

Analisis Konsolidasi Dengan *Prefabricated Vertical Drain* Untuk Beberapa *Soil Model* Menggunakan Metode Elemen Hingga

NI KETUT DEVY APRIYANI¹, IKHYA², INDRA NOER HAMDHAN²

¹Mahasiswa, Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Nasional

²Dosen, Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Nasional
e-mail: nkdevy@gmail.com

ABSTRAK

Pembangunan di atas tanah lunak merupakan tantangan di bidang konstruksi. Sifat tanah lunak yang memiliki kuat geser rendah, kompresibilitas tinggi, dan koefisien permeabilitas rendah menjadi kendala untuk dimanfaatkan dalam pekerjaan tanah sehingga diperlukan adanya perbaikan tanah. Dua metode perbaikan tanah yang umum digunakan untuk mempercepat waktu konsolidasi adalah preloading dan vertical drain. Penelitian ini bertujuan menganalisis konsolidasi menggunakan PLAXIS 2D untuk mengetahui soil model mana yang paling mampu menggambarkan kondisi tanah di lapangan. Pemodelan yang dilakukan akan menggunakan tiga dari banyak soil model yang dimiliki PLAXIS 2D yaitu Mohr Coulomb model dan dua Advanced Soil Model: Hardening Soil, dan Soft Soil. Selanjutnya nilai penurunan yang dihasilkan ketiga soil model tersebut akan dibandingkan terhadap pengukuran di lapangan dan dianalisis. Berdasarkan hasil analisis, disimpulkan bahwa Hardening Soil model merupakan model yang paling cocok digunakan untuk menganalisis konsolidasi karena menghasilkan selisih nilai penurunan paling kecil bila dibandingkan dengan dua soil model lainnya.

Kata kunci : *prefabricated vertical drain, tanah lunak, konsolidasi, soil model, PLAXIS 2D*

ABSTRACT

Construction on soft soil is a challenge in construction's world. Soft soil is characterized by a low shear strength, a high compressibility, and a low coefficient of permeability which makes it difficult for soil engineering so ground improvement is needed. Vertical drain combined with preloading have become common technique for speeding up time of consolidation. The purpose of this study is to analyse consolidation with PLAXIS 2D and define which soil model is closest to the field condition. PLAXIS 2D has so many soil models that can be used for modelling soil condition but this study will only use three models and those models are Mohr Coulomb model and two Advanced Soil Model: Hardening Soil, and Soft Soil. Settlement value from those models will be compared to field measurement and being analysed. Based on the analysis, Hardening Soil model is the most suitable model for analysing consolidation because it generates settlement value closest to the field measurement.

Keywords: *prefabricated vertical drain, soft soil, consolidation, soil model, PLAXIS 2D*

1. LATAR BELAKANG

Tanah memiliki peran penting dalam pekerjaan konstruksi karena semua konstruksi yang direncanakan tentu didukung oleh tanah. Sebagai salah satu negara dengan garis pantai terpanjang, Indonesia memiliki banyak deposit tanah lunak. Ketersediaan lahan yang terbatas mendorong manusia untuk membangun di atas tanah lunak. Tanah jenis ini sulit untuk dimanfaatkan dalam pekerjaan konstruksi karena tanah ini dikenal memiliki kuat geser yang rendah, kompresibilitas tinggi, dan nilai koefisien permeabilitas yang rendah. Untuk mengatasi masalah terkait pembangunan di atas tanah lunak diperlukan perbaikan tanah dengan memanfaatkan PVD. PVD membantu memperpendek jarak dan mempercepat waktu aliran air yang keluar dari dalam pori-pori tanah sehingga proses konsolidasi dapat berlangsung lebih cepat. Analisis mengenai *settlement* ini dapat dilakukan dengan cara memodelkan tanah yang akan ditinjau menggunakan program PLAXIS 2D. PLAXIS 2D memiliki beberapa jenis pemodelan tanah yang dapat digunakan untuk memodelkan tanah, yaitu: *Mohr-Coulomb* model, *Hoek-Brown* model, *Jointed Rock* model, *Hardening Soil* model, dan *Soft Soil* model. Analisis *settlement* yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini akan menggunakan tiga model tanah, yaitu: *Mohr-Coulomb* model dan dua *Advanced Soil model: Hardening Soil* model, dan *Soft Soil* model.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Tanah yang ada di permukaan bumi mempunyai karakteristik dan sifat yang berbeda-beda, sehingga hal ini merupakan suatu tantangan bagi perencana konstruksi untuk memahami perilaku tanah yang dihadapi dalam perencanaan konstruksi dengan jalan melakukan penyelidikan dan penelitian terhadap sifat-sifat yang dimiliki tanah. Salah satu diantaranya adalah tanah lunak, yaitu tanah yang umumnya terdiri dari tanah yang sebagian besar terdiri dari butiran-butiran yang sangat kecil seperti lempung atau lanau. Sifat lapisan tanah lunak adalah gaya gesernya yang kecil, kemampuan yang besar, dan koefisien permeabilitas yang kecil (Das, B.M, 1977).

Vertical Drain bekerja dengan memperpendek lintasan pengaliran dalam lempung sehingga laju konsolidasi yang rendah pada lempung jenuh dengan permeabilitas rendah dapat dipercepat (Choa, V., 2003). Akibatnya, konsolidasi yang terjadi sebagai akibat pengaliran horizontal/radial menjadi sangat dominan, sedangkan konsolidasi sebagai akibat pengaliran vertikal sangat kecil.

Metode elemen hingga adalah prosedur perhitungan yang dipakai untuk mendapatkan pendekatan dari permasalahan matematis yang sering muncul pada rekayasa teknik. Konsep dasar dari metode ini adalah membagi sebuah bentuk atau struktur yang kompleks/rumit menjadi beberapa elemen yang lebih kecil. Elemen-elemen tersebut selanjutnya terhubung dengan node/titik. Pada setiap titik terdapat satu derajat kebebasan atau lebih untuk mendefinisikan jumlah fungsi yang digunakan. Dengan memecahkan nilai-nilai pada tiap titik, tegangan dan regangan pada setiap elemen dapat diperhitungkan.

Mohr Coulomb model (MC model) menganggap plastisitas mempunyai hubungan dengan regangan yang *irreversible* atau tidak dapat kembali ke kondisi semula. Untuk mengevaluasi apakah plastisitas telah terjadi dalam perhitungan, sebuah fungsi kelelahan digunakan sebagai fungsi dari tegangan dan regangan. Sebuah fungsi kelelahan umumnya dapat dinyatakan sebagai suatu bidang dalam ruang tegangan utama. Sebuah model plastis

sempurna merupakan suatu model konstitutif dengan bidang leleh tertentu, yaitu bidang leleh yang sepenuhnya didefinisikan oleh parameter model dan tidak terpengaruh oleh peregangannya (plastis). Pada kondisi tegangan yang dinyatakan oleh titik-titik yang berada di bawah bidang leleh, perilakunya akan sepenuhnya elastis dan seluruh regangan dapat kembali seperti semula.

Hardening Soil model (HS model) merupakan *advanced* model yang dapat digunakan untuk memodelkan berbagai jenis perilaku tanah dan batuan. Perbedaan utama antara *Hardening Soil* model dan Mohr-Coulomb model (MC-model) adalah bahwa MC-model menjelaskan pembatasan nilai tegangan berdasarkan nilai sudut geser sedangkan HS model menjelaskan jenis elastoplastis dari model hiperbolik. Jenis hubungan hiperbolik antara tegangan dan regangan ini dikembangkan untuk digunakan dalam analisis kenaikan non-linear dari deformasi tanah.

Soft Soil model (SS model) dapat digunakan ketika memodelkan perilaku tanah lunak seperti lempung dan tanah gambut yang terkonsolidasi secara normal. Pada SS model, asumsi meliputi hubungan logaritmik antara regangan volumetrik ε_v dengan tegangan efektif p' yang membutuhkan nilai λ^* dimana λ^* adalah indeks pemampatan yang dimodifikasi dan dapat ditentukan berdasarkan pemampatan tanah yang terjadi pada saat pembebanan primer. Hal lain ditemukan juga notasi k^* dimana k^* adalah indeks pemuaiannya yang dimodifikasi, menjelaskan kemampuan pemampatan dari tanah pada pengurangan beban yang diikuti pembebanan kembali sebagai asumsi respon tanah selama pengurangan beban dan pembebanan kembali bersifat elastis.

3. METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian yang dilakukan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi masalah yang akan dikaji dalam penelitian
2. Melakukan studi literatur mengenai teori-teori yang berkaitan dengan masalah yang akan dibahas dalam penelitian
3. Menentukan parameter tanah dan PVD yang akan digunakan dalam pemodelan menggunakan PLAXIS 2D
4. Melakukan pemodelan Geometri dan *Finite Element Mesh* menggunakan PLAXIS 2D
5. Melakukan proses *running* pada PLAXIS 2D untuk menghitung penurunan, waktu konsolidasi, dan tegangan pori
6. Menganalisis hasil yang diperoleh

Parameter tanah yang diperoleh merupakan parameter tanah MC model yang selanjutnya akan dikonversi menjadi parameter dua *soil model* lainnya. Parameter tanah yang dibutuhkan ditunjukkan pada **Tabel 1**

Tabel 1. Daftar Parameter Tanah

<i>Mohr-Coulomb</i>	<i>Hardening Soil</i>	<i>Soft Soil</i>
	c	
	φ	
	ψ	
E		V_{ur}
V		K_0^{nc}
G	E_{50}^{ref}	λ^*
E_{oed}	E_{oed}^{ref}	κ^*
	E_{ur}^{ref}	M
	m	
	p^{ref}	
	C_c	
	C_s	

Setelah parameter tanah diperoleh, selanjutnya pemodelan dilakukan menggunakan program PLAXIS 2D. Hasil pemodelan akan diperoleh berupa nilai penurunan, waktu konsolidasi, dan besar tegangan pori yang dialami tanah pada setiap *soil model*. Selanjutnya perbedaan nilai yang dihasilkan akan dianalisis dan disimpulkan, *soil model* mana yang paling menggambarkan kondisi tanah di lapangan.

4. PEMODELAN DAN ANALISIS

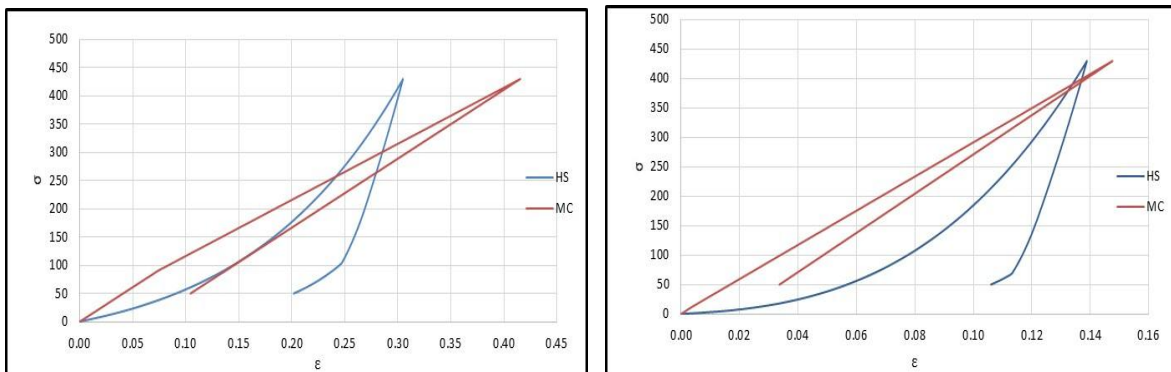
Batasan yang digunakan dalam pemodelan ini adalah:

1. Tanah merupakan lapisan yang homogen
2. Beban yang terjadi berupa beban seketika
3. Pemodelan dilakukan untuk kondisi tanpa PVD, dengan PVD, dan dengan PVD + *smear*

Parameter tanah yang pertama dimiliki adalah parameter untuk MC model, yang selanjutnya dicari korelasinya terhadap parameter HS model dan SS model. Parameter HS model dicari dengan pengujian Oedometer yang hasilnya ditunjukkan pada **Gambar 1** dan Parameter SS model dicari dengan **Persamaan 1** dan **Persamaan 2** :

$$\lambda^* = \frac{c_c}{2.3(1+e)} \dots\dots\dots (1)$$

$$\kappa^* = \frac{2c_s}{2.3(1+e)} \dots\dots\dots (2)$$



Gambar 1. Hasil Pengujian Oedometer untuk Tanah Sangat Lunak (kiri) dan Medium (kanan)

Analisis Konsolidasi Dengan *Prefabricated Vertical Drain* Untuk Beberapa Soil Model
Menggunakan Metode Elemen Hingga

Parameter yang akan digunakan pada pemodelan ini akan ditunjukkan pada **Tabel 3**, **Tabel 4**, dan **Tabel 5**. Setelah parameter tanah diperoleh, model geometri memerlukan parameter lain yaitu parameter PVD. Parameter-parameter tersebut ditunjukkan pada **Tabel 6**.

Tabel 3. Parameter Tanah dan Timbunan MC model

Jenis Tanah	Ketebalan	$\gamma_{sa}/\gamma_{unsat}$	c'_{ref}	φ'	v'_{ur}	P_{ref}	K_0^{nc}	Rf	$k_h=k_v$
	m	kN/m ²	kN/m ²	°	-	kN/m ³	-	-	m/s
Sangat Lunak	12	15/16	12	24	0,2	100	0,59	0,9	1,90E-09
Medium	12	17/18	1	28	0,2	100	0,53	0,9	5,00E-09
Timbunan	4	18/20	10	30	0,2	100	0,5	0,9	1,00E-07

Tabel 4. Parameter Tanah dan Timbunan HS model

Jenis Tanah	ketebalan	$\gamma_{sat}/\gamma_{unsa}$	$E^{ref}_{50}=E^{ref}_{oed}$	E^{ref}_{ur}	m (power)	c'_{ref}	φ'	v'_{ur}	P_{ref}	K_0^{nc}	Rf	$k_h=k_v$
	n	t	kN/m ²	kN/m ²	-	kN/m ²	°	-	kN/m ³	-	-	m/s
Sangat Lunak	12	15/16	1000	3000	0,9	12	24	0,2	100	0,59	0,9	1.90E-09
Medium	12	17/18	3000	9000	0,7	1	28	0,2	100	0,53	0,9	5.00E-09
Timbunan	4	18/20	20000	60000	0,5	10	30	0,2	100	0,5	0,9	1.00E-07

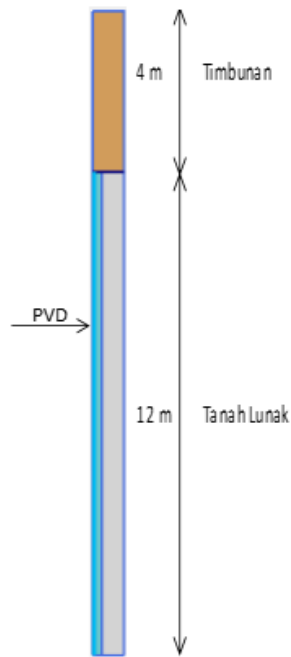
Tabel 5. Parameter Tanah dan Timbunan SS model

Jenis Tanah	Ketebalan	$\gamma_{sat}/\gamma_{unsat}$	c'	φ'	v'_{ur}	K_0^{nc}	λ^*	κ^*	$k_h=k_v$	
	m	kN/m ²	kN/m ²	°	-	kN/m ³	-	-	m/s	
Sangat Lunak	12	15/16	12	24	0,2	100	0,59	0,1	0,06	1,90E-09
Medium	12	17/18	1	28	0,2	100	0,53	0,0333	0,02	5,00E-09
Timbunan	4	18/20	10	30	0,2	100	0,5	5,00E-03	3,00E-03	1,00E-07

Tabel 6. Parameter PVD

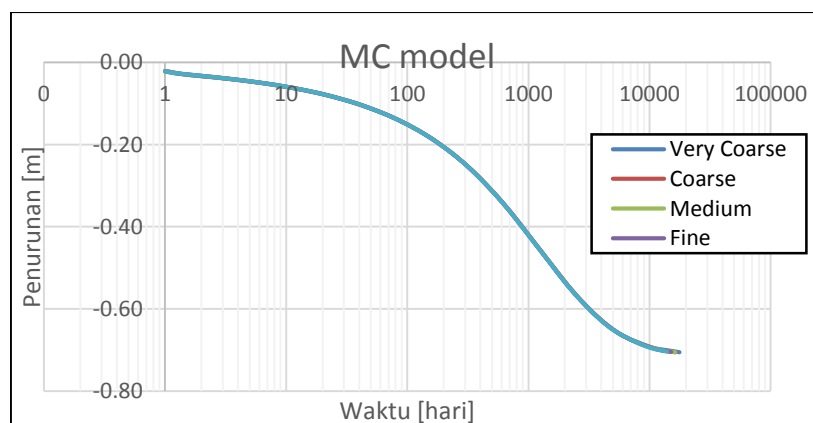
Jenis	Ukuran
Dimensi PVD	: 100 mm x 4 mm
Jarak antar PVD (S)	: 1.5 m
Kedalaman instalasi	: 12 m
Diameter mandrel (d_m)	: 120 mm
Jarak efektif (d_e)	: 1.575 m
Diameter PVD ekivalen (d_w)	: 66.2 mm
Diameter daerah <i>smear</i> (d_s)	: 360 mm
kh/ks	: 2
k_{s1} (sangat lunak)	: 0.95E-09 m/s
k_{s2} (medium)	: 2.5E-09 m/s

Berdasarkan batasan tanah yang ditentukan berupa tanah homogen, pemodelan akan dilakukan dalam dua tahap. Pertama untuk tanah sangat lunak dan selanjutnya untuk tanah medium karena permeabilitas paling kecil. Bentuk pemodelan geometri dan *finite element mesh* yang dihasilkan setelah menggunakan tiga kondisi di atas akan ditunjukkan pada **Gambar 2**.



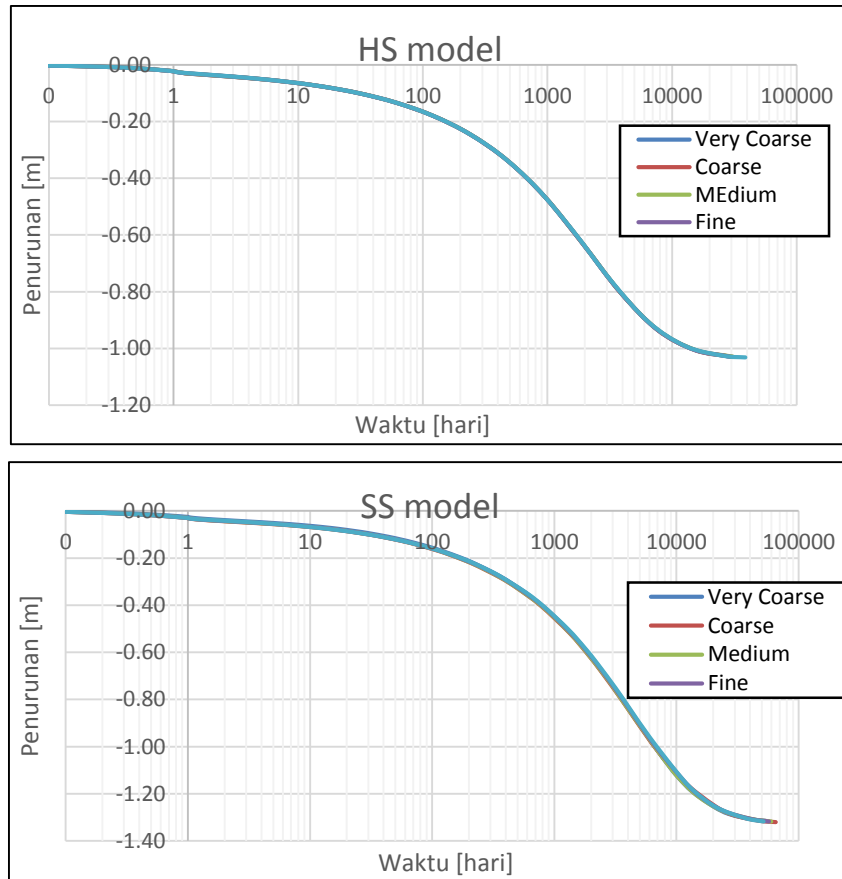
Gambar 2. Bentuk geometri

Sebelum melakukan analisis konsolidasi untuk berbagai kondisi PVD, analisis akan dilakukan mengenai pengaruh jenis *mesh* terhadap hasil perhitungan menggunakan PLAXIS 2D. Analisis ini akan dilakukan pada kondisi tanpa PVD saja dengan jenis *mesh* (dan jumlah elemen): sangat Kasar (487 elemen), kasar (793 elemen), sedang (911 elemen), halus (1047 elemen), dan sangat halus (2056 elemen). Hasil perhitungan yang diperoleh masing-masing *soil model* ditunjukkan pada **Gambar 3**.



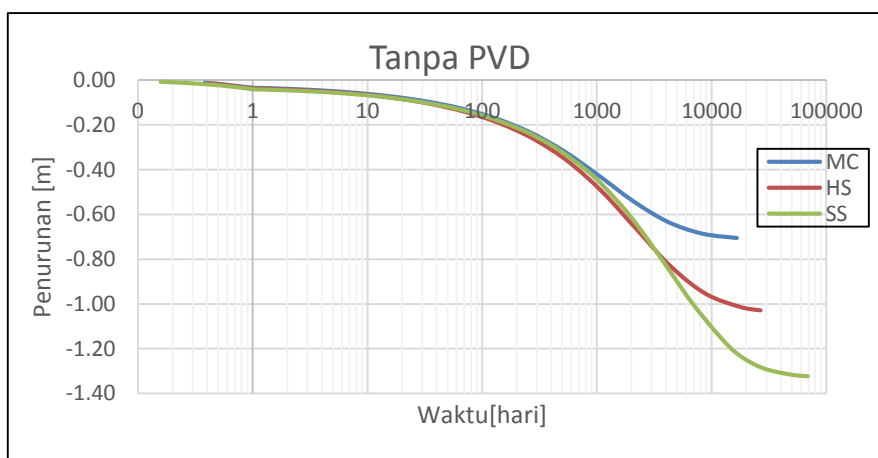
Gambar 3. Hasil Pemodelan untuk Berbagai Jenis Mesh

Analisis Konsolidasi Dengan *Prefabricated Vertical Drain* Untuk Beberapa Soil Model Menggunakan Metode Elemen Hingga

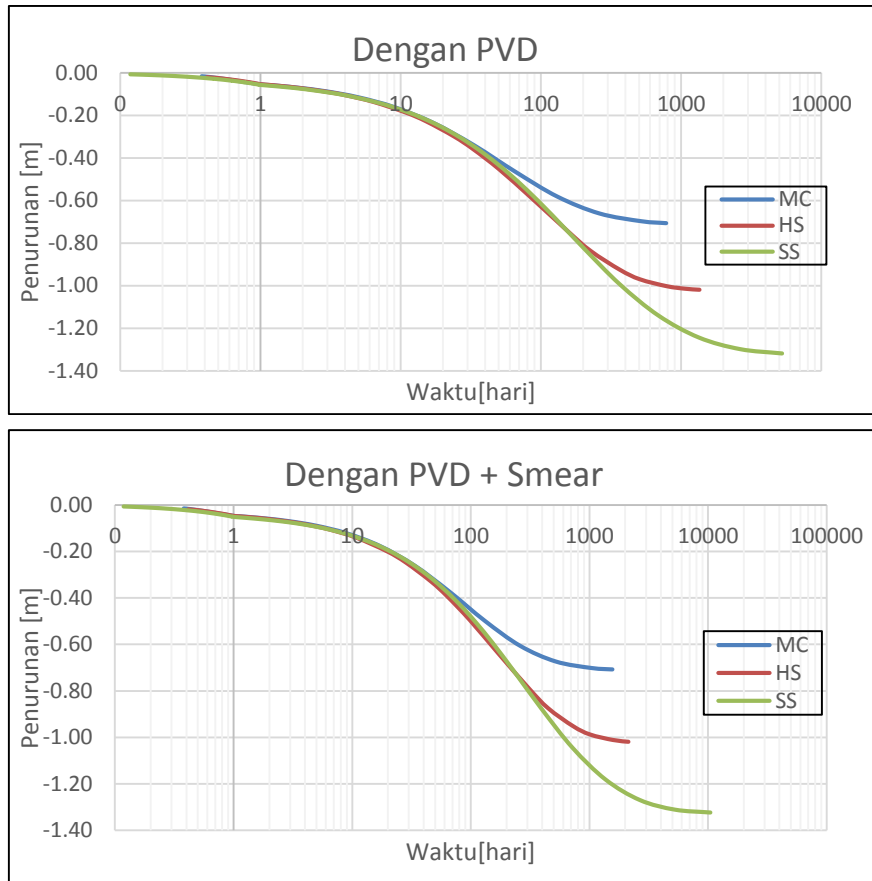


Gambar 3. Hasil Pemodelan untuk Berbagai Jenis *Mesh* (lanjutan)

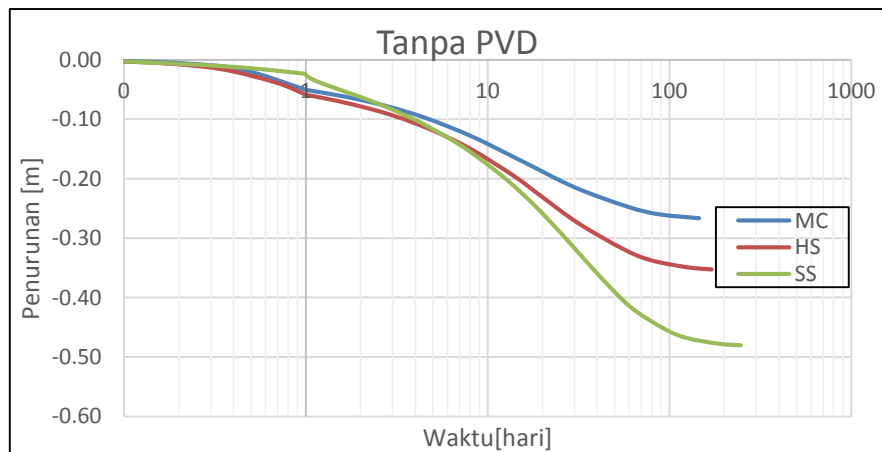
Berdasarkan hasil di atas, jenis *mesh* tidak memberikan pengaruh besar terhadap analisis konsolidasi. Hal ini ditunjukkan dengan berimpitnya kurva yang dihasilkan dari perhitungan menggunakan berbagai jenis *mesh*. Selanjutnya pemodelan untuk berbagai kondisi PVD akan menggunakan *mesh* jenis sangat halus dengan jumlah elemen 1349 elemen. Hasil pemodelan ditunjukkan pada **Gambar 4** dan **Gambar 5**.



Gambar 4. Hasil Pemodelan Tanah Sangat Lunak untuk Setiap *Soil Model*

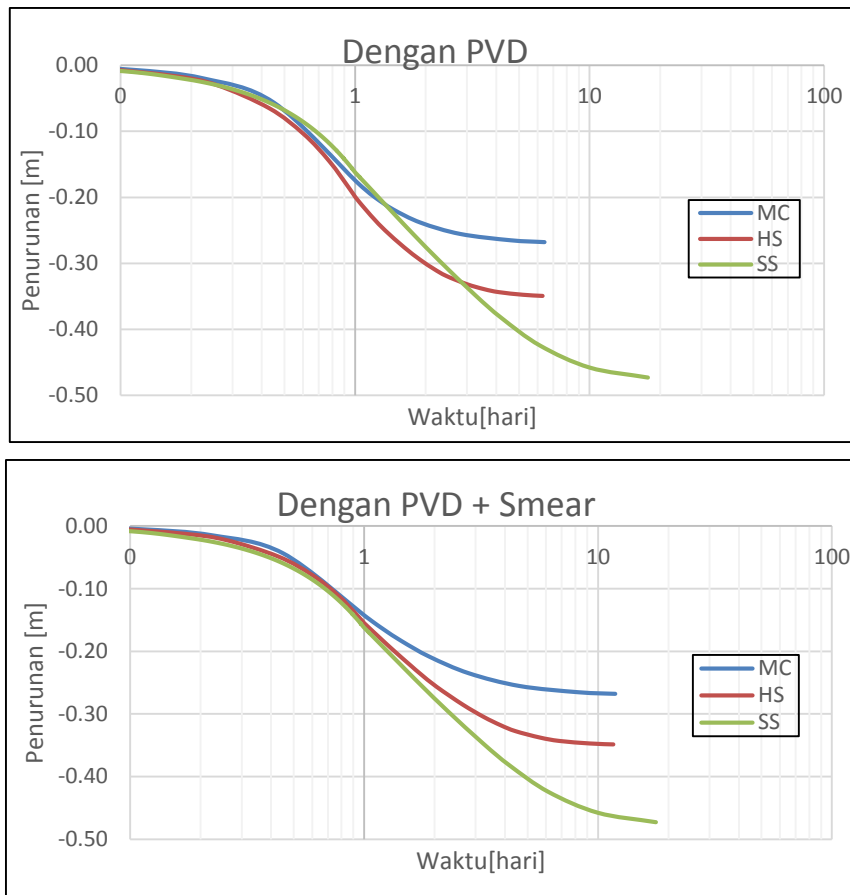


Gambar 4. Hasil Pemodelan Tanah Sangat Lunak untuk Setiap *Soil Model* (lanjutan)



Gambar 5. Hasil Pemodelan Tanah Medium untuk Setiap *Soil Model*

Analisis Konsolidasi Dengan *Prefabricated Vertical Drain* Untuk Beberapa Soil Model Menggunakan Metode Elemen Hingga



Gambar 5. Hasil Pemodelan Tanah Medium untuk Setiap *Soil Model* (lanjutan)

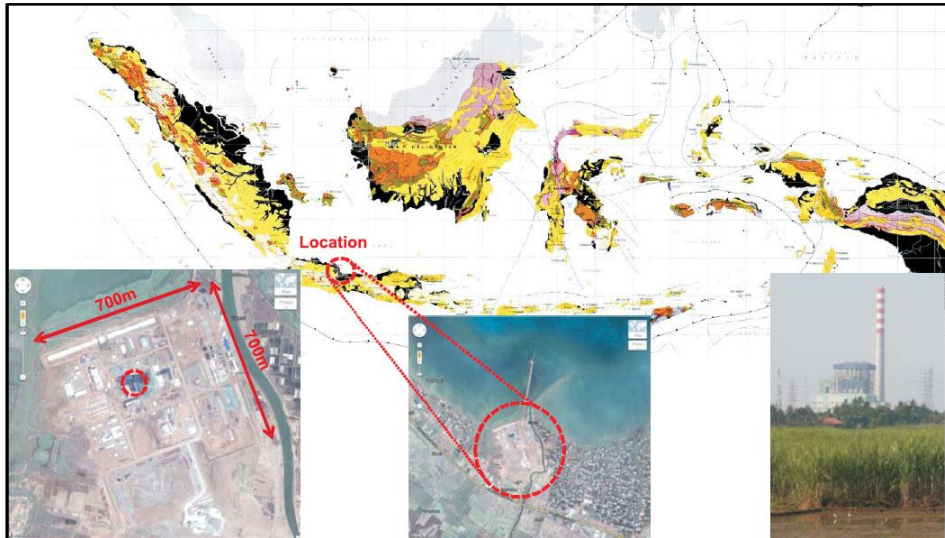
Berdasarkan hasil-hasil yang diperoleh dari pemodelan tanah sangat lunak, *advanced soil model* (HS model dan SS model) cenderung menghasilkan nilai penurunan yang hampir sama. Hal ini ditunjukkan dengan garis kurva yang berimpit untuk waktu yang lama pada ketiga grafik konsolidasi yang dihasilkan. Tetapi perbedaan terdapat pada nilai penurunan dan waktu yang dibutuhkan di akhir konsolidasi. MC model hanya berimpit untuk selang waktu yang singkat dan kemudian memiliki perbedaan nilai penurunan yang cukup signifikan terhadap kedua model di atas.

Saat melakukan pemodelan terhadap tanah medium, Perbedaan lainnya dapat dilihat dari perilaku SS model. SS model cenderung menghasilkan kurva yang cukup berbeda bila dibandingkan dengan MC model dan HS model.

5. STUDI KASUS

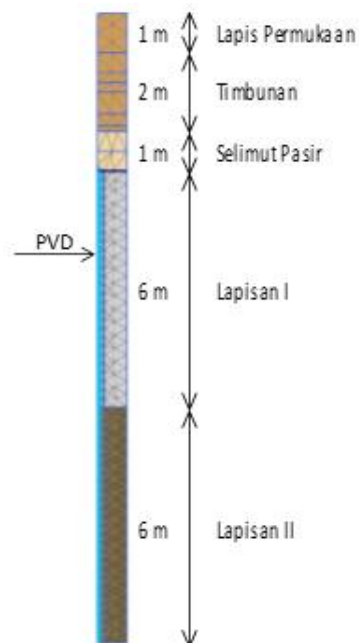
Studi kasus yang dilakukan pada penelitian ini adalah penggunaan PVD di PLTU Cirebon. Secara umum, lokasi PLTU Cirebon (**Gambar 6.**) berada di pesisir utara pulau Jawa, 20 km sisi Tenggara kota Cirebon. Pada arah Utara, lokasi ini berbatasan dengan Laut Jawa, Sungai Kanci pada arah Timur, dan Sungai Waruduwur pada arah Barat. Topografi dari lokasi ini cenderung datar dan berupa dataran rendah dengan ketinggian rata-rata berada pada nilai + 0.5 m di atas permukaan laut. Pantai di daerah Cirebon memiliki nilai pasang surut antara 0.5 m – 1.3 m. Untuk menghasilkan permukaan yang datar dan untuk membuat lokasi tetap berada di atas ketinggian banjir serta menjaga lokasi tetap kering selama PLTU bekerja,

lokasi ini harus berada pada ketinggian +2.5 m di atas permukaan laut. Ketebalan timbunan rata-rata adalah 4 m, terdiri atas 1 m selimut pasir, 2 m timbunan, dan 1 m lapis permukaan tambahan.



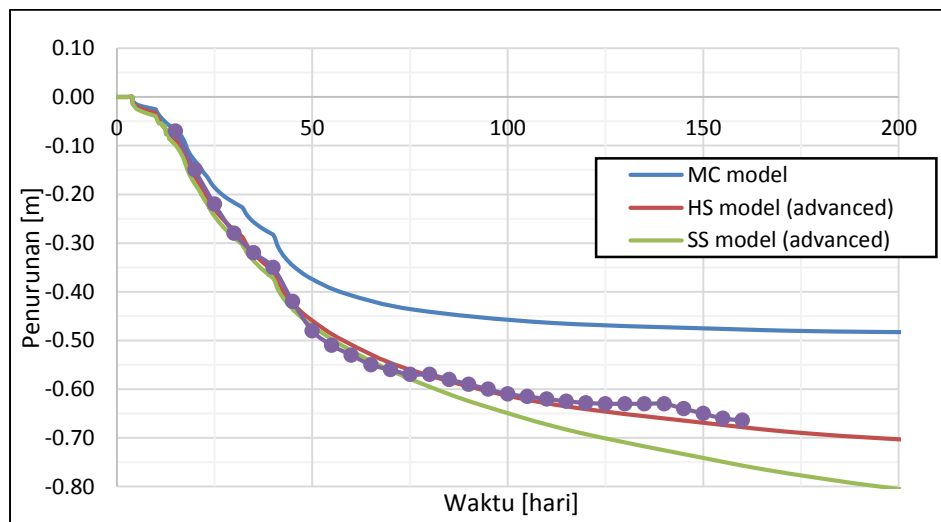
Gambar 6. Lokasi PLTU Cirebon

Berdasarkan hasil investigasi tanah di lokasi ini, tanah di bawah lapis permukaan terdiri atas tiga bagian, yaitu: lapisan paling atas berupa 6 m tanah sangat lunak, lapisan berikutnya berupa 6 m tanah sangat lunak hingga sedang, dan lapisan paling bawah berupa pasir padat sebagai lapis penahan. Untuk mempercepat proses konsolidasi dari 12 m tanah lunak, PVD dipasang yang dikombinasikan dengan timbunan setinggi 4 m. PVD dipasang sedalam 12 m hingga mencapai tanah keras dengan jarak pemasangan 1,5 m menggunakan pola triangular. Pelat pengukur penurunan dipasang setelah penimbunan 1 m lapisan pasir selesai dikerjakan. Bentuk pemodelan geometri dan *finite element mesh* untuk kondisi eksisting ini akan ditunjukkan pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Bentuk Geometri dan *Finite Element Mesh* kondisi eksisting

Jumlah elemen yang akan diperhitungkan pada kondisi ini adalah sebanyak 1042 elemen. Pemodelan kondisi eksisting ini bertujuan untuk melihat *soil model* mana yang mampu melakukan pendekatan paling sesuai dengan kondisi di lapangan. Setelah dilakukan proses *running* hasil penurunan yang diperoleh akan dibandingkan dengan besar penurunan yang diukur di lapangan. Perbandingan tersebut akan dapat dilihat pada **Gambar 5**, yang memperlihatkan grafik penurunan hasil pendekatan oleh tiga *soil model* dan hasil pengukuran di lapangan.



Gambar 5. Grafik penurunan hasil pemodelan vs. pengukuran di lapangan

Berdasarkan **Gambar 5**, *advanced soil model* melakukan pendekatan lebih baik dibandingkan MC model. Hal ini dikarenakan MC model merupakan model yang sederhana. Walaupun *advanced soil model* melakukan pendekatan yang lebih baik, dari dua *advanced soil model* yang digunakan, HS model menghasilkan nilai penurunan yang paling mendekati nilai pengukuran di lapangan.

6. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Dari hasil pemodelan yang dilakukan dengan berbagai jenis *mesh*, besar penurunan serta waktu konsolidasi yang diperlukan tanah tidak menunjukkan nilai perbedaan yang signifikan artinya jenis *mesh* tidak memiliki pengaruh besar saat melakukan analisis konsolidasi.
2. *Smear zone* mempengaruhi waktu konsolidasi tanah dengan memperkecil koefisien permeabilitas tanah, akibatnya waktu yang diperlukan tanah untuk terkonsolidasi menjadi lebih lama.
3. Dari dua tanah yang dimodelkan, MC model cenderung menghasilkan nilai penurunan paling kecil bila dibandingkan dengan nilai yang dihasilkan dua *Advanced Soil model* yang digunakan.
4. Berdasarkan pengukuran di lapangan, penurunan di akhir pengukuran menunjukkan nilai 0.66 m sehingga selisih penurunan yang dihasilkan oleh masing-masing model adalah :
 - MC model : 27.273 % lebih kecil dari penurunan di lapangan
 - HS model (*advanced*) : 3.03 % lebih besar dari penurunan di lapangan

- SS model (*advanced*) : 15.151 % lebih besar dari penurunan di lapangan
- 5. Dari dua *Advanced Soil model* yang digunakan, HS model menghasilkan selisih paling kecil bila dibandingkan dengan SS model. Bila dikaitkan dengan kesimpulan pada butir 4, SS model melakukan pendekatan lebih baik pada tanah dengan kondisi lunak.
- 6. HS model lebih mampu melakukan pendekatan terhadap tanah khususnya pada kasus tanah di PLTU Cirebon yang memiliki dua lapis tanah yang terdiri dari tanah sangat lunak dan tanah medium.

DAFTAR RUJUKAN

- Choa, V. (2003) *Soil Improvement : Prefabricated Vertical Drain Techniques*. Singapore: Thomson Learning.
- Das, B. M. (1977) *Advanced Soil Mechanics* (second ed.). London: Taylor & Francis.