikan hasil perhitungan penurunan yang dilakukan di setiap lapisan tanah, hasil perhitungan diperoleh penurunan total sebesar 0,868 m akibat beban yang bekerja. Hasil penurunan yang diperoleh akan dihitung lama waktu yang diperlukan untuk mencapai derajat konsolidasi 90% ($U_{90\%}$). Perhitungan hasil perhitungan konsolidasi sebagai berikut.

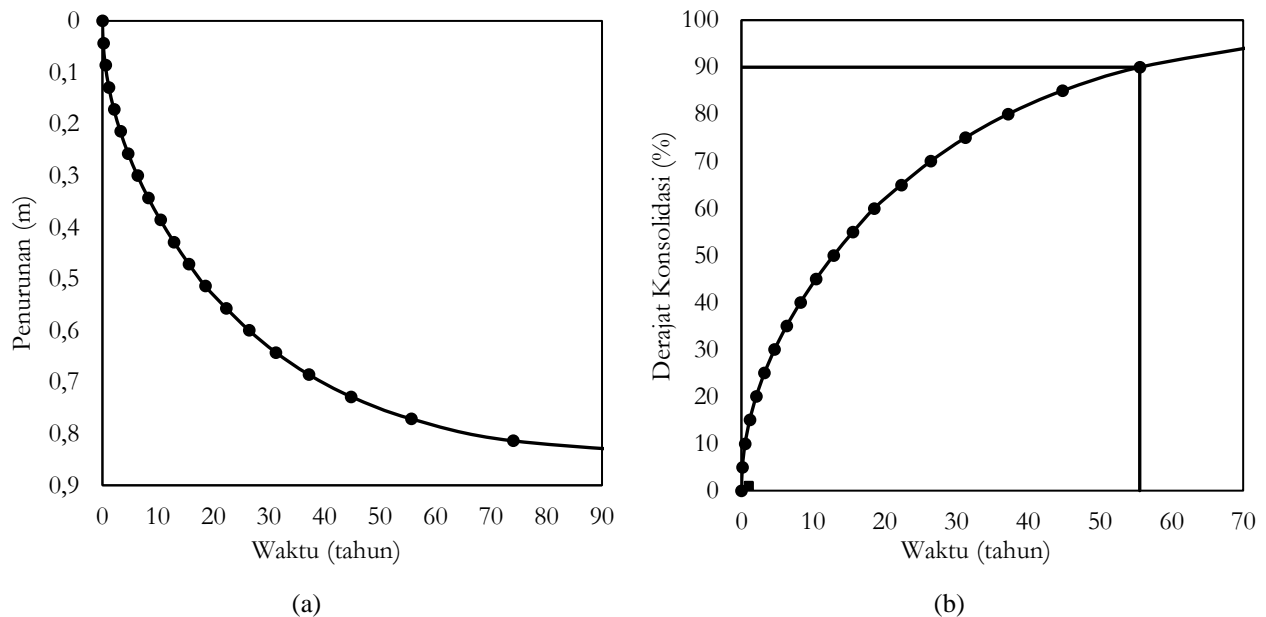
$$t_{90} = \frac{0,848 \times 20^2}{6,104} = 55,569 \text{ tahun}$$

Perhitungan untuk mencapai derajat konsolidasi 90% diperlukan waktu selama 55,569 tahun atau selama 20.297 hari Hasil analisis kondisi tanpa perkuatan disajikan pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Hasil analisis pada kondisi tanpa perkuatan

| Derajat Konsolidasi (m) | Faktor Waktu (T_v) | Waktu (tahun) | Penurunan (m) |
|----------------------------|---------------------------|------------------|------------------|
| 0,00 | 0,000 | 0,00 | 0,000 |
| 10,00 | 0,008 | 0,515 | 0,087 |
| 20,00 | 0,031 | 2,059 | 0,174 |
| 30,00 | 0,071 | 4,632 | 0,260 |
| 40,00 | 0,126 | 8,235 | 0,347 |
| 50,00 | 0,196 | 12,867 | 0,434 |
| 60,00 | 0,283 | 18,528 | 0,521 |
| 70,00 | 0,403 | 26,398 | 0,607 |
| 80,00 | 0,567 | 37,164 | 0,694 |
| 90,00 | 0,848 | 55,569 | 0,781 |
| 95,00 | 1,129 | 73,974 | 0,824 |
| 99,00 | 1,781 | 116,708 | 0,859 |

Tabel 5 menyajikan hasil analisis kondisi tanpa perkuatan dimana ditinjau pada derajat konsolidasi $U_{90\%}$ yang berpengaruh terhadap waktu yang diperlukan. Hasil rekapitulasi perhitungan disajikan ke dalam grafik pada Gambar 2.



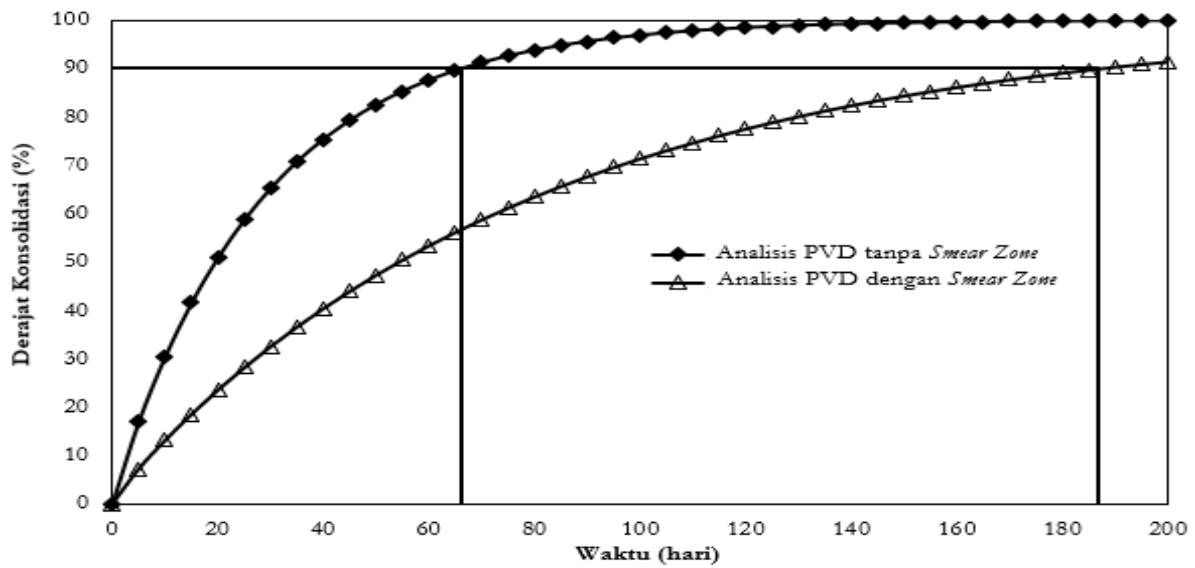
Gambar 2. (a) Grafik hubungan waktu terhadap penurunan kondisi tanpa PVD dan
 (b) Grafik hubungan waktu terhadap derajat konsolidasi

Gambar 2.a menyajikan grafik hubungan antara waktu terhadap penurunan yang akan dicapai, dimana grafik menunjukkan pola grafik akan melandai yang mana menunjukkan penurunan mencapai penurunan yang maksimum. Gambar 2.b menyajikan grafik hubungan antara waktu terhadap derajat konsolidasi yang dihasilkan, dimana untuk mencapai derajat konsolidasi $U_{90\%}$ diperlukan waktu selama 55,569 tahun. Berdasarkan hasil analisis diperlukan usaha untuk mempercepat konsolidasi agar waktu yang diperlukan dapat diselesaikan selama masa konstruksi, metode yang digunakan menggunakan material *Prefabricated Vertical Drains* (PVD). Haryati, dkk (2020) menjelaskan bahwa pada saat proses pemancangan PVD akan membuat gangguan pada tanah (*smear*), berdasarkan efek tersebut maka analisis yang dilakukan meninjau dua kondisi, yaitu kondisi tanpa *smear* dan kondisi dengan *smear zone*. Hasil analisis penggunaan PVD disajikan pada tabel rekapitulasi pada Tabel 6. berikut.

Tabel 6. Hasil analisis dengan penggunaan PVD

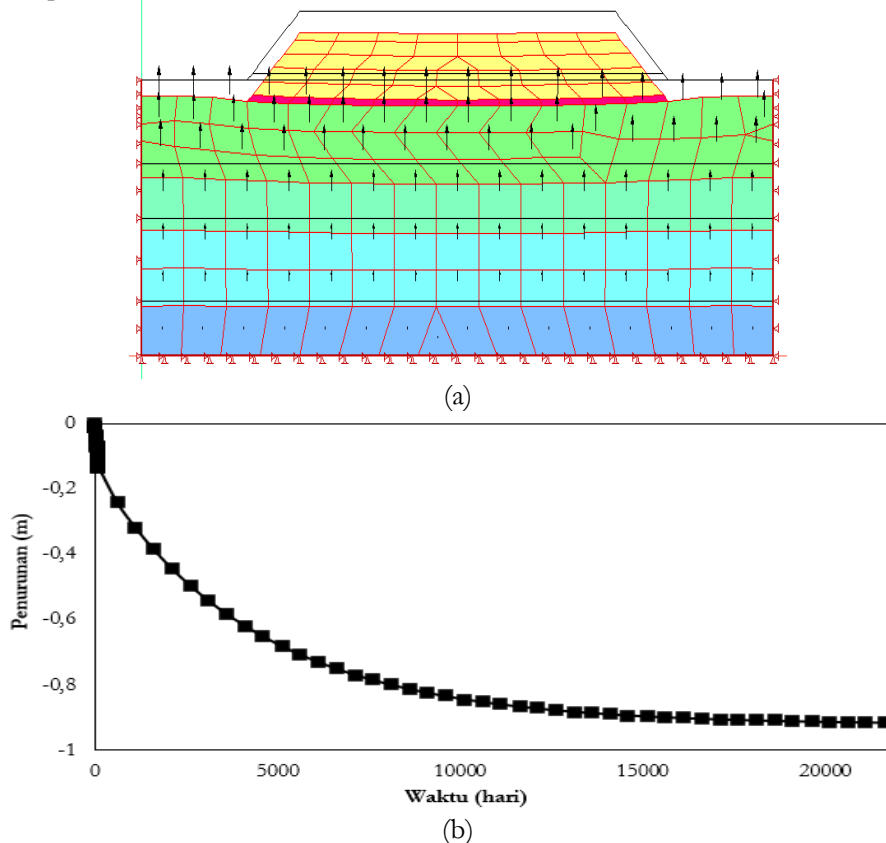
| Parameter | Satuan | Tanpa <i>smear zone</i> | Dengan <i>smear zone</i> |
|----------------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|
| Waktu pengamatan | Hari | 170 | 170 |
| Koefisien konsolidasi vertikal | m ² /hari | 0,01671 | 0,01671 |
| Koefisien konsolidasi horizontal | m ² /hari | 0,03342 | 0,03342 |
| Faktor waktu vertikal | - | 0,00710 | 0,00710 |
| Derajat konsolidasi vertikal | % | 9,510 | 9,510 |
| Faktor penghambat | - | 2,508 | 6,949 |
| Faktor waktu horizontal | - | 1,978 | 0,897 |
| Derajat konsolidasi horizontal | % | 99,818 | 89,740 |
| Derajat konsolidasi total | % | 99,835 | 90,716 |

Tabel 6. menyajikan hasil perhitungan kondisi akibat efek *smear*/ gangguan dengan tinjauan selama 170 hari. Hasil untuk tinjauan arah vertikal memiliki nilai yang sama, akan tetapi tinjauan horizontal mengalami perubahan akibat efek *smear*. Faktor penghambat akibat kondisi efek *smear* meningkat dari 2,508 menjadi 6,949, dengan derajat konsolidasi total kondisi tanpa *smear* diperoleh derajat konsolidasi sebesar 99,835% sedangkan untuk kondisi dengan *smear* diperoleh sebesar 90,716%. Hasil analisis disajikan pada Gambar 3.



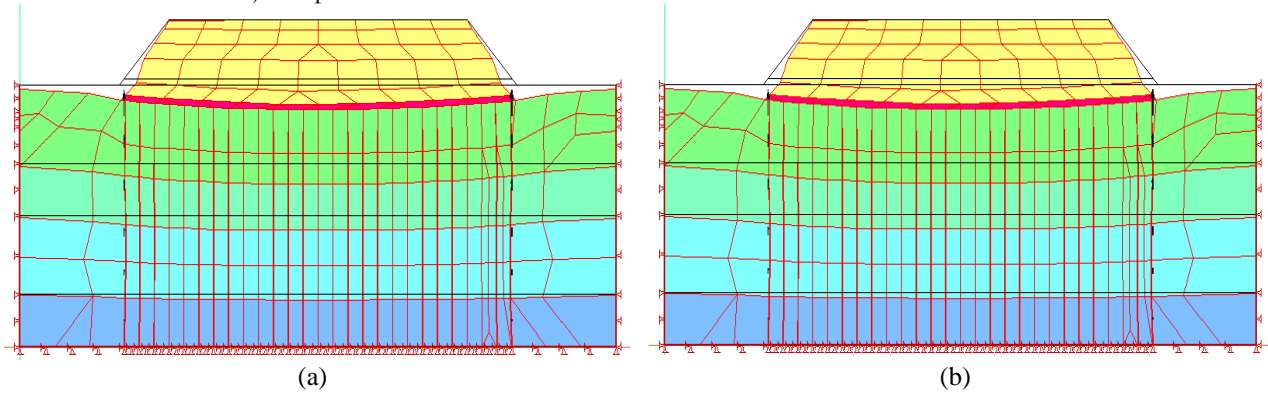
Gambar 3. Grafik perbandingan kondisi tanpa atau dengan efek gangguan (*smear*)

Gambar 3 menyajikan menunjukkan derajat konsolidasi yang dapat dicapai pada dua kondisi tinjauan. Tinjauan pertama pada kondisi tanpa efek *smear* dimana untuk mencapai $U_{90\%}$ diperlukan waktu selama 60 hari, sedangkan kondisi dengan efek *smear* diperlukan waktu selama 165 hari. Hal ini menunjukkan bahwa efek *smear zone* dapat mengganggu kondisi tanah untuk mencapai kondisi penurunan yang maksimal. Hasil yang diperoleh pada analisis tersebut akan dibandingkan dengan analisis menggunakan *software Sigma/W GeoStudio*, definisi untuk tanah lunak menggunakan model material *linear elastic*. Luaran yang diperoleh yaitu hasil deformasi tanah akibat beban yang bekerja di atasnya dan grafik hubungan antara waktu dengan besar penurunan yang terjadi. Hasil analisis dengan *software* dapat dilihat pada Gambar 4. berikut



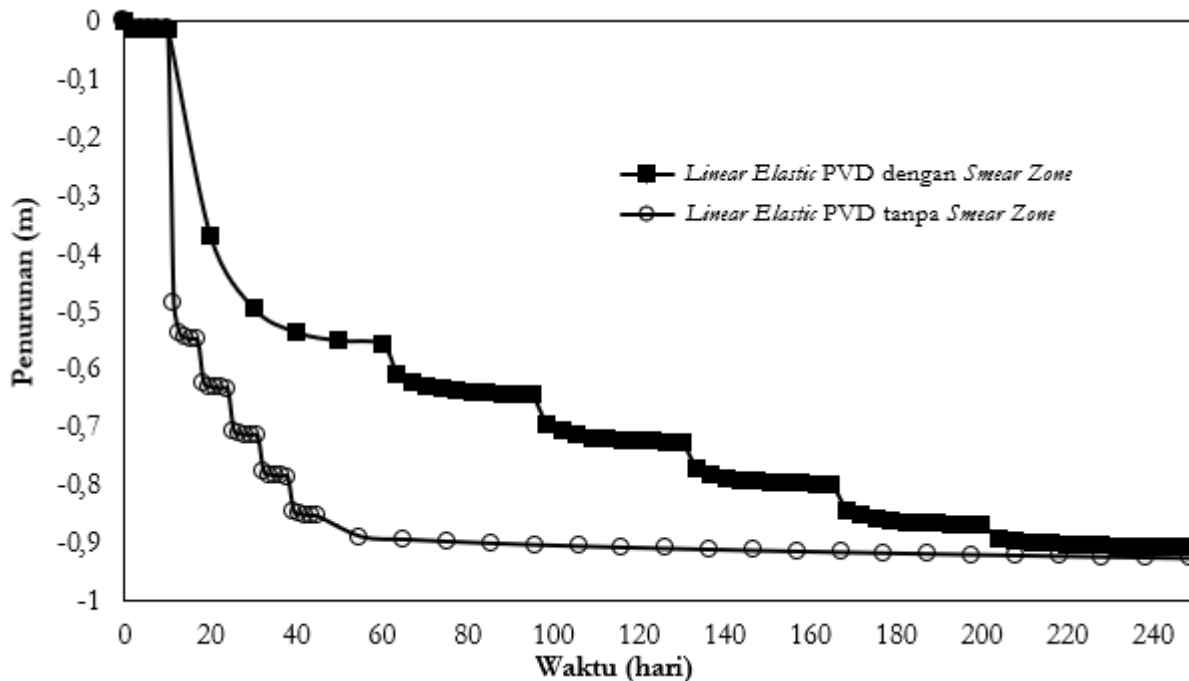
Gambar 6. (a) Pola deformasi kondisi tanpa perkuatan dan
 (b) Grafik hubungan antara waktu terhadap penurunan

Gambar 5.a menyajikan pola deformasi yang dihasilkan pada pemodelan kondisi *existing*. Nilai penurunan yang diperoleh sebesar 0,924 m akibat beban yang bekerja. Nilai deformasi yang diperoleh meningkat sebesar 7,398% terhadap analisis secara rumus empiris. Gambar 5.b menyajikan grafik hubungan antara waktu terhadap penurunan, dimana nilai U90% pada penurunan sebesar 0,832 m dengan waktu yang diperlukan selama 9.352 hari. Berdasarkan hasil yang diperoleh kondisi tanah ditambahkan material *Prefabricated Vertical Drains* (PVD), hasil analisis dengan penambahan PVD disajikan pada Gambar 6. berikut.



Gambar 6. (a) Pola deformasi tanpa efek *smear zone* dan
 (b) Pola deformasi dengan efek *smear zone*

Gambar 6.a menunjukkan hasil pemodelan berupa deformasi yang dihasilkan, dimana kondisi tanpa efek *smear zone* diperoleh deformasi sebesar 0,905 dan Gambar 6.b kondisi dengan efek *smear zone* diperoleh deformasi sebesar 0,892. Hal ini menunjukkan penggunaan material PVD memperkecil penurunan yang dicapai sebesar 2,06% terhadap kondisi tanpa perkuatan. Kondisi dengan efek *smear zone* memperkecil penurunan sebesar 3,46% terhadap kondisi tanpa perkuatan. Hasil grafik disajikan pada Gambar 7. berikut.



Gambar 7. Grafik perbandingan antara kondisi tanpa atau dengan efek *smear zone*.

Gambar 7 menyajikan grafik hubungan antara waktu terhadap penurunan yang dihasilkan. Kondisi tanpa efek *smear zone* untuk U90% selama 25 hari, sedangkan dengan *smear zone* selama 103 hari. Hal ini sesuai dengan analisis secara konvensional dimana efek *smear zone* menghambat konsolidasi tanah untuk mencapai derajat konsolidasi 90%.

SIMPULAN

Berdasarkan analisis dan pembahasan mengenai analisis Sigma/W GeoStudio untuk pemanfaatan PVD pada pekerjaan di atas lunak dengan model material *Linear Elastic*, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil analisis konvensional tanpa perkuatan PVD memerlukan waktu selama 55,6 tahun atau 20.297 hari untuk mencapai derajat konsolidasi 90% dengan perhitungan penurunan sebesar 0,868 m. Hasil analisis dengan PVD tanpa memperhitungkan *smear zone* kondisi U90% dicapai selama 67 hari sedangkan tanpa *smear zone* dicapai selama 187 hari.
2. Hasil pemodelan dengan model material *linear elastic* kondisi tanpa perkuatan diperoleh penurunan sebesar 0,916 m dengan U90% selama 9.418 hari. Kondisi dengan PVD tanpa efek *smear* hasil penurunan menjadi 0,934 m dengan U90% selama 40 hari. Hasil dengan PVD memperhitungkan efek *smear* penurunan menjadi 0,914 m dengan U90% diperoleh selama 167 hari.
3. Hasil analisis secara konvensional dan pemodelan *software* GeoStudio memiliki pola waktu yang sama, hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *Prefabricated Vertical Drains* (PVD) dapat digunakan untuk mempercepat proses konsolidasi sehingga proses penurunan dapat diselesaikan selama waktu konstruksi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kepada PT. Tetrasa Geosinindo yang telah mengizinkan untuk menggunakan data tanah lunak hasil uji lapangan dan laboratorium yang berlokasi di Tanjung Selor, Kalimantan Utara.

REFERENSI

- An Engineering Methodology, 2013. "Stres-Deformation Modeling with SIGMA/W", GEO-SLOPE International Ltd, Kanada.
- Cascone, E. and Biondi, G., 2013. "A Case Study on Soil Settlements Induced By Preloading And Vertical Drains", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 38, pp.51–67.
- Das, B., M., 1955, "Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis)", Jilid 1. Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Das, B., M., 1995, "Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)", Jilid 2. Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Di Filippo, G., Bandini, V., Cascone, E. and Biondi, G., 2017, "Measurements and Predictions of Settlements Induced By Preloading And Vertical Drains On A Heterogeneous Soil Deposit", *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, Vol 104, pp.302–315.
- Gong, Y. and Chok, Y.H., 2018, "Predicted And Measured Behaviour Of A Test Embankment On Ballina Clay". *Computers and Geotechnics*, Vol. 93, pp.178–190.
- Hansbo, S., 1979, "Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricated Drains", *Ground Engineering*. Vol. 12 No. 5.
- Hansbo, S., 2004, "Experience of Consolidation Process From Test Areas With and Without Vertical Drains", Chalmers University of Technology. Sweden
- Hayati, T., dan Rudi I., 2020, "Analisis Efek Smear Zone Akibat Pemasangan PVD terhadap Proses Konsolidasi Timbunan dengan Plaxis 2D dan 3D", *Media Komunikasi Teknik Sipil*, Vol. 26 No. 2
- Indraratna, B., dan Redana I.W., 2000, "Numerical Modeling of Vertical Drains With Smear and Well Resistance Installed in Soft Clay", *Can. Geotech*, Vol. 37.
- Ameratunga, J., Nagaratnam, S., dan Das, B., M, 2016, "Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering", Springer, India.
- Koerner, R., M., 1993, "Designing with Geosynthetics. Fifth Edition" Prentice Hall, New Jersey.
- Lim, G.T., Pineda, J.A., Boukpeti, N. and Carraro, J.A.H., 2018, "Predicted and Measured Behaviour of An Embankment on PVD-Improved Ballina Clay", *Computers and Geotechnics*, Vol. 93, pp.204–221..
- Team Geoteknik, 2017, "Soil Investigation PLTMG Tanjung Selor 15 MW Kalimantan Utara" Laporan Akhir
- Wardoyo, dkk., 2019, Atlas Sebaran Tanah Lunak Indonesia", Penerbit Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Bandung.