

Analisis Perbandingan Pemodelan Plaxis 2D dan Plaxis 3D pada Konsolidasi Tanah Reklamasi Menggunakan Prefabricated Vertical Drain

Dinda Sekar Selni Prawardani^{1*}, Bartolomeus Krismanto Pauta², Marina Abriani Butudoka³

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Cenderawasih, Jayapura, Papua, Indonesia

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Musamus, Merauke, Papua Selatan, Indonesia

³Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sorong, Sorong, Papua Barat Daya, Indonesia

*Penulis korespondensi, email: dinda.sekar@uncen.ac.id

Abstrak— Tanah reklamasi umumnya memiliki karakteristik kompresibilitas tinggi sehingga memerlukan perbaikan tanah untuk mempercepat proses konsolidasi. Penggunaan Prefabricated Vertical Drain (PVD) merupakan salah satu metode yang banyak diterapkan, namun proses instalasinya dapat menimbulkan zona terganggu (smear zone) yang memengaruhi kinerja drainase dan besarnya penurunan tanah. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh smear zone terhadap prediksi penurunan konsolidasi serta membandingkan hasil pemodelan menggunakan Plaxis 2D dan Plaxis 3D pada tanah reklamasi. Metode penelitian dilakukan melalui pemodelan numerik berbasis metode elemen hingga dengan mempertimbangkan karakteristik smear zone pada beberapa tingkat kehalusan mesh, yaitu very coarse, coarse, medium, fine, dan very fine. Data lapangan berupa parameter tanah, konfigurasi PVD, dan hasil pengamatan penurunan digunakan sebagai dasar analisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi mesh menghasilkan nilai penurunan yang bersifat fluktuatif dan tidak menunjukkan hubungan linier terhadap tingkat kehalusan mesh. Pemodelan Plaxis 3D menghasilkan prediksi penurunan yang lebih mendekati data lapangan dibandingkan Plaxis 2D. Dengan demikian, representasi tiga dimensi memberikan akurasi yang lebih baik dalam menganalisis pengaruh smear zone pada tanah reklamasi. Penelitian ini merekomendasikan penggunaan pemodelan tiga dimensi untuk evaluasi desain perbaikan tanah dengan PVD. Temuan penelitian dapat menjadi referensi bagi perencana dan praktisi geoteknik dalam meningkatkan keandalan prediksi penurunan tanah pada proyek reklamasi.

Kata kunci: konsolidasi, smear zone, PVD, Plaxis.

This article is licensed under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

1. Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur pada kawasan pesisir dan lahan reklamasi terus mengalami peningkatan seiring dengan kebutuhan pengembangan pelabuhan, kawasan industri, kawasan logistik, dan fasilitas transportasi. Salah satu permasalahan utama yang sering dijumpai pada pembangunan di atas tanah reklamasi adalah keberadaan tanah lunak yang memiliki daya dukung rendah, kompresibilitas tinggi, dan permeabilitas yang relatif kecil. Karakteristik tersebut menyebabkan tanah mengalami penurunan yang cukup besar serta membutuhkan waktu konsolidasi yang panjang sebelum mencapai kondisi stabil. Apabila tidak ditangani dengan baik, penurunan yang terjadi dapat menimbulkan kerusakan konstruksi, ketidaknyamanan operasional, hingga penurunan umur layanan infrastruktur [1].

Konsolidasi merupakan proses berkurangnya volume tanah akibat keluarnya air pori dari dalam lapisan tanah yang menerima pembebanan. Besarnya penurunan konsolidasi dipengaruhi oleh sifat fisik dan mekanik tanah, kondisi drainase, serta besarnya beban yang bekerja pada lapisan tanah tersebut [2]. Pada tanah lunak, proses konsolidasi alami dapat berlangsung selama bertahun-tahun sehingga sering menjadi kendala dalam pelaksanaan proyek konstruksi yang memiliki target waktu terbatas. Oleh karena itu, diperlukan metode perbaikan tanah yang mampu mempercepat proses konsolidasi tanpa mengurangi keamanan dan kinerja konstruksi.

Salah satu metode yang banyak digunakan untuk mempercepat konsolidasi tanah lunak adalah kombinasi preloading dan Prefabricated Vertical Drain (PVD). Metode ini bekerja dengan memperpendek jalur aliran air pori sehingga tekanan air pori berlebih dapat terdisipasi lebih cepat dibandingkan kondisi alami. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penggunaan PVD mampu mempercepat proses konsolidasi secara signifikan dan mengurangi waktu tunggu sebelum konstruksi permanen dilaksanakan [3]–[5]. Selain itu, kombinasi PVD dengan metode preloading maupun vacuum preloading terbukti efektif meningkatkan kinerja perbaikan tanah lunak pada berbagai kondisi lapangan [6], [7].

Keberhasilan sistem PVD dalam mempercepat konsolidasi tidak hanya dipengaruhi oleh pola pemasangan, jarak antar drain, dan kedalaman instalasi, tetapi juga oleh perubahan karakteristik tanah yang terjadi selama proses pemasangan. Pada saat mandrel PVD dipancarkan ke dalam tanah, struktur tanah di sekitar drain mengalami gangguan yang dikenal sebagai smear zone. Zona terganggu tersebut menyebabkan penurunan permeabilitas horizontal tanah sehingga aliran air pori menuju drain menjadi lebih lambat. Kondisi ini dapat mengurangi efektivitas PVD dan menyebabkan perbedaan antara hasil prediksi dengan kondisi aktual di lapangan apabila pengaruh smear zone tidak diperhitungkan dalam analisis.

Perkembangan teknologi komputasi memungkinkan analisis konsolidasi dilakukan menggunakan metode elemen hingga (finite element method) yang mampu memodelkan perilaku tanah secara lebih realistis dibandingkan metode analitis konvensional. Salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan dalam analisis geoteknik adalah Plaxis. Penggunaan Plaxis telah diterapkan secara luas untuk memprediksi penurunan tanah, deformasi, serta respons tanah terhadap berbagai metode perbaikan tanah lunak [8]–[11]. Penelitian lainnya juga menunjukkan bahwa metode elemen hingga mampu memberikan hasil prediksi penurunan yang representatif pada berbagai kondisi geoteknik [12].

Plaxis tersedia dalam dua platform utama, yaitu Plaxis 2D dan Plaxis 3D. Kedua platform tersebut memiliki pendekatan pemodelan yang berbeda dalam merepresentasikan geometri, kondisi drainase, dan perilaku tanah. Pemodelan dua dimensi umumnya menggunakan pendekatan plane strain sehingga lebih sederhana dan membutuhkan waktu komputasi yang lebih singkat. Sebaliknya, pemodelan tiga dimensi mampu menggambarkan kondisi lapangan secara lebih realistis karena mempertimbangkan geometri ruang yang sebenarnya. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa hasil analisis konsolidasi menggunakan Plaxis 2D dan Plaxis 3D dapat menghasilkan prediksi yang berbeda meskipun menggunakan parameter tanah yang sama [13], [14]. Selain itu, pemilihan model numerik dan pendekatan pemodelan juga dapat memengaruhi hasil prediksi deformasi dan penurunan yang diperoleh dari analisis elemen hingga [15]. Kajian mengenai pemodelan tiga dimensi pada perbaikan tanah lunak juga menunjukkan bahwa representasi geometri yang lebih realistis dapat meningkatkan akurasi hasil simulasi dibandingkan pendekatan dua dimensi [16].

Faktor lain yang turut memengaruhi hasil analisis numerik adalah tingkat kehalusan mesh yang digunakan dalam proses diskretisasi model. Mesh yang terlalu kasar dapat mengurangi ketelitian hasil analisis, sedangkan mesh yang terlalu halus akan meningkatkan kebutuhan waktu komputasi. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa variasi mesh pada Plaxis 2D dan Plaxis 3D dapat menghasilkan nilai penurunan yang berbeda sehingga diperlukan evaluasi untuk menentukan tingkat mesh yang memberikan hasil paling representatif terhadap kondisi lapangan [17].

Di sisi lain, validasi hasil analisis numerik terhadap data lapangan menjadi aspek penting dalam memastikan keandalan model yang digunakan. Data settlement plate dan CPTu dapat digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi akurasi prediksi penurunan pada proyek perbaikan tanah menggunakan PVD [18]. Namun demikian, penelitian yang secara khusus membandingkan pengaruh smear zone terhadap prediksi penurunan konsolidasi menggunakan Plaxis 2D dan Plaxis 3D dengan mempertimbangkan variasi tingkat kehalusan mesh masih relatif terbatas, terutama pada kasus tanah reklamasi.

Berdasarkan kajian tersebut, terdapat kesenjangan penelitian (research gap) berupa terbatasnya studi yang mengevaluasi secara komprehensif pengaruh smear zone terhadap hasil prediksi penurunan konsolidasi pada pemodelan dua dimensi dan tiga dimensi dengan variasi mesh yang berbeda. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada efektivitas PVD, metode perbaikan tanah, atau penggunaan salah satu platform pemodelan tanpa melakukan perbandingan langsung antara Plaxis 2D dan Plaxis 3D dalam merepresentasikan pengaruh smear zone.

Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada analisis komparatif pengaruh smear zone terhadap prediksi penurunan konsolidasi tanah reklamasi menggunakan Plaxis 2D dan Plaxis 3D dengan variasi mesh very coarse, coarse, medium, fine, dan very fine. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi yang lebih komprehensif mengenai tingkat akurasi masing-masing model dalam merepresentasikan kondisi lapangan serta sensitivitas hasil analisis terhadap perubahan mesh.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh smear zone terhadap prediksi penurunan konsolidasi tanah reklamasi menggunakan pemodelan Plaxis 2D dan Plaxis 3D, membandingkan hasil prediksi kedua model terhadap data lapangan, serta mengevaluasi pengaruh variasi tingkat kehalusan mesh terhadap hasil analisis. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi bagi akademisi, perencana, dan praktisi geoteknik dalam menentukan pendekatan pemodelan yang lebih tepat untuk analisis konsolidasi tanah lunak yang diperbaiki menggunakan Prefabricated Vertical Drain (PVD).

2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui analisis numerik berbasis metode elemen hingga (finite element method) untuk mengevaluasi pengaruh smear zone terhadap prediksi penurunan konsolidasi tanah reklamasi menggunakan Plaxis 2D dan Plaxis 3D. Studi dilakukan pada kawasan reklamasi Pelabuhan Sorong, Papua Barat Daya, yang memiliki karakteristik tanah lunak dan memerlukan perbaikan tanah menggunakan Prefabricated Vertical Drain (PVD) guna mempercepat proses konsolidasi. Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1. Data yang digunakan dalam penelitian meliputi data investigasi tanah, parameter geoteknik hasil pengujian laboratorium, konfigurasi pemasangan PVD, tahapan penimbunan, serta data pengamatan penurunan lapangan yang diperoleh dari titik settlement plate.

Berdasarkan hasil investigasi geoteknik, lapisan tanah pada lokasi penelitian terdiri atas beberapa jenis tanah dengan karakteristik mekanik dan hidraulik yang berbeda. Setiap lapisan tanah diklasifikasikan berdasarkan kondisi drainase dan model konstitutif yang digunakan dalam analisis numerik. Rekapitulasi karakteristik lapisan tanah yang digunakan dalam pemodelan ditunjukkan pada Tabel 1.

Parameter tanah yang digunakan sebagai data masukan dalam Plaxis meliputi berat isi tanah, berat isi jenuh, modulus elastisitas, rasio Poisson, kohesi, sudut geser dalam, indeks kompresi, indeks rekonsolidasi, serta koefisien permeabilitas arah vertikal dan horizontal. Lapisan tanah yang memiliki data pengujian konsolidasi dimodelkan menggunakan model Soft Soil untuk memperoleh representasi perilaku kompresibilitas yang lebih realistis, sedangkan lapisan tanah lainnya dimodelkan menggunakan model Mohr-Coulomb. Nilai parameter diperoleh dari hasil pengujian laboratorium dan korelasi berdasarkan data investigasi lapangan.



Gambar 1. Lokasi penelitian pada kawasan reklamasi Pelabuhan Sorong, Papua Barat Daya

Tabel 1. Karakteristik lapisan tanah pada lokasi penelitian

No	Jenis Tanah	Kedalaman (m)	Tebal (m)	Kondisi Drainase	Model Tanah
1	Sandy Clay	0–2	2	Drained	Mohr-Coulomb
2	Soft Clay	2–16	14	Undrained	Soft Soil
3	Sandy Silt	16–20	4	Drained	Mohr-Coulomb
4	Organic Clay	20–25	5	Undrained	Soft Soil
5	Clayey Sand	25–35	10	Drained	Mohr-Coulomb
6	Silty Clay	35–45	10	Undrained	Soft Soil
7	Dense Sand	45–60	15	Drained	Mohr-Coulomb

Perbaikan tanah pada lokasi penelitian dilakukan menggunakan sistem PVD dengan pola pemasangan segitiga. Jarak antar drain ditetapkan sebesar 1,50 m dengan kedalaman instalasi mencapai 44 m dari permukaan timbunan. Proses pemasangan PVD menggunakan mandrel menyebabkan terbentuknya zona tanah terganggu (smear zone) di sekitar drain. Untuk memperhitungkan pengaruh tersebut, dilakukan perhitungan diameter ekuivalen drain, diameter mandrel, diameter smear zone, serta rasio permeabilitas tanah terganggu terhadap tanah asli. Skema pemasangan PVD dan representasi smear zone dalam pemodelan ditunjukkan pada Gambar 2.

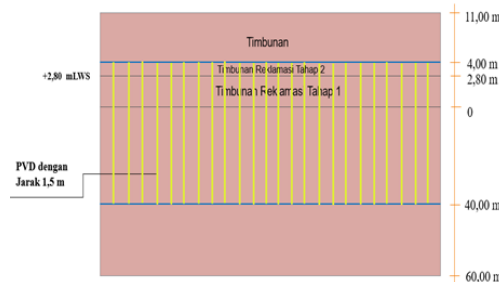
Pengaruh smear zone dimasukkan ke dalam model melalui modifikasi nilai koefisien permeabilitas horizontal pada area yang mengalami gangguan akibat instalasi PVD. Pendekatan ini digunakan untuk merepresentasikan penurunan kemampuan aliran air pori menuju drain sehingga proses disipasi tekanan air pori dapat dimodelkan secara lebih realistis. Nilai parameter smear zone ditentukan berdasarkan hubungan antara radius drain, radius zona terganggu, radius pengaruh drain, serta rasio permeabilitas tanah terganggu dan tanah asli.

Pemodelan numerik dilakukan menggunakan Plaxis 2D dan Plaxis 3D dengan tahapan konstruksi yang disesuaikan dengan kondisi aktual di lapangan. Pada Plaxis 2D digunakan pendekatan plane strain yang merepresentasikan pengaruh PVD secara ekuivalen, sedangkan pada Plaxis 3D digunakan representasi geometri drain yang lebih mendekati kondisi sebenarnya. Tahapan analisis mencakup pembentukan kondisi awal tanah, pemasangan PVD, penambahan timbunan secara bertahap, serta simulasi proses konsolidasi hingga tercapai kondisi akhir. Untuk mengevaluasi sensitivitas hasil terhadap kualitas diskretisasi elemen hingga, analisis dilakukan menggunakan lima tingkat kehalusan mesh, yaitu very coarse, coarse, medium, fine, dan very fine.

Model numerik yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Gambar 3. Hasil analisis berupa penurunan konsolidasi, distribusi deformasi, dan respons konsolidasi pada setiap variasi mesh kemudian dibandingkan antara Plaxis 2D dan Plaxis 3D. Selanjutnya, hasil prediksi dari kedua model divalidasi terhadap data penurunan lapangan yang diperoleh dari settlement plate untuk mengevaluasi tingkat akurasi masing-masing pendekatan pemodelan.



Gambar 2. Skema pemasangan PVD dan representasi smear zone



Gambar 3. Pemodelan numerik tanah reklamasi menggunakan Plaxis 2D dan Plaxis 3D

Data hasil analisis diolah secara komparatif dengan membandingkan nilai penurunan konsolidasi yang diperoleh dari setiap variasi mesh pada kedua jenis pemodelan. Tingkat kesesuaian hasil analisis terhadap data lapangan dievaluasi menggunakan persentase selisih prediksi penurunan. Pendekatan ini digunakan untuk menentukan model yang memberikan representasi paling mendekati kondisi aktual sekaligus mengidentifikasi pengaruh smear zone terhadap hasil prediksi konsolidasi tanah reklamasi.

3. Hasil dan Pembahasan

Analisis konsolidasi dilakukan dengan mempertimbangkan pengaruh smear zone yang terbentuk akibat pemasangan Prefabricated Vertical Drain (PVD) pada tanah reklamasi. Sebelum pemodelan numerik dilakukan, diperlukan proses verifikasi parameter drainase dengan mengonversi sistem PVD diskrit menjadi sistem ekuivalen plane strain sehingga dapat digunakan pada pemodelan Plaxis 2D. Pada penelitian ini, PVD dipasang hingga kedalaman 44 m dari permukaan timbunan. Oleh karena itu, seluruh lapisan tanah yang berada dalam zona pengaruh pemasangan PVD diasumsikan mengalami gangguan akibat penetrasi mandrel.

Parameter geometri PVD dan mandrel digunakan untuk menghitung karakteristik smear zone, meliputi diameter ekuivalen drain, diameter mandrel, radius pengaruh drain, dan radius zona terganggu. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pemasangan PVD dengan jarak 1,50 m dan pola segitiga menghasilkan perubahan karakteristik permeabilitas horizontal tanah di sekitar drain. Penurunan permeabilitas ini terjadi akibat kerusakan struktur tanah selama proses instalasi sehingga aliran air pori menuju drain menjadi lebih lambat dibandingkan kondisi tanah yang tidak terganggu.

Perubahan nilai koefisien permeabilitas horizontal setelah memperhitungkan pengaruh smear zone disajikan pada Tabel 2. Nilai tersebut selanjutnya digunakan sebagai parameter masukan dalam pemodelan numerik untuk merepresentasikan kondisi aktual di lapangan.

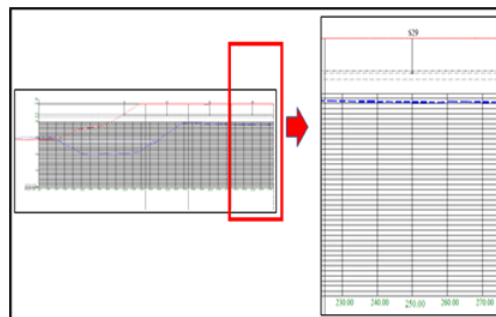
Tabel 2. Nilai koefisien permeabilitas horizontal setelah memperhitungkan pengaruh smear zone

Jenis Tanah	k_x	k_y
Sandy Clay	0,0001	0,0005

Jenis Tanah	k_x	k_y
Clay	0,0001	0,0005
Sandy Silt	0,0001	0,0005
Organic Clay	0,0387	0,2182
Clayey Sand 1	0,0027	0,0153
Silty Clay 1	0,0001	0,0005
Clayey Sand 2	0,0027	0,0153
Silty Clay 2	0,0001	0,0005

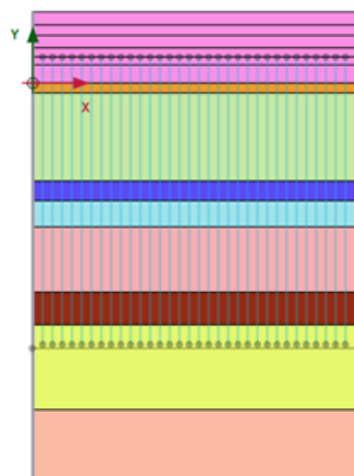
Perhitungan nilai permeabilitas ekuivalen menunjukkan bahwa pengaruh smear zone menyebabkan penurunan kemampuan drainase tanah di sekitar PVD. Kondisi ini berimplikasi langsung terhadap laju disipasi tekanan air pori dan besarnya penurunan konsolidasi yang terjadi selama masa pembebanan. Oleh karena itu, pengabaian pengaruh smear zone berpotensi menghasilkan prediksi konsolidasi yang kurang akurat.

Setelah parameter smear zone ditentukan, dilakukan pemodelan numerik menggunakan Plaxis 2D dan Plaxis 3D. Lokasi pengamatan difokuskan pada titik settlement plate yang berada di tengah area reklamasi sehingga dianggap mampu merepresentasikan respons deformasi tanah terhadap pembebanan timbunan. Penampang melintang yang digunakan sebagai dasar pemodelan ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Penampang melintang lokasi pengamatan pada area reklamasi

Tahapan konstruksi yang dimodelkan pada Plaxis disusun sesuai kondisi lapangan, mulai dari kondisi awal tanah, pemasangan PVD, penimbunan bertahap, hingga proses konsolidasi akhir. Pendekatan ini bertujuan agar respons deformasi yang dihasilkan model dapat mendekati kondisi aktual. Representasi lapisan tanah dan sistem PVD dalam model numerik ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Pemodelan lapisan tanah dan sistem PVD menggunakan Plaxis

Analisis dilakukan menggunakan lima tingkat kehalusan mesh, yaitu very coarse, coarse, medium, fine, dan very fine. Variasi mesh digunakan untuk mengevaluasi sensitivitas hasil analisis terhadap jumlah elemen dan node yang terbentuk pada model. Hasil prediksi penurunan konsolidasi yang diperoleh dari Plaxis 2D dan Plaxis 3D disajikan pada Tabel 3.

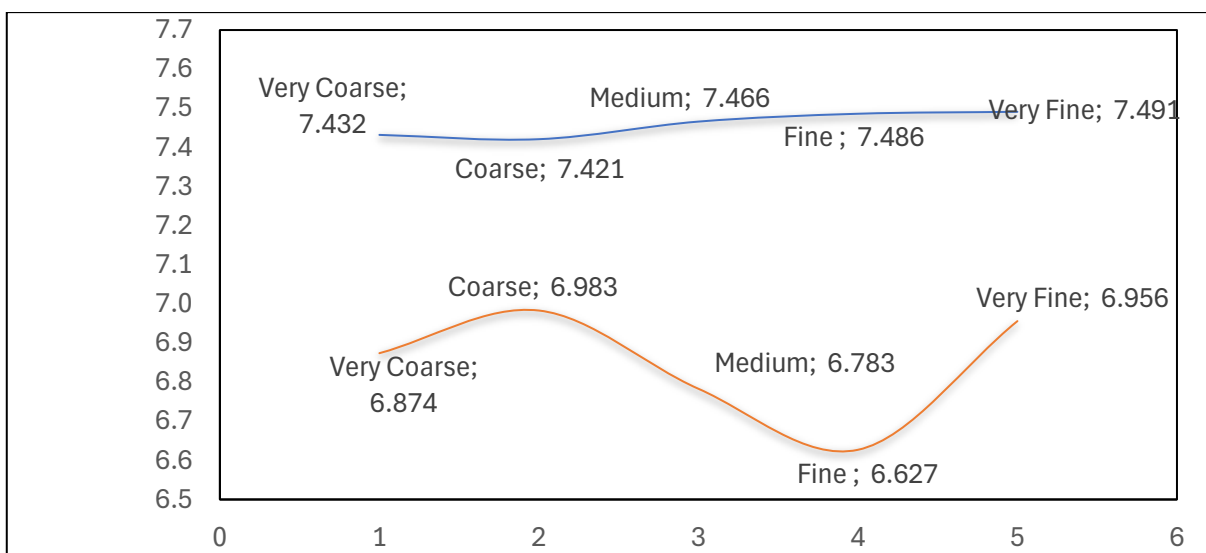
Tabel 3. Hasil prediksi penurunan konsolidasi menggunakan Plaxis 2D dan Plaxis 3D

Pemodelan Plaxis	Tipe Mesh Plaxis	Mesh		Prediksi Penurunan (m)
		Jumlah Elemen	Jumlah Node	
2D	Very Coarse	2.065	16.875	7,432
	Coarse	2.774	22.617	7,421
	Medium	3.213	26.143	7,466
	Fine	7.539	60.767	7,486
	Very Fine	11.279	90.711	7,491
3D	Very Coarse	110.529	148.799	6,874
	Coarse	110.529	148.799	6,983
	Medium	110.643	149.006	6,783
	Fine	110.868	149.591	6,627

Berdasarkan Tabel 3 terlihat bahwa peningkatan tingkat kehalusan mesh tidak selalu menghasilkan perubahan nilai penurunan secara linier. Pada pemodelan Plaxis 2D, prediksi penurunan berada pada rentang 7,421–7,491 m, sedangkan pada Plaxis 3D berada pada rentang 6,627–6,983 m. Hasil ini menunjukkan bahwa sensitivitas mesh terhadap nilai penurunan relatif kecil, namun tetap memengaruhi hasil akhir analisis.

Perbedaan hasil antara Plaxis 2D dan Plaxis 3D terjadi karena kedua model menggunakan pendekatan representasi drainase yang berbeda. Pada Plaxis 2D, pengaruh PVD direpresentasikan menggunakan parameter permeabilitas ekuivalen plane strain, sedangkan pada Plaxis 3D geometri drain dan zona pengaruhnya dapat dimodelkan secara lebih realistis. Akibatnya, respons deformasi yang dihasilkan kedua model menunjukkan perbedaan meskipun menggunakan parameter tanah yang sama.

Perbandingan hasil penurunan konsolidasi antara Plaxis 2D dan Plaxis 3D dapat diamati secara visual pada Gambar 6.



Gambar 6. Perbandingan hasil prediksi penurunan konsolidasi menggunakan Plaxis 2D dan Plaxis 3D

Untuk mengevaluasi tingkat akurasi model, hasil analisis dibandingkan dengan data penurunan aktual yang diperoleh dari settlement plate. Rekapitulasi hasil perbandingan tersebut disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan hasil prediksi penurunan terhadap data lapangan

No	Pemodelan	Penurunan (m)	Perbedaan Prediksi Penurunan dengan Lapangan (S29) (m)	Persentase Perbedaan Penurunan (%)
1	Data Lapangan (S29)	7,190		
2	Plaxis 2D			
	Very Coarse	7,432	0,242	3,37%
	Coarse	7,421	0,231	3,21%
	Medium	7,466	0,276	3,84%
	Fine	7,486	0,296	4,12%
	Very Fine	7,491	0,301	4,19%
3	Plaxis 3D			
	Very Coarse	6,874	-0,316	-4,39%
	Coarse	6,983	-0,207	-2,88%
	Medium	6,783	-0,407	-5,66%
	Fine	6,627	-0,563	-7,83%
	Very Fine	6,956	-0,234	-3,25%

Hasil pada Tabel 4 menunjukkan bahwa seluruh pemodelan memberikan tingkat kesalahan relatif kecil terhadap data lapangan. Namun demikian, pemodelan Plaxis 3D menghasilkan nilai yang lebih dekat terhadap hasil pengamatan aktual pada beberapa variasi mesh. Selisih terkecil diperoleh pada mesh coarse Plaxis 3D dengan perbedaan sebesar -2,88%, sedangkan pada Plaxis 2D selisih terkecil terjadi pada mesh coarse sebesar 3,21%.

Temuan ini menunjukkan bahwa representasi tiga dimensi mampu menggambarkan pengaruh smear zone dan interaksi drainase tanah secara lebih realistis dibandingkan pendekatan dua dimensi. Selain itu, hasil penelitian mengindikasikan bahwa pemilihan tipe mesh yang terlalu halus tidak selalu meningkatkan akurasi hasil analisis. Dengan demikian, pemilihan tingkat kehalusan mesh perlu mempertimbangkan keseimbangan antara akurasi prediksi dan efisiensi komputasi. Secara keseluruhan, penggunaan Plaxis 3D direkomendasikan untuk analisis konsolidasi tanah reklamasi yang melibatkan pengaruh smear zone, terutama pada proyek yang memerlukan tingkat ketelitian prediksi penurunan yang tinggi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis pengaruh smear zone terhadap prediksi penurunan konsolidasi tanah reklamasi menggunakan pemodelan Plaxis 2D dan Plaxis 3D, dapat disimpulkan bahwa pengaruh tingkat kehalusan mesh terhadap hasil analisis tidak menunjukkan pola yang linier. Nilai penurunan konsolidasi yang diperoleh dari setiap variasi mesh cenderung berfluktuasi baik pada pemodelan dua dimensi maupun tiga dimensi. Hasil analisis menggunakan Plaxis 2D menghasilkan prediksi penurunan sebesar 7,421–7,491 m, sedangkan Plaxis 3D menghasilkan prediksi penurunan sebesar 6,627–6,983 m.

Perbandingan terhadap data penurunan lapangan menunjukkan bahwa kedua pendekatan pemodelan mampu merepresentasikan perilaku konsolidasi tanah reklamasi dengan tingkat kesalahan yang relatif kecil. Namun demikian, pemodelan Plaxis 3D memberikan hasil yang lebih mendekati kondisi aktual karena mampu merepresentasikan pengaruh smear zone dan sistem drainase vertikal secara lebih realistis dibandingkan pendekatan plane strain pada Plaxis 2D. Persentase perbedaan terkecil diperoleh pada pemodelan Plaxis 3D dengan mesh coarse sebesar -2,88%, sedangkan pada Plaxis 2D sebesar 3,21%.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaruh smear zone perlu diperhitungkan dalam analisis konsolidasi tanah lunak yang diperbaiki menggunakan Prefabricated Vertical Drain (PVD), karena berpengaruh terhadap karakteristik permeabilitas tanah dan besarnya penurunan yang diprediksi. Oleh karena itu, penggunaan pemodelan tiga dimensi direkomendasikan pada proyek reklamasi dan perbaikan tanah yang memerlukan tingkat akurasi tinggi dalam estimasi penurunan konsolidasi. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengevaluasi pengaruh variasi rasio smear zone, pola pemasangan PVD, dan parameter permeabilitas terhadap respons konsolidasi pada kondisi geoteknik yang berbeda.

Daftar Pustaka

- [1] A. Z. Rifqi, L. Z. Mase, F. Supriani, dan R. Misliniyati, “Karakteristik Tanah pada Kawasan Sawah Lebar Baru Kota Bengkulu dan Aplikasinya dalam Perancangan Geoteknik,” *Cantilever: Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, vol. 14, no. 1, pp. 11–22, 2025.
- [2] I. E. P. Zhafirah, “Penurunan Tanah Berdasarkan Hasil Uji Konsolidasi di Laboratorium,” *Jurnal Konstruksi*, vol. 20, no. 2, pp. 234–239, 2022.
- [3] M. F. Lubis dan G. C. R. Hasibuan, “Analisis Pengaruh Preloading Kombinasi Prefabricated Vertical Drain pada Proses Konsolidasi di Proyek Reklamasi di Samping Tangki CPO Antar Pulau Belawan Berdasarkan Bore Log BH-2,” *Jurnal Syntax Admiration*, vol. 4, no. 8, pp. 1219–1231, 2023.
- [4] A. Hanun dan G. C. R. Hasibuan, “Analisis Proses Konsolidasi Dengan PVD Pada Proyek Reklamasi di Samping Tangki CPO Antar Pulau Belawan Berdasarkan Bore Log BH-1,” *Jurnal Syntax Admiration*, vol. 4, no. 8, pp. 1692–1701, 2023.
- [5] I. M. K. Wiranata dan I. N. Sinarta, “Analisis Konsolidasi dan Nilai Angka Aman pada Usaha Stabilisasi Tanah Lempung Lunak dengan Prefabricated Vertical Drain (PVD),” *Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTeKS)*, vol. 1, no. 6, 2023.
- [6] L. Hakim, M. Wahyuni, dan R. Karlinasari, “Analisis Perbaikan Tanah Lunak Menggunakan Prefabricated Vertical Drain Kombinasi Vacuum dan Preloading (Studi Kasus Pada Proyek X) di Perumahan Semarang Timur,” *G-SMART*, vol. 8, no. 2, pp. 74–89, 2024.
- [7] B. Purba, R. Roesyanto, G. C. R. Raphita, dan R. Surbakti, “Analisis Konsolidasi dengan Metode Preloading Dikombinasikan dengan PVD Berdasarkan Perhitungan Analitis dan Plaxis 2D,” *Jurnal Syntax Admiration*, vol. 3, no. 12, pp. 1569–1585, 2022.
- [8] T. E. Wulandari, “Prediksi Penurunan Konsolidasi Menggunakan Preloading dan Prefabricated Vertical Drain dengan Software Metode Elemen Hingga,” *Journal of Civil Engineering Building and Transportation*, vol. 5, no. 2, pp. 99–108, 2021.
- [9] A. A. Mukti dan N. Andajani, “Perbandingan Perbaikan Tanah Lunak Menggunakan Metode Preloading, Metode Vacuum Preloading, dan Dikombinasikan dengan Pemodelan Aplikasi Plaxis 2D,” *CONCRETE: Construction and Civil Integration Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 97–102, 2025.
- [10] I. N. Hamdhan dan R. M. Akbar, “Pemodelan Perbaikan Tanah Lunak dengan Kombinasi Metode Vacuum Preloading dan Deep Mixing Column,” *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, vol. 5, no. 4, pp. 857–870, 2022.
- [11] I. N. Hamdhan dan M. A. Raasyid, “Pemodelan Perbaikan Tanah Lunak dengan Preloading, Deep Mixing Column, dan Stone Column,” *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, pp. 1043–1056, 2025.
- [12] I. M. Patutia, F. Achmada, dan I. P. Latiefa, “Analisis Penurunan Tanah Timbunan Menggunakan Metode Elemen Hingga pada Ruas Jalan Tolango–Bulontio STA 47+600,” *Civil Engineering Journal*, vol. 4, no. 1, 2023.
- [13] T. Hayati dan F. I. Harahap, “Analisis Proses Konsolidasi pada Perbaikan Tanah dengan Metode Preloading dan Penggunaan PVD pada Pekerjaan Reklamasi Menggunakan Plaxis 2D dan Plaxis 3D,” *Jurnal Syntax Admiration*, vol. 6, no. 5, pp. 1496–1510, 2025.
- [14] Y. W. B. Tarigan, R. Roesyanto, G. C. R. Hasibuan, dan R. Surbakti, “Analisis Pasang Surut Air dan Konsolidasi Reklamasi Belawan Phase I dengan PLAXIS 2D dan 3D,” *Jurnal Syntax Admiration*, vol. 3, no. 9, pp. 1091–1100, 2022.
- [15] E. K. Hamonangan dan M. Y. Syahputra, “Perbandingan Hasil Analisis Finite Element untuk Stabilitas dan Penurunan Timbunan dengan Beberapa Soil Model di Lokasi Rencana Pembangunan

Jalan Tol Subang,” *Jurnal HPJI (Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia)*, vol. 9, no. 1, pp. 1–8, 2023.

- [16] T. E. Wulandari, R. Roesyanto, dan R. Iskandar, “Pengaruh Kehalusan Mesh Plaxis 2D dan 3D terhadap Prediksi Penurunan Konsolidasi pada Proyek Reklamasi Belawan Phase I,” *Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia*, vol. 6, no. 4, pp. 1997–2014, 2021.
- [17] U. Hidayaturrosyidah, G. Chrismaningwang, N. S. Surjandari, dan P. Ardhana, “Analisis Pengaruh Metode Pembebanan pada PVD Berdasarkan Data CPTu dan Settlement Plate,” *Jurnal Media Teknik Sipil*, vol. 23, no. 1, pp. 9–19, 2025.