

ANALISIS PROSES KONSOLIDASI PADA PERBAIKAN TANAH DENGAN METODE PRELOADING DAN PENGGUNAAN PVD PADA PEKERJAAN REKLAMASI MENGGUNAKAN PLAXIS 2D DAN PLAXIS 3D

Titi Hayati¹, Fatimah Insani Harahap²

Universitas Sumatera Utara, Indonesia

Email: titihayati@usu.ac.id, insanifatimah@usu.ac.id

Abstrak

Tanah lunak pada proyek reklamasi memerlukan perbaikan melalui metode *preloading* dan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) untuk mempercepat konsolidasi. Namun, prediksi penurunan konsolidasi sering tidak akurat akibat keterbatasan pemodelan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis akurasi pemodelan Plaxis 2D dan 3D dalam memprediksi penurunan konsolidasi pada reklamasi Belawan, serta memvalidasinya dengan data lapangan. Penelitian ini menggunakan pemodelan numerik Plaxis 2D dan 3D dengan parameter tanah dari data bor (BH-4) dan 19 tahap konstruksi, divalidasi dengan data *settlement plate* (SP-03). Plaxis 3D lebih akurat (deviasi 4,27%) dibanding Plaxis 2D (deviasi 14,86%) terhadap data aktual (penurunan 1,992 m). Hasil ini membuktikan keandalan Plaxis 3D untuk perencanaan reklamasi. Rekomendasi mencakup optimasi desain PVD, integrasi IoT, dan AI untuk meningkatkan akurasi prediksi.

Kata Kunci : Konsolidasi, *preloading*, Plaxis

Abstract

Soft soils in reclamation projects require repairs through preloading methods and Prefabricated Vertical Drain (PVD) methods to accelerate consolidation. However, predictions of consolidation declines are often inaccurate due to modeling limitations. This study aims to analyze the accuracy of 2D and 3D Plaxis modeling in predicting the decline in consolidation in the Belawan reclamation, as well as validate it with field data. This study uses 2D and 3D Plaxis numerical modeling with soil parameters from drill data (BH-4) and 19 construction stages, validated with settlement plate data (SP-03). Plaxis 3D is more accurate (deviation of 4.27%) than Plaxis 2D (deviation of 14.86%) to actual data (decrease of 1,992 m). These results prove the reliability of Plaxis 3D for reclamation planning. Recommendations include PVD design optimization, IoT integration, and AI to improve prediction accuracy.

Keywords: Consolidation, Preloading, Plaxis.

Pendahuluan

Reklamasi adalah suatu proses teknik yang bertujuan untuk memperluas daratan melalui pengurugan wilayah perairan seperti pantai, rawa, atau laut dengan material tertentu sehingga dapat dimanfaatkan untuk keperluan pembangunan, seperti permukiman, industri, pelabuhan, dan infrastruktur lainnya (Zhafirah & Amalia, 2019a). Proses ini melibatkan perencanaan yang kompleks, kajian geoteknik, hidrologi, dan pengelolaan lingkungan secara terpadu (Triatmodjo, 2012). Analisis geoteknik dalam

kegiatan reklamasi dilakukan untuk memastikan kestabilan tanah dasar, menentukan metode perkuatan yang sesuai, serta memprediksi potensi penurunan (*settlement*) dan bahaya likuifaksi (Adinegoro et al., 2021; Pinrang, n.d.; Setiawan, 2019). Dalam konteks reklamasi, area yang direklamasi sering kali terdiri dari tanah lunak bertekanan rendah dengan potensi deformasi besar, sehingga memerlukan perhatian khusus dari aspek geoteknik (Aini et al., 2023a; Berliano, 2020; Ningsih, 2018).

Tanah lunak, terutama jenis lempung jenuh air, merupakan salah satu tantangan utama dalam rekayasa geoteknik karena sifatnya yang memiliki daya dukung rendah, konsolidasi lambat, dan potensi penurunan besar (Garuan & Suranto, 2016; Izza et al., 2023; Ruhilla & Hanshi, 2024). Salah satu permasalahan utama dari tanah lunak adalah konsolidasi, yaitu proses bertahap di mana air pori keluar dari rongga antar butiran tanah sebagai respons terhadap pembebanan eksternal, yang mengakibatkan penurunan permukaan tanah (Aspara & Fitriani, 2016). Menurut Terzaghi (1943), konsolidasi terjadi karena tekanan total yang diterapkan pada tanah jenuh awalnya sepenuhnya ditahan oleh tekanan air pori, kemudian secara bertahap ditransfer ke kerangka butiran tanah seiring berkurangnya tekanan air pori (Berliano, 2020; Zhafirah & Amalia, 2019b). Proses ini berlangsung sangat lambat pada tanah lunak karena permeabilitasnya yang rendah (Aini et al., 2023b; Suhendra & Irsyam, 2011; Zhafirah & Amalia, 2019c).

Tanah lunak yang mengalami konsolidasi sering menyebabkan penurunan diferensial, retak pada struktur, serta ketidakstabilan lereng dan kerusakan fondasi. Dalam proyek reklamasi dan konstruksi infrastruktur berat, kondisi ini sangat kritis jika tidak diatasi dengan teknik perbaikan tanah yang tepat seperti preloading, prefabricated vertical drains (PVD), atau vakum konsolidasi (Indraratna et al., 2005). *Preloading* adalah teknik rekayasa geoteknik yang memanfaatkan beban sementara di atas tanah lunak guna mempercepat konsolidasi dan mengurangi penurunan residu sebelum pembangunan struktur utama dilakukan (Indraratna et al., 2005). Proses konsolidasi tanah lunak pada jalan tol Palembang - Indralaya STA 1+670 dipercepat menggunakan metode preloading dilakukan dengan memberikan pembebanan awal dengan timbunan setinggi 1,556 meter sehingga diperoleh derajat pemampatan 90% selama 2,149 tahun (Suardi et al., 2021).

Efektivitas metode ini dapat ditingkatkan dengan penggunaan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD), yang berfungsi sebagai jalur keluar air pori vertikal sehingga mempercepat proses konsolidasi lateral (Bo et al., 2003). Waktu penurunan konsolidasi dengan metode preloading selama 38,49 tahun pada jalan tol Pejagan-Pemalang dapat dipercepat dengan penggunaan PVD menjadi 11 minggu (Zharifah & Amalia, 2019).

Penggunaan PVD secara signifikan mengurangi waktu konsolidasi tanah, karena jarak aliran air pori menjadi lebih pendek dan tekanan pori yang terakumulasi akibat beban preloading dapat terdisipasi dengan lebih cepat. Dalam perencanaan dan evaluasi proyek perbaikan tanah, pendekatan numerik sangat dibutuhkan untuk memahami respons tanah terhadap beban dan waktu. Salah satu perangkat lunak berbasis metode elemen hingga yang banyak digunakan adalah *Plaxis 2D*, yang mampu mensimulasikan perilaku mekanis dan konsolidasi tanah dengan lebih akurat (Brinkgreve et al., 2016).

Dalam proses perencanaan perbaikan tanah, penting dilakukan analisis terhadap penurunan dan waktu konsolidasi agar dapat diprediksi seberapa besar penurunan yang diperlukan hingga tercapai 90% konsolidasi serta lamanya waktu yang dibutuhkan.

Berbagai studi telah dilakukan untuk memperkirakan proses konsolidasi pada timbunan di atas tanah lunak, salah satunya melalui metode preloading dengan pendekatan elemen hingga.

Meiwa et al. (2015) menganalisis konsolidasi menggunakan Prefabricated Vertical Drain (PVD) pada kondisi *axisymmetric* serta beberapa pendekatan plane strain ekuivalen dengan metode elemen hingga. Hasil pemodelan menggunakan Plaxis 2D menunjukkan bahwa pendekatan Indraratna memberikan hasil paling mendekati kondisi *axisymmetric*, khususnya saat PVD disimulasikan dengan zona smear, jika dibandingkan dengan metode Hird dan Chai.

Dalam penelitiannya, Raden et al. (2016) menyimpulkan bahwa penggunaan PVD dengan jarak 1,0 meter menunjukkan bahwa konsolidasi 95% tercapai dalam waktu 424 hari, dengan penurunan sebesar -1,36 meter. Sementara itu, hasil pemodelan menggunakan Plaxis menunjukkan penurunan sebesar -1,224 meter pada hari ke-424.

Penelitian ini mengambil lokasi di Proyek Reklamasi Peti Kemas Fase II di Belawan, yang bertujuan mengubah wilayah perairan menjadi lahan daratan dan area dermaga beserta bangunan pendukungnya. Tanah di lokasi tersebut tergolong lunak dengan kadar air tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penurunan dan waktu konsolidasi di Proyek Reklamasi Peti Kemas Fase II menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D dan Plaxis 3D.

Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dengan membandingkan secara langsung akurasi antara Plaxis 2D dan 3D dalam analisis konsolidasi tanah menggunakan Prefabricated Vertical Drain (PVD), di mana Plaxis 3D menunjukkan hasil lebih akurat dibandingkan Plaxis 2D (deviasi 4,27% vs. 14,86%) (Meiwa et al., 2015). Selain itu, validasi pemodelan dilakukan menggunakan data monitoring dari settlement plate SP-03, pendekatan yang jarang dijumpai dalam studi sebelumnya seperti Zhafirah & Amalia (2019) dan Suardi et al. (2021). Penelitian ini juga lebih komprehensif dalam memodelkan tahapan konstruksi, mencakup 19 tahap yang meliputi fase preloading dan instalasi PVD, melebihi rincian pada studi seperti Indraratna et al. (2005) yang hanya fokus pada vakum preloading. Di samping itu, penelitian ini turut menawarkan rekomendasi inovatif berupa integrasi teknologi Internet of Things (IoT) dan Artificial Intelligence (AI) untuk pemantauan dan prediksi konsolidasi, hal yang belum pernah dibahas dalam literatur sebelumnya.

Metode Penelitian

Dalam penelitian ini, dilakukan analisis menggunakan Plaxis 2D dan 3D dengan data lapangan dan laboratorium yang didapatkan dari pemilik proyek Reklamasi Peti Kemas Belawan Fase II. Data yang digunakan adalah hasil pekerjaan bor dalam dan SPT pada bore hole 4 (BH-4). Data diolah menjadi parameter yang sesuai dalam pemodelan Plaxis 2D dan 3D. Selanjutnya dilakukan pemodelan timbunan dan pemasangan PVD

serta tahapan konstruksi yang mengimpretasikan kondisi di lapangan dan dilakukan analisis besar penurunan dan waktu konsolidasi yang terjadi. Evaluasi hasil analisis akan dilakukan dengan membandingkan terhadap kondisi di lapangan menggunakan data monitoring penurunan saat proses penimbunan preloading yaitu data settlement plate-03 (SP-03) yang diperoleh dari pemilik proyek.

Hasil dan Pembahasan

Data yang Digunakan pada Pemodelan Plaxis

Pemodelan Plaxis 2D dalam analisis ini dilakukan sedekat mungkin dengan kondisi di lapangan. Pemodelan diadopsi dari data gambar kerja yang diperoleh. Adapun hasil pemodelan Plaxis 2D disajikan pada Gambar 1.

Proses analisis yang dilakukan menggunakan Plaxis 2D membutuhkan parameter tanah yang diperoleh dari hasil pengujian tanah di lapangan. Parameter data tanah dan PVD yang digunakan dalam proses analisis menggunakan Plaxis 2D disajikan pada Tabel 1.

Dalam pemodelan Plaxis dibutuhkan tahapan pekerjaan di lapangan untuk mengimplementasikan keadaan lapangan sehingga didapat hasil yang mendekati keadaan sebenarnya. Tahapan ini akan digunakan pada langkah perhitungan pada Plaxis. Adapun tahapan pekerjaan reklamasi yang akan diinput kedalam program Plaxis adalah sebagai berikut:

1. Penimbunan tahap 1 setinggi 1 meter selama 3 hari.
2. Konsolidasi selama 5 hari.
3. Penimbunan tahap 2 setinggi 1 meter selama 3 hari.
4. Konsolidasi selama 5 hari.
5. Penimbunan tahap 3 setinggi 1 meter selama 3 hari.
6. Konsolidasi selama 5 hari.
7. Penimbunan tahap 4 setinggi 2 meter selama 5 hari.
8. Konsolidasi selama 100 hari.
9. Pemasangan PVD selama 10 hari.
10. Timbunan preloading 40 cm selama 2 hari.
11. Konsolidasi selama 4 hari.
12. Timbunan preloading 60 cm selama 3 hari.
13. Konsolidasi selama 4 hari.
14. Timbunan preloading 40 cm selama 3 hari.
15. Konsolidasi selama 32 hari.
16. Timbunan preloading 3,5 m selama 6 hari.
17. Konsolidasi selama 45 hari.
18. Timbunan preloading 2 m selama 3 hari.
19. Konsolidasi selama 63 hari.

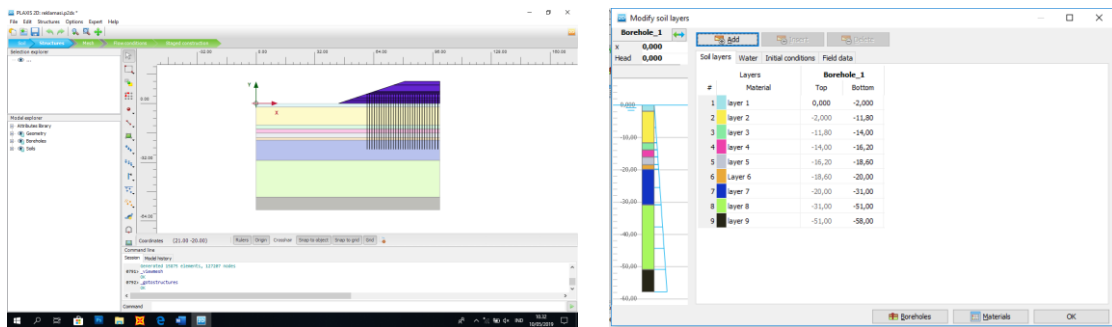
Tabel 1 Parameter input tanah dan PVD

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Lapisan 6	Lapisan 7	Lapisan 8	Lapisan 9	Timbunan	PVD
Jenis Tanah	Silty Clay	Clay	Silty Clay	Silty Sand	Silt	Clay	Silty Clay	Clay	Silty Clay	Pasir	
Kedalaman Lapisan (m)	2	9,8	2,2	2,2	2,4	1,4	11	20	7		
Type	Undraind	Undraind	Undraind	drained	Undrained	Undrained	Undraind	Undraind	Undraind	Drained	Drained
γ_{sat} (kN/m ³)	16	16,2	16,4	16,2	18	18	17,5	19	21	19,5	19,5
γ_{dry} (kN/m ³)	6,2	6,4	6,6	6,2	8,2	8,2	7,7	9,2	11,2	14,3	14,3
c (kN/m ²)	18	18	18	4	20	28	25	50	70	2,27	2,27
Φ (°)	1	1	2	17	2	1,5	1	1	1	33,1	33,1
Ψ (°)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,1	3,1
E (kN/m ²)	1800	2100	2500	7000	2100	4900	4000	4500	6500	10000	10000
K _x (m/hari)	0,000864	0,000864	0,000864	0,864	0,001728	0,000864	0,000864	0,000864	0,000864	8,64	8,64
K _y (m/hari)	0,000864	0,000864	0,000864	0,864	0,001728	0,000864	0,000864	0,000864	0,000864	8,64	8,64
μ	0,3	0,3	0,3	0,25	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2

2. Analisis Penurunan Konsolidasi dengan Plaxis 2D

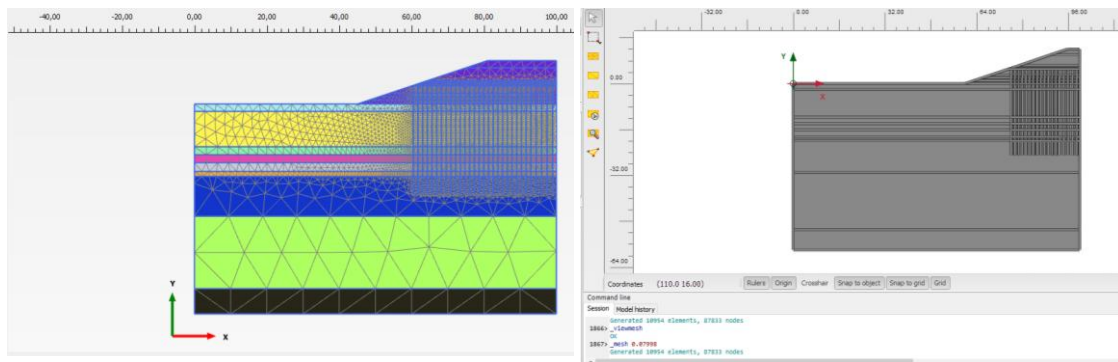
Secara umum tahapan analisis menggunakan plaxis 2D terdiri dari *soil*, *structure*, *generate mesh*, *flow condition*, *stage construction* dan *output*. Pada tahap awal (*soil*) dilakukan pemodelan tanah eksisting termasuk deklarasi semua parameter material yang dimodelkan. Mulai dari parameter tanah eksisting, tanah timbunan dan PVD yang digunakan pada objek penelitian (Gambar 2).

Tahap selanjutnya adalah pemodelan struktur timbunan dan PVD (Gambar 2). Tinggi timbunan pertahapan disesuaikan dengan kondisi lapangan yang mengacu pada data timbunan dan settlement plate.



Gambar 2 Pemodelan Tanah Eksisting, Konstruksi Timbunan dan PVD (kiri), Input Parameter Material Tanah (Kanan)

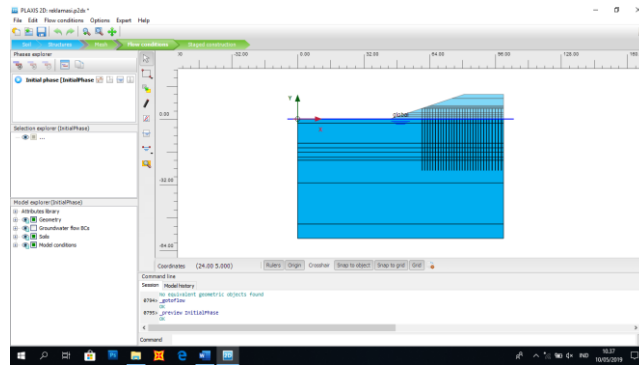
Setelah semua konstruksi dimodelkan dan input material selesai, maka selanjutnya dilakukan pendiskritisasian struktur menjadi elemen-elemen yang kecil pada tahap generate mesh (Gambar 3). Jenis *mesh* yang dipilih adalah *coarse mesh* (elemen kasar). Elemen kasar dipilih agar jumlah elemen tidak terlalu banyak sehingga perhitungan tidak terlalu lama.



Gambar 3 Jumlah mesh yang terbentuk adalah 10954 elemen

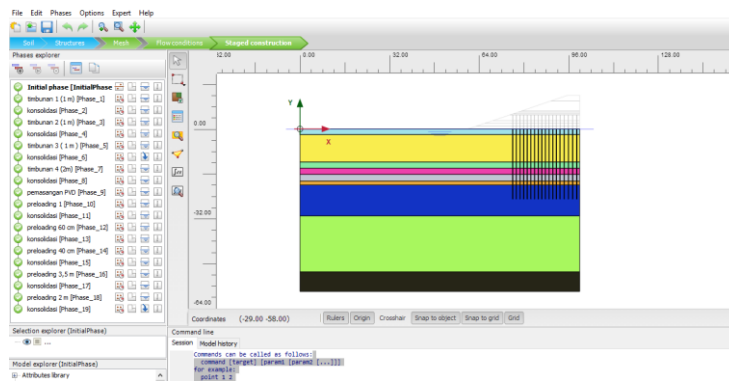
Kondisi aliran air eksisting (tahap flow condition) adalah tepat di permukaan tanah. Mengingat bahwa daerah reklamasi merupakan laut. Kondisi muka air tanah pada Plaxis dapat dilihat pada Gambar 4.

Analisis Proses Konsolidasi pada Perbaikan Tanah dengan Metode Preloading dan Penggunaan PVD pada Pekerjaan Reklamasi Menggunakan Plaxis 2D dan Plaxis 3D

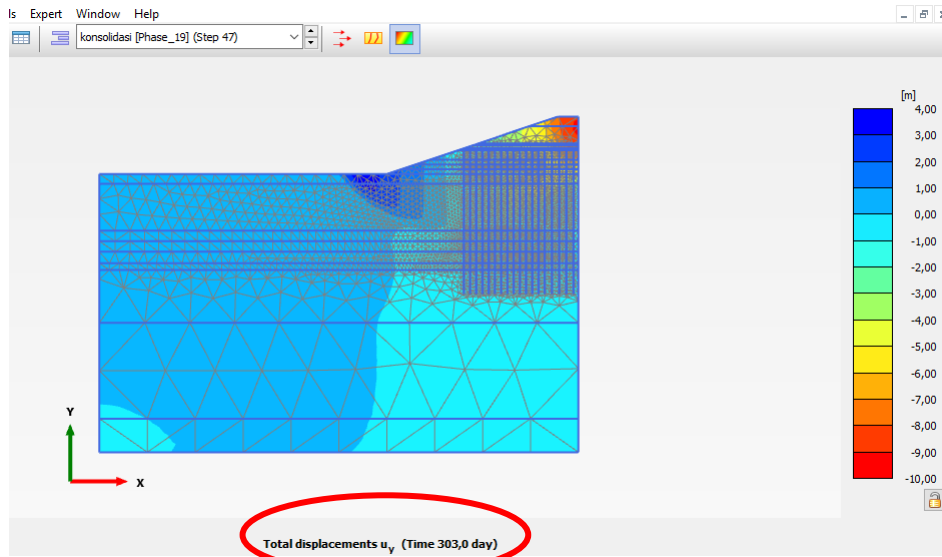


Gambar 4 Kondisi muka air tanah

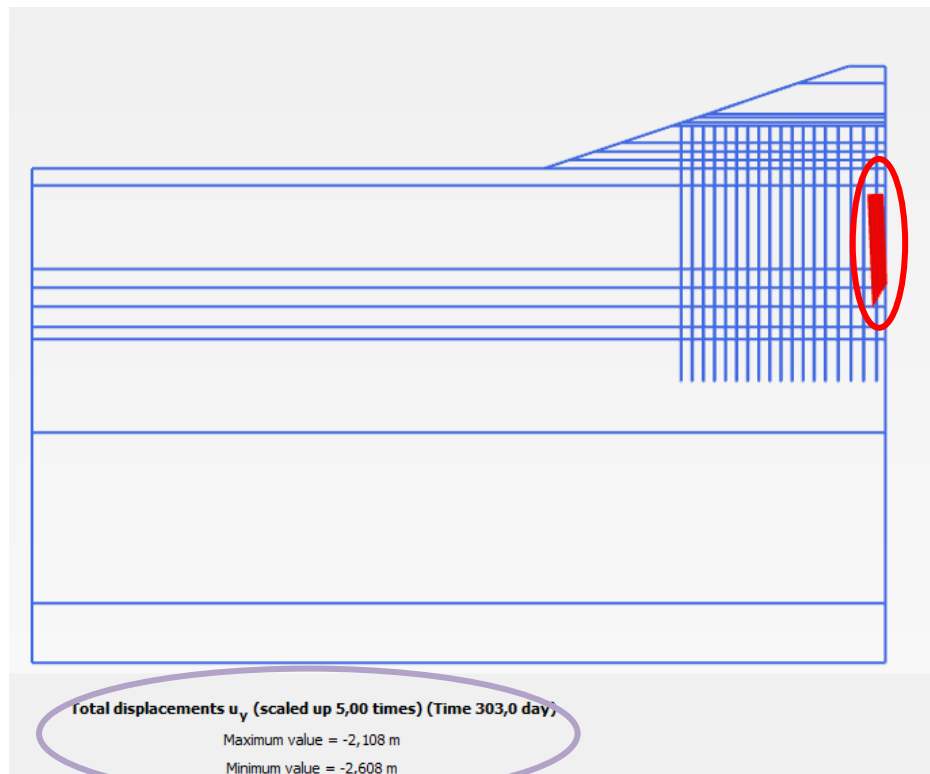
Tahapan selanjutnya adalah stage construction. Pada tahap ini dilakukan pemodelan tahapan konstruksi yang mewakili kondisi di lapangan. Fase perhitungan adalah sebanyak 19 phase sesuai yang telah dijelaskan pada tahapan pekerjaan sebelumnya. Fase perhitungan terlihat pada Gambar 5. Setelah semua fase selesai, selanjutnya menentukan titik yang akan ditinjau dan dilanjutkan dengan proses perhitungan (*calculate*). Hasil perhitungan (tahap *output*) dapat dilihat pada Gambar 6. Besar penurunan yang terjadi diakhir fase perhitungan sebesar 2,608 m dapat (Gambar 7). Sedangkan hasil penurunan yang terjadi sebelum *settlement plate* dipasang adalah sebesar 0,332 m (Gambar 8). Sehingga penurunan yang terjadi saat proses preloading adalah sebesar 2,276 m. Hasil perhitungan disajikan dalam grafik hubungan waktu dan besar penurunan (Gambar 9).



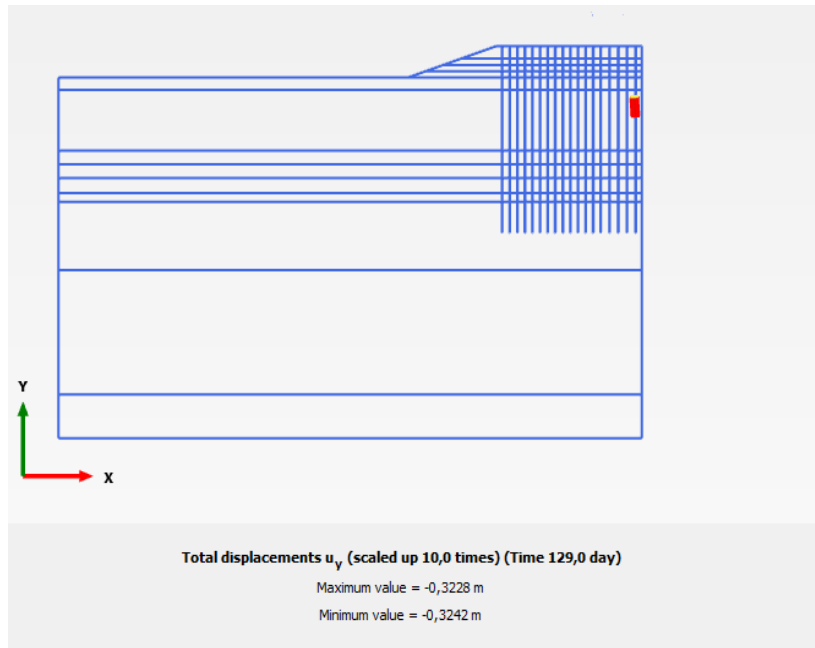
Gambar 5 Fase perhitungan



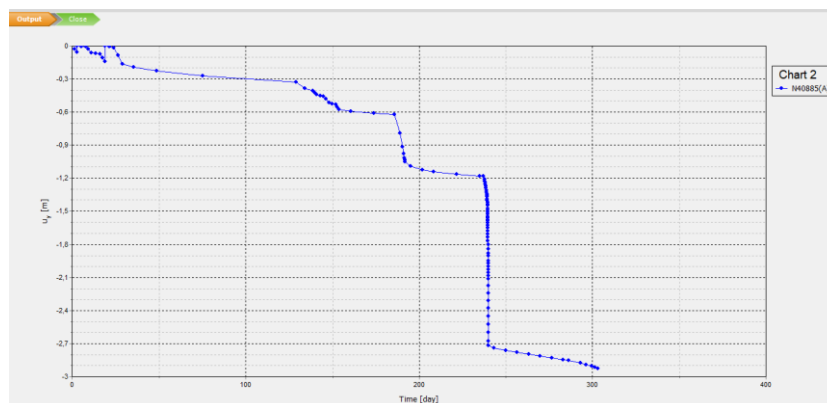
Gambar 6 Hasil perhitungan (total penurunan vertikal)



Gambar 7 Penurunan pada titik *settlement plate* sekitar 2,608 meter



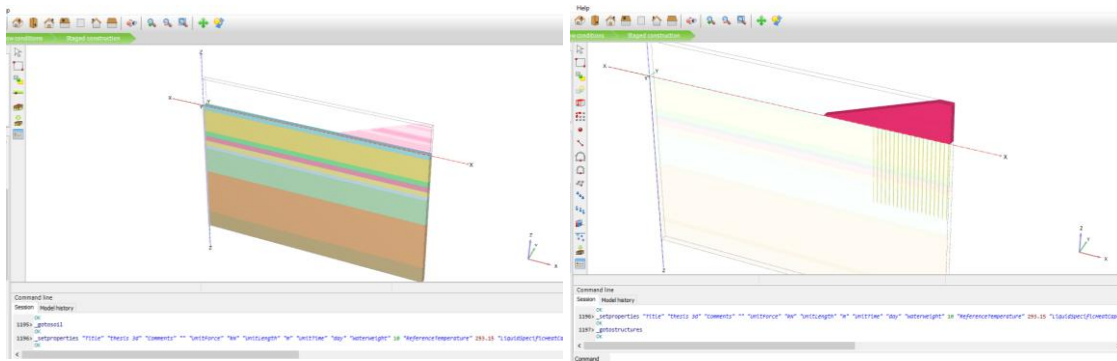
Gambar 8 Besar penurunan sebelum pemasangan *settlement plate* 0,32 meter



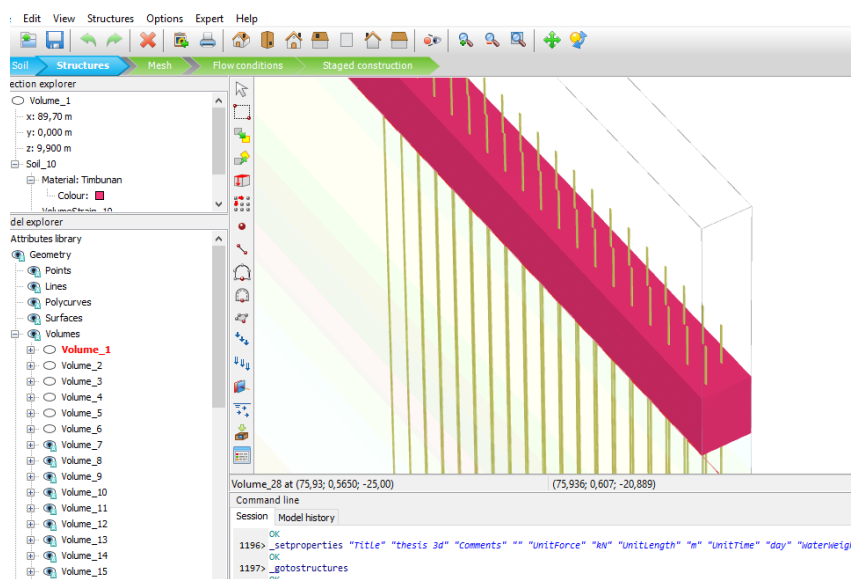
Gambar 9 Grafik hubungan antara penurunan vertikal dan waktu pada titik peninjauan

3. Analisis Penurunan Konsolidasi dengan Plaxis 3D

Analisis penurunan konsolidasi dengan Plaxis 3D memberikan pemodelan secara utuh untuk x, y dan z (Gambar 10). Pada analisis ini pemodelan dilakukan pada 2 baris pemasangan PVD (Gambar 11). Input parameter material yang digunakan sama dengan proses analisis dengan Plaxis 2D. Hasil diskritisasi struktur menjadi elemen (generate mesh) pada pemodelan ini menghasilkan 59750 elemen.



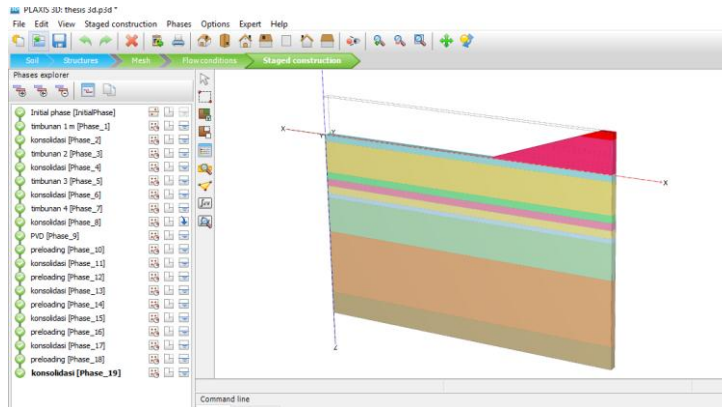
Gambar 10 Pemodelan Tanah Eksisting dan Konstruksi timbunan dan PVD



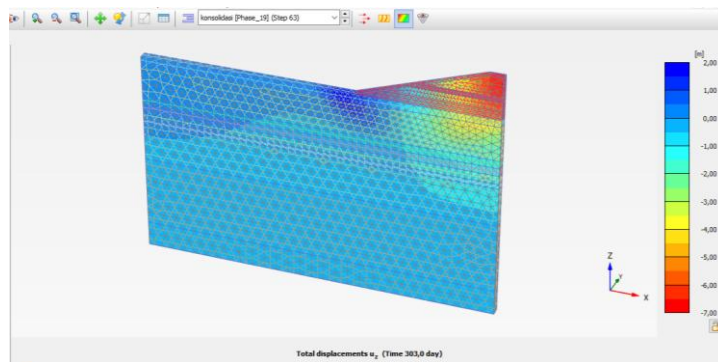
Gambar 11 PVD dipasang dengan susunan segitiga

Perhitungan dilakukan dengan 19 phase sesuai tahapan pekerjaan dilapangan. Tahapan *stage construction* terlihat pada Gambar 12. Selanjutnya dilakukan perhitungan. Hasil perhitungan terlihat pada Gambar 13. Penurunan yang terjadi dari setelah semua tahapan adalah sebesar 2,747 m (Gambar 14) dan penurunan sebelum pemasangan instrumen settlement plate sebesar 0,67 m (Gambar 15). Sehingga besar penurunan konsolidasi saat preloading sebesar 2,07 m.

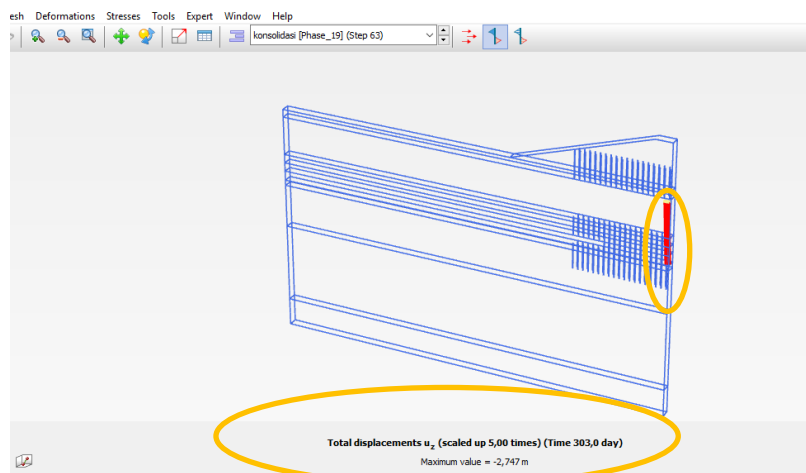
Analisis Proses Konsolidasi pada Perbaikan Tanah dengan Metode Preloading dan Penggunaan PVD pada Pekerjaan Reklamasi Menggunakan Plaxis 2D dan Plaxis 3D



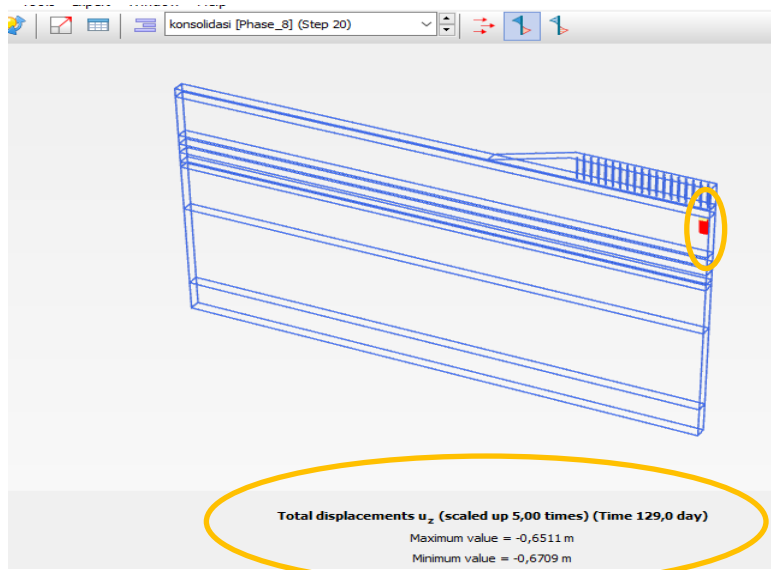
Gambar 12 Phase perhitungan



Gambar 13 Hasil Perhitungan Plaxis 3D



Gambar 14 Penurunan yang Terjadi pada Semua Tahap Pekerjaan Sebesar 2,747 Meter



Gambar 15 Penurunan yang terjadi hingga pemasangan *settlement plate* sebesar 0,67 meter

Kesimpulan

Hasil penelitian pada proyek reklamasi Belawan menunjukkan bahwa pemodelan Plaxis 3D (2,07 m) lebih akurat dibandingkan Plaxis 2D (2,276 m) dalam memprediksi penurunan konsolidasi (data lapangan: 1,992 m), dengan selisih masing-masing 4,27% dan 14,86%. Temuan ini membuktikan keandalan pemodelan numerik sebagai alat prediksi dalam perencanaan reklamasi. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk: (1) mengevaluasi faktor akurasi pemodelan seperti parameter tanah dan geometri, (2) mengembangkan model numerik lebih akurat dengan kalibrasi data lapangan dan perbandingan software, (3) mengoptimasi desain PVD dan preloading, (4) membandingkan metode perbaikan tanah alternatif, (5) memodelkan dampak jangka panjang dan lingkungan, (6) meningkatkan pemantauan lapangan berbasis IoT, serta (7) mengintegrasikan AI dan machine learning untuk prediksi yang lebih efisien. Langkah-langkah ini diharapkan dapat menyempurnakan akurasi dan aplikasi praktis pemodelan konsolidasi dalam rekayasa geoteknik.

REFERENSI

- Adinegoro, C., Sholeh, M., & Novianto, D. (2021). Metode Pelaksanaan Perbaikan Tanah Menggunakan Metode Preloading Dan Prefabricated Vertical Drain (PVD) Pada Terminal Internasional Kijing Pontinak. *Jurnal Online Skripsi Manajemen Rekayasa Konstruksi (JOS-MRK)*, 2(2), 158–162.
- Aini, I. A., Maulana, E. I., & Santoso, H. T. (2023a). Evaluasi Metode Perbaikan Tanah Lunak dengan Preloading Kombinasi PVD-PHD pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Semarang-Demak Paket II: Evaluation of Soft Soil Improvement Methods Using Combination of Preloading and PVD-PHD on Semarang-Demak II Toll Road Project. *Bentang: Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 11(1), 21–36.

- Aini, I. A., Maulana, E. I., & Santoso, H. T. (2023b). Evaluasi Metode Perbaikan Tanah Lunak dengan Preloading Kombinasi PVD-PHD pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Semarang-Demak Paket II: Evaluation of Soft Soil Improvement Methods Using Combination of Preloading and PVD-PHD on Semarang-Demak II Toll Road Project. *Bentang: Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 11(1), 21–36.
- Aspara, W. A. N., & Fitriani, E. N. (2016). Pengaruh Jarak Dan Pola Prefabricated Vertical Drain (Pvd) Pada Perbaikan Tanah Lempung Lunak= Effect of Distance and Pattern of Prefabricated Vertical Drain for Improvement of Soft Clay Soil. *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, 10(1), 41–50.
- Berliano, H. A. (2020). Kajian Teknis Perbaikan Tanah Lunak Menggunakan Metode Kombinasi Vacuum dan Preloading dengan PVD dan PHD Pada Area Container Yard Pelabuhan Terminal Kijing Kalimantan Barat. *Jurnal Dosen Dan Mahasiswa Universitas Tanjung Pura*.
- Garuan, I. H., & Suranto, S. (2016). Evaluasi Program Penataan Kawasan Pesisir Kota Ternate (Studi Kasus Program Reklamasi Pantai Halmahera 2014). *Journal of Governance and Public Policy*, 3(1).
- Izza, R. F., Gunawan, R., & Jalil, A. (2023). Analisis Stabilitas Lereng pada Perencanaan Penatagunaan Lahan Reklamasi Daerah Rawan Bencana di Gunung Merapi. *Jurnal Sumberdaya Bumi Berkelanjutan (SEMATAN)*, 2(1), 9–19.
- Meiwa, S., Ikhya, & Hamdhan, I. N. (2015). Analisis Konsolidasi dengan PVD untuk Kondisi Axisymmetric dan Beberapa Metode Ekuivalensi Plane Strain Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Institut Teknologi Nasional*.
- Ningsih, A. C. (2018). *Perencanaan perbaikan tanah lunak menggunakan metode preloading dan prefabricated vertical drain (PVD)*.
- Pinrang, L. K. K. (n.d.). *Choirl Huda, Moch. 2013. Jurnal: Pengaturan Perizinan Reklamasi Pantai Terhadap Perlindungan Lingkungan Hidup. Perspektif*.
- Raden, W. M., Hamdhan, I. N., & Bemby, S. (2016). Pemodelan Verical Drain dengan Menggunakan Model Elemen Hingga pada Analisis Konsolidasi di Bendungan Marangkayu Kalimantan Timur. *Jurnal Institut Teknologi Nasional*, 2(3).
- Ruhilla, N. M., & Hanshi, B. (2024). Daya Dukung Tanah Dan Pondasi: Memahami Pondasi Dangkal Dan Menengah. *Mozaik: Journal of Art and Architecture*, 2(2), 54–59.
- Setiawan, I. (2019). *Analisis Penurunan Dan Waktu Konsolidasi Pada Perbaikan Tanah Lunak Dengan Metode Preloading Dan Prefabricated Vertical Drain Dengan Pemodelan Mohr Coulomb*.
- Suardi, E., Liliwanti, Misriani, M., & Iqbal, I. (2021). Perbaikan Tanah Lempung Lunak dengan Metode Preloading pada Jalan Tol Palembang-Indralaya Sta 1+670. *Jurnal Teknik Sipil*, 10(2).
- Suhendra, A., & Irsyam, M. (2011). Studi Aplikasi Vacuum Preloading Sebagai Metode Alternatif Percepatan Proses Konsolidasi pada Tanah Lempung Lunak Jenuh Air: Trial GVS pada Perumahan Pantai Indah Kapuk, Jakarta. *ComTech: Computer, Mathematics and Engineering Applications*, 2(2), 1055–1065.
- Triatmodjo, B. (2012). *Teknik Pantai*. Beta Offset.
- Zhafirah, A., & Amalia, D. (2019a). Perencanaan Preloading Dengan Penggunaan Prefabricated Vertical Drain Untuk Perbaikan Tanah Lunak Pada Jalan Tol Pejagan-Pemalang. *Potensi: Jurnal Sipil Politeknik*, 21(1), 10–18.

Titi Hayati, Fatimah Insani Harahap

Zhafirah, A., & Amalia, D. (2019b). Perencanaan Preloading Dengan Penggunaan Prefabricated Vertical Drain Untuk Perbaikan Tanah Lunak Pada Jalan Tol Pejagan-Pemalang. *Potensi: Jurnal Sipil Politeknik*, 21(1), 10–18.

Zhafirah, A., & Amalia, D. (2019c). Perencanaan Preloading Dengan Penggunaan Prefabricated Vertical Drain Untuk Perbaikan Tanah Lunak Pada Jalan Tol Pejagan-Pemalang. *Potensi: Jurnal Sipil Politeknik*, 21(1), 10–18.

Copyright holder:

Titi Hayati, Fatimah Insani Harahap (2025)

First publication right:

Syntax Admiration

This article is licensed under:

