

Analisis Vacuum Consolidation pada Perbaikan Tanah Lempung Lunak dengan Model Axisymmetric

NADYA UTAMI RIVANGA, INDRA NOER HAMDHAN

Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Bandung
Email: utamirivanga@gmail.com

ABSTRAK

Tanah lempung lunak merupakan jenis tanah yang memiliki kuat geser yang kecil, koefisien permeabilitas yang kecil, kompresibilitas yang besar, dan mempunyai daya dukung rendah. Kondisi tersebut menyebabkan tanah lempung lunak menjadi tantangan pada konstruksi yang akan di bangun di atasnya, sehingga diperlukan perbaikan tanah. Salah satu perbaikan tanah untuk tanah lempung lunak yang banyak dijumpai yaitu vertical drain dan preloading. Pada penelitian ini metode tersebut akan dikombinasikan dengan vacuum consolidation. Tegangan vakum yang digunakan pada kasus ini sebesar 50 dan 80 kPa. Analisis yang dilakukan dengan menggunakan program PLAXIS 2D dengan model Axisymmetric. Analisis dilakukan dengan memvariasikan tiga dari sekian banyak soil model yaitu Mohr Coulomb, Hardening Soil, dan Soft Soil. Berdasarkan hasil dari penelitian nilai penurunan, tegangan pori, dan waktu konsolidasi yang dihasilkan berbeda tetapi hasil penurunan soil model dengan Hardening Soil dan Soft Soil tidak terlalu berbedda secara signifikan.

Kata Kunci: tanah lempung lunak, vacuum consolidation, Mohr Coulomb, Hardening Soil, Soft Soil, axisymmetric, PLAXIS 2D

ABSTRACT

Soft clay is a type of soil that has low shear strength, high compressibility, low coefficient of permeability and low bearing capacity. The condition caused soft clay soil to be a challenge on the construction that will be built on it, so that it needed soil improvement. The soil improvement for soft clay that often found is vertical drain and preloading. In this final project that method will be combined with vacuum consolidation. The vacuum pressure used in this case amount from 50 and 80 kPa. The analysis was performed using PLAXIS 2D program with Axisymmetric model. The analysis was done by varying the three of soil models Mohr Coulomb, Hardening Soil, and Soft Soil. Based on the settlement of the research, settlement value, pore pressure, and time of consolidation are different but the result of soil models of Hardening Soil and Soft Soil is not significantly differentiated.

Keywords: *soft clay, vacuum consolidation, Mohr Coulomb, Hardening Soil, Soft Soil, axisymmetric, PLAXIS 2D*

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada saat ini pembangunan di Indonesia semakin maju, banyak gedung-gedung pencakar langit dan juga fasilitas umum yang sedang dibangun. Namun karena keterbatasan lahan yang ada sekarang banyak pembangunan dilakukan didaerah tanah yang kurang baik. Salah satunya jenis tanah lunak yang relatif memiliki daya dukung yang relatif rendah. Keadaan tanah seperti itu bisa diatasi dengan melakukan perbaikan tanah pada lokasi tanah yang lunak ini.

Pada penelitian ini metode perbaikan tanah yang dilakukan dengan membuat timbunan (*preloading*) di atas tanah lempung lunak yang ada dengan tambahan pemasangan *Prefabricated Vertical Drains* (PVD) dan dikombinasikan dengan *vacuum consolidation*. Penelitian ini menggunakan aplikasi PLAXIS 2D. Anilisis dilakukan dengan memvariasikan memvariasikan kapasitas *vacuum* dan juga menganalisis dengan beberapa *soil model* yaitu *Mohr Coulomb*, *Hardening Soil* dan *Soft Soil*.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja proses konsolidasi dari metode perbaikan tanah dengan timbunan (*preloading*) dan *Prefabricated Vertical Drains* (PVD) dengan *vacuum* maupun tanpa *vacuum*. Analisis dilakukan menggunakan PLAXIS 2D dengan model *axisymmetric* dengan memvariasikan kapasitas *vacuum* dan juga menganalisis dengan beberapa *soil model* yaitu *Mohr Coulomb*, *Hardening Soil* dan *Soft Soil*. Manfaat penelitian ini diharapkan bisa mengetahui efektifitas waktu dari penurunan menggunakan timbunan dengan PVD dan bantuan dari *vacuum*.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Perbaikan Metode Perbaikan Tanah dengan Metode *Prefabricated Vertical Drains* (PVD) dengan kombinasi *prealoding*

Preloading pada tanah lempung lunak dengan *vertical drains* adalah salah satu metode populer yang digunakan untuk meningkatkan kekuatan geser tanah lunak dan mengendalikan penurunan pasca konstruksi. Karena permeabilitas tanah sangat rendah, waktu konsolidasi untuk mencapai penurunan yang diinginkan atau kekuatan geser yang diinginkan mungkin akan memakan waktu yang lama (Indraratna et. al., 2010).

Prefabricated Vertical Drains ini yaitu dengan menancapkannya pada tanah yang akan dibebani dengan *preloading*, sehingga terjadi proses penurunan karena kandungan air tanah yang keluar melewati PVD. Pemasangan PVD ini memiliki pola pemasangan yang berbentuk segitiga atau persegi panjang. Berikut ini merupakan persamaan dari Hansbo untuk mencari ekuivalen diameter dari PVD ditunjukkan **Persamaan 1**.

$$d_w = \frac{2(w+t)}{\pi} \quad \dots(1)$$

halmana:

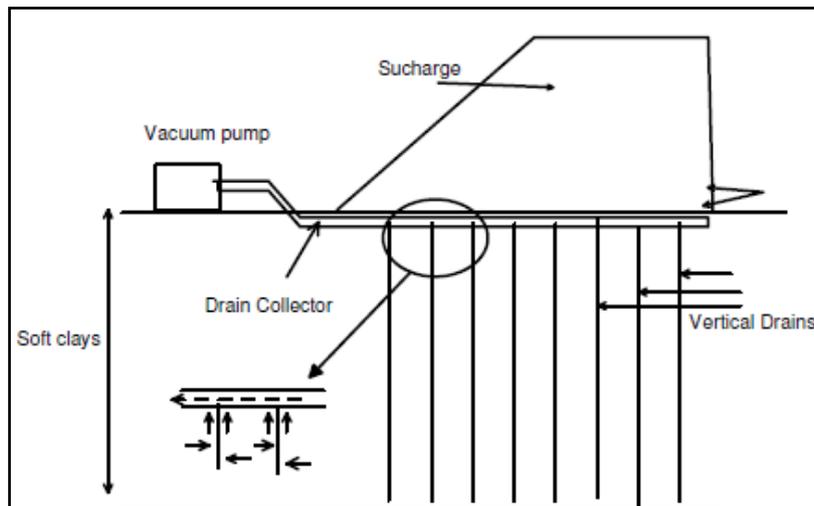
d_w = diameter PVD ekuivalen (m),

w = lebar dari PVD (m),

t = ketebalan dari PVD (m).

2.2 Metode *Vacuum Consolidation*

Vacuum Consolidation merupakan metode perbaikan tanah dengan memasang pompa pada saluran yang akan disambungkan pada PVD. Menurut Dam et al. (2006), metode ini didasarkan pada gagasan menerapkan pengisapan vakum ke massa tanah yang terisolasi, mengurangi tekanan atmosfer di dalamnya, sehingga dengan mengurangi tekanan air pori di tanah sehingga tegangan efektif meningkat tanpa mengubah tegangan total. Berikut ini merupakan diagram metode vakum yang ditunjukkan **Gambar 1**.



Gambar 1. Diagram metode vakum
(Sumber: Indraratna, 2009)

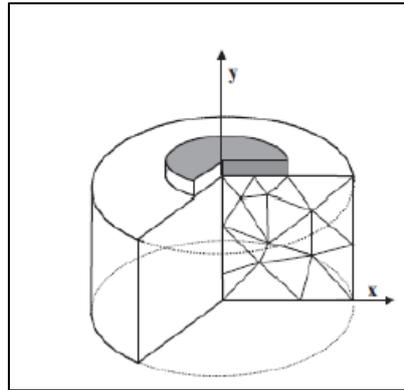
2.3 Penurunan Konsolidasi

Konsolidasi adalah proses mengecilnya volume pada tanah yang jenuh secara perlahan, proses tersebut berlangsung terus-menerus akibat mengalirnya sebagian air pori pada tanah yang jenuh. Das (1985) menjelaskan bahwa penurunan pada tanah yang disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi ke dalam dua kelompok besar, yaitu:

1. Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*), yang merupakan hasil dari perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat dari keluarnya air yang menempati pori-pori tanah.
2. Penurunan segera (*immediately settlement*), yang merupakan akibat dari deformasi elastis tanah kering, basah, dan jenuh air tanpa adanya perubahan kadar air. Perhitungan penurunan segera umumnya didasarkan pada penurunan yang diturunkan dari teori elastisitas.

2.4 PLAXIS 2D

PLAXIS adalah program komputer yang dapat digunakan untuk menganalisa deformasi, aliran air tanah, dan konsolidasi. Pemodelan dapat dilakukan secara *plane strain* maupun *axisymmetric*. Model *axisymmetric* digunakan untuk struktur berbentuk lingkaran dengan penampang melintang radial yang kurang lebih seragam dan kondisi pembebanan mengililingi sumbu aksial, dimana deformasi dan kondisi tegangan diasumsikan sama di setiap arah radial. Seperti **Gambar 2** yang menunjukkan model *axisymmetric*.



**Gambar 2. Model *axisymmetric*
(Sumber: PLAXIS 2D)**

2.5 Model Tanah

Pemodelan tanah pada PLAXIS 2D terbagi menjadi beberapa model seperti *Mohr Coulomb*, *Hardening Soil* dan *Soft Soil*. Model tanah ini menganalisis suatu material dan mengetahui perilaku tanah.

1. Model Mohr Coulomb

Model Mohr Coulomb yang diaplikasikan pada PLAXIS 2D akan menghasilkan prediksi dilatansi yang berlebihan. Karena itu, selain fungsi keelehan (*yield function*) digunakan juga sebuah fungsi potensial plastis (*plastic potential plastic, g*) yang besarnya tidak sama dengan fungsi keelehan tersebut dan dinyatakan sebagai *non associated plasticity*.

2. Model *Hardening Soil*

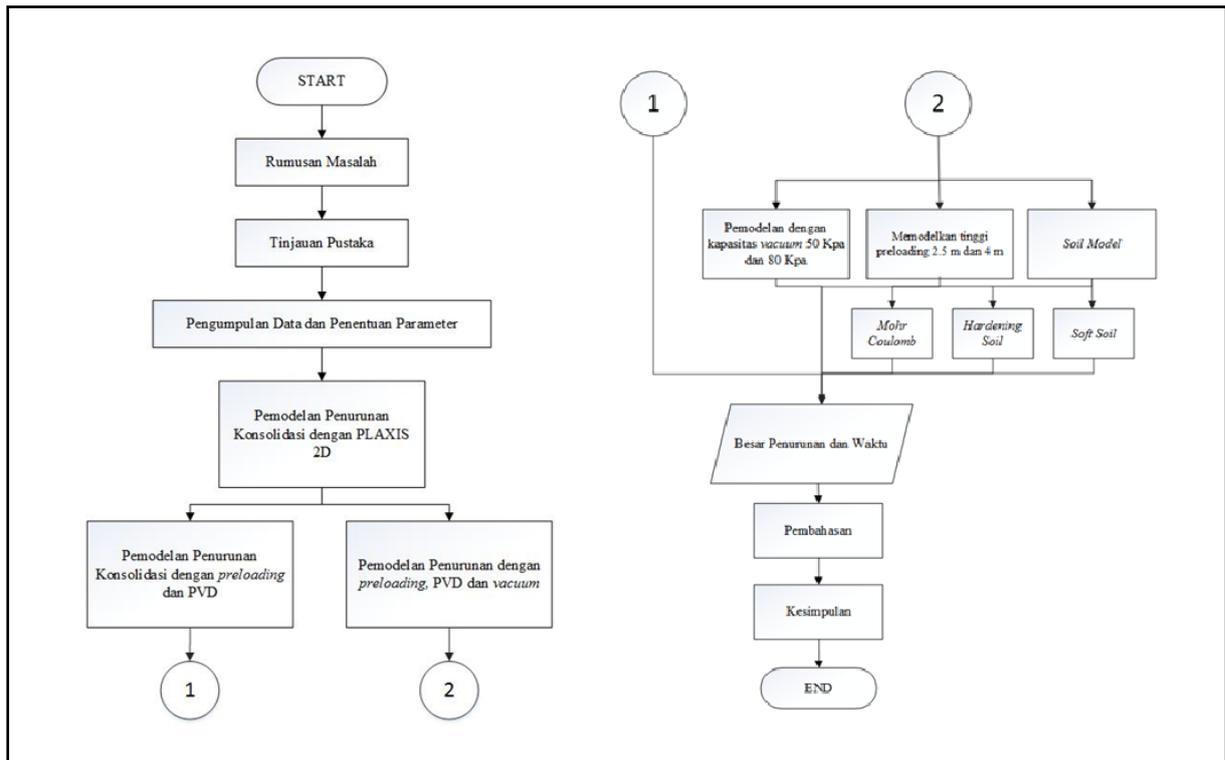
Model *Hardening Soil* merupakan *advanced model* yang dapat digunakan untuk memodelkan berbagai jenis perilaku tanah dan batuan. Perbedaan utama antara model *Hardening Soil* dan Mohr Coulomb menjelaskan pembatasan nilai tegangan berdasarkan nilai sudut geser sedangkan model *Hardening Soil* menjelaskan jenis elastoplastis dari model hiperbolik.

3. Model *Soft Soil*

Model *Soft Soil* merupakan *advanced model* yang dapat digunakan untuk memodelkan jenis perilaku tanah seperti tanah lempung lunak dan juga gambut yang terkonsolidasi secara normal bisa menggunakan pemodelan ini.

3. METODE PENELITIAN

Pemodelan dilakukan dengan menggunakan program PLAXIS 2D dengan model *axisymmetric*. Pemodelan ini dilakukan dengan asumsi tanah lempung lunak yang layak digunakan. Model divariasikan dengan memilih kapastias vakum yang beragam dan juga dengan pemilihan analisis dengan tiga *soil model* yaitu Mohr Coulomb, *Hardening Soil* dan *Soft Soil*. Pemodelan dilakukan untuk mengetahui penurunan konsolidasi dengan menggunakan *Prefabricated Vertical Drains* (PVD) dan *preloading* yang dikombinasikan dengan menggunakan *vacuum* dan tidak menggunakan *vacuum*. Bagan alir dari penelitian ini ditunjukkan **Gambar 3**.



Gambar 3. Bagan alir pemodelan perbaikan tanah menggunakan *vacuum consolidation* pada tanah lempung lunak dengan program PLAXIS 2D

4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

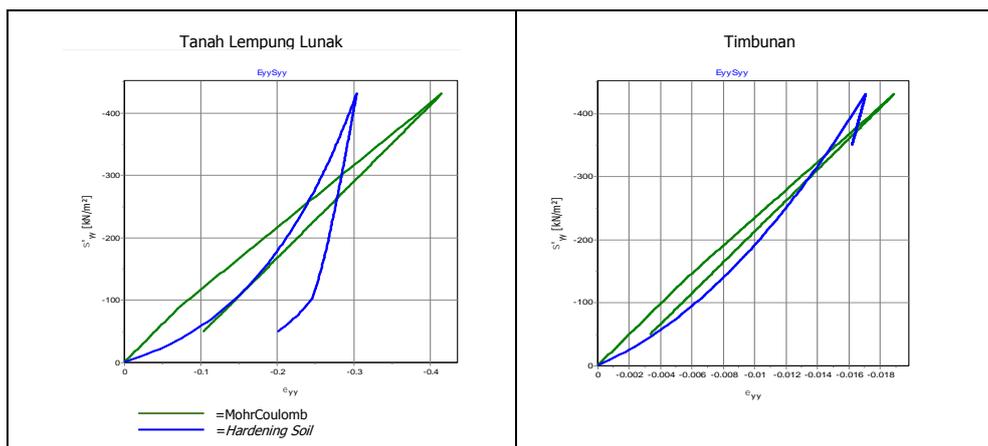
4.1 Pemodelan

Pemodelan dilanalis dengan menggunakan tiga soil model yaitu Mohr Coulomb, *Hardening Soil* dan *Soft Soil*. Berikut parameter tanah yang digunakan pada Pemodelan PLAXIS 2D pada **Tabel 1** menyajikan parameter tanah lempung lunak dan timbunan.

Tabel 1. Parameter Model Mohr Coulomb

	Ketebalan [m]	γ_{sat} [kN/m ³]	γ_{unsat} [kN/m ³]	E' [kN/m ³]	ν	c [kNm ²]	ϕ [°]	$k_h=k_v$ [m/hari]
Lempung Lunak	10	16	16	1.100	0,2	12	24	0,16 *10 ⁻³
Timbunan	3	20	20	22.000	0,2	10	30	8,64 *10 ⁻³

Pada soil model MC (Mohr Coulomb) nilai E bisa langsung digunakan sesuai data dengan di lapangan namun berbeda dengan soil model HS (*Hardening Soil*) diperlukan adanya konversi parameter. Konversi parameter ini di lakukan untuk mengetahui nilai E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , dan E_{ur}^{ref} yang akan digunakan dalam parameter HS model. Konversi dilakukan dengan pengujian Oedometer yang terdapat di PLAXIS 2D. *Trial and error* dilakukan dengan cara mencoba-coba nilai E untuk parameter HS model hingga diperoleh grafik pengujian yang dianggap serupa. Setelah melakukan tahap *trial and error*, diperoleh hasil pengujian Oedometer. Berikut ini merupakan hasil dari pengujian Oedometer ditunjukkan **Gambar 4**.



Gambar 4. Grafik parameter hasil *soil test* dengan oedometer

Berdasarkan hasil *trial* and *error* diperoleh nilai E_{oed}^{ref} untuk setiap lapisan tanah seperti yang ditampilkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Parameter *Hardening Soil Model*

	Ketebalan [m]	$\gamma_{sat} / \gamma_{unsat}$ [kN/m ³]	$E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref}$ [kN/m ²]	E_{ur}^{ref} [kN/m ²]	E [power]
Lempung Lunak	10	16/16	3	1,1	0,9
Timbunan	3	20/20	60	22	0,5

Tabel 2. Parameter *Hardening Soil Model* (lanjutan)

	c'_{ref} [kN/m ²]	ϕ [°]	ν'_{ur}	P_{ref} [kN/m ²]	K_{nc}^0	Rf	$k_h = k_v$
Lempung Lunak	12	24	12	24	0,59	0,9	$0,16 \cdot 10^{-3}$
Timbunan	10	30	10	30	0,5	0,9	$8,64 \cdot 10^{-3}$

Soil model selanjutnya adalah SS model. Sama dengan HS model, pada SS model perlu adanya konversi parameter sebelum melakukan pemodelan. Ada dua parameter utama yang harus dicari sebelum melakukan pemodelan dengan SS model, yaitu λ^* dan K^* . Berikut data yang digunakan untuk mencari nilai λ^* dan K^* :

$$c_c = 0,345$$

$$c_s = 0,1035$$

$$e = 0,5$$

Perhitungan nilai λ^* dan K^* :

$$\lambda^* = \frac{c_c}{2,3(1+e)} = \frac{0,345}{2,3(1+0,5)} = 0,1$$

$$K^* = \frac{2c_s}{2,3(1+e)} = \frac{2 \cdot 0,1035}{2,3(1+0,5)} = 0,06$$

Tabel 3. Parameter Tanah dan Timbunan *Soft Soil*

	Ketebalan [m]	$\gamma_{sat} / \gamma_{unsat}$ [kN/m ³]	c' [kN/m ²]	ϕ [°]	v'_{ur}	K_{nc}^0	λ^*	K^*	$k_h = k_v$ [m/hari]
Lempung Lunak	10	16/16	12	24	0,2	0,59	0,1	0,6	$0,16 \cdot 10^{-3}$
Timbunan	3	20/20	10	30	0,2	0,5	$5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$8,64 \cdot 10^{-3}$

Tahapan pemodelan yang dilakukan pada PLAXIS 2D ditunjukkan pada **Tabel 4** yang menunjukkan model dengan mevariasikan tanpa vakum dan **Tabel 5** menunjukkan model dengan dengan dikombinasikan dengan vakum.

Table 4. Tahapan Pekerjaan dalam Pemodelan PLAXIS 2D Tanpa Vakum

No	Tahapan Pekerjaan	Waktu Pekerjaan
1	Tanah Asli	-
2	Pemasangan <i>PVD</i>	5 hari
3	Timbunan <i>Layer 1</i>	5 hari
4	Timbunan <i>Layer 2</i>	5 hari
5	Timbunan <i>Layer 3</i>	5 hari
6	Konsolidasi 90%	Sampai konsolidasi 90%

Table 5. Tahapan Pekerjaan dalam Pemodelan PLAXIS 2D Dengan Vakum

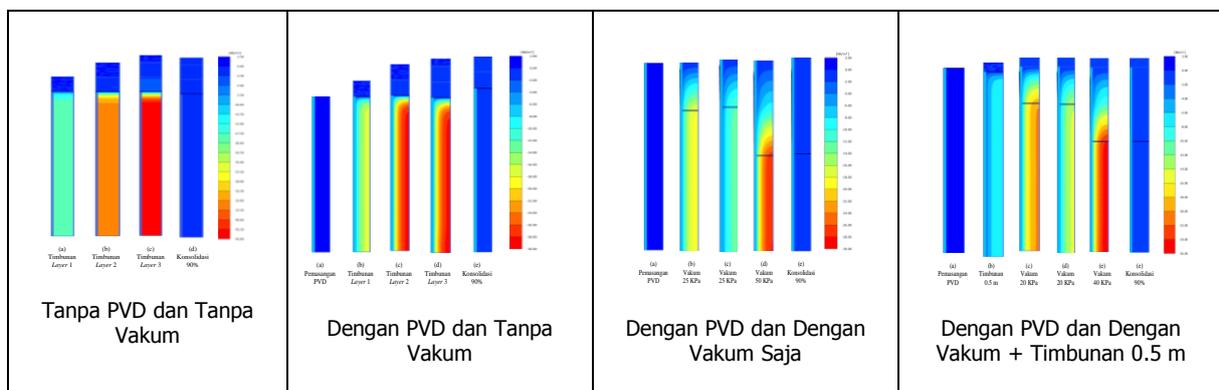
No	Tahapan Pekerjaan	Waktu Pekerjaan
1	Tanah Asli	-
2	Pemasangan <i>PVD</i>	5 hari
3	Timbunan <i>Layer 1</i>	5 hari
4	Vakum 1	5 hari
5	Vakum 2	5 hari
6	Vakum 3	5 hari
7	Konsolidasi 90%	Sampai konsolidasi 90%

4.2 Hasil Analisis

Hasil analisis dari pemodelan yang dilakukan pada PLAXIS 2D disajikan pada gambar berikut. Hasil yang didapatkan adalah perubahan tekanan air pori dari setiap tahapan pemodelan pekerjaan mulai dari pemasangan selimut pasir hingga konsolidasi 90%.

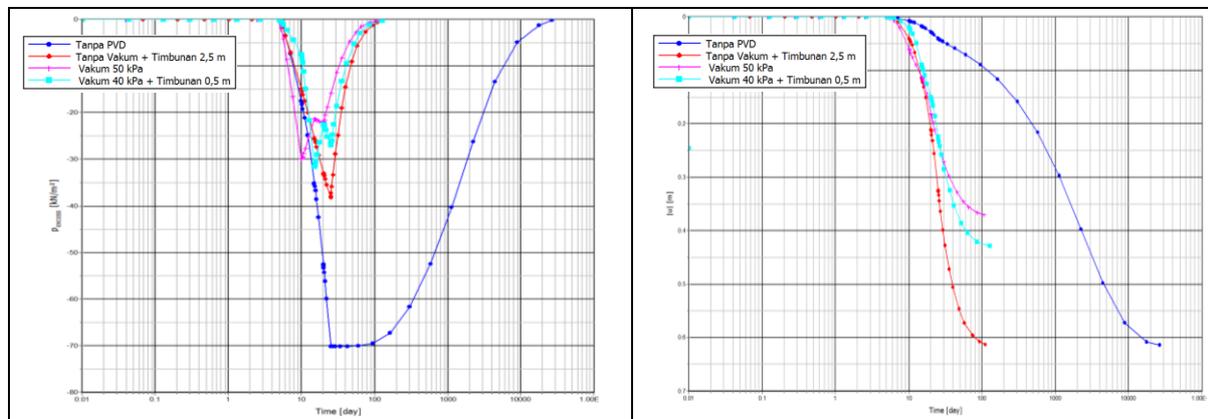
A. Pemodelan Mohr Coulomb

Hasil analisis yang didapatkan dari soil model Mohr Coulomb dengan model *Single Drainage* ditunjukkan pada **Gambar 5** dan **Gambar 6**.



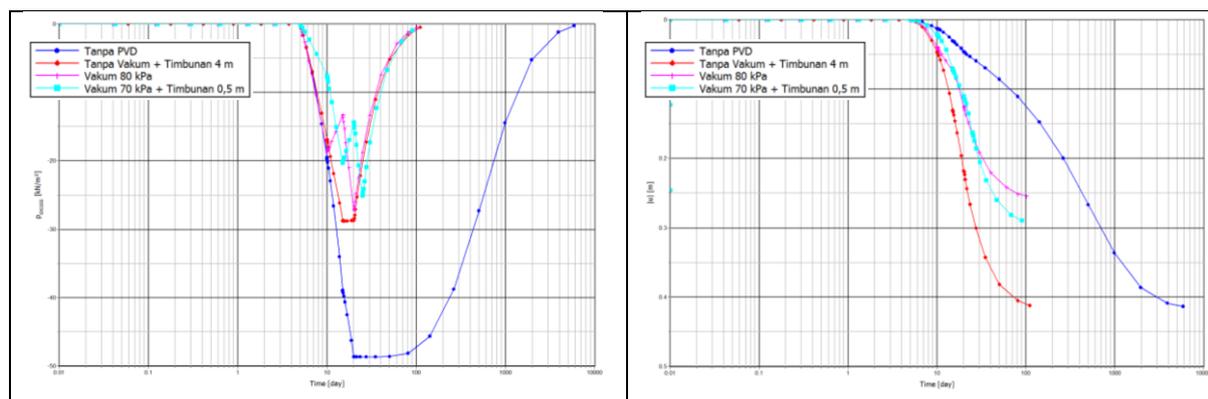
Gambar 5. Tekanan air pori ekses dengan *soil model* Mohr Coulomb

Pada **Gambar 5** menunjukkan perubahan tekanan air pori dari setiap tahapan pemodelan pada kondisi vakum dengan tekanan 50 KPa, pekerjaan mulai dari pemasangan PVD hingga konsolidasi 90%. Hasil analisis untuk model Mohr Coulomb (*single drainage*) dengan kondisi valum 50 KPa ditunjukkan pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Hasil analisis *soil model* Mohr Coulomb (*Single Drainage*)

Hasil analisis untuk model Mohr Coulomb (*single drainage*) dengan kondisi valum 80 KPa ditunjukkan pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Hasil analisis *soil model* Mohr Coulomb (*Single Drainage*)

Hasil analisis *soil model* mohr Coulomb dengan kondisi *single drainage* dan *double drainage* memiliki perbedaan yang cukup signifikan namun dari hasil analisis menunjukkan bahwa hasil dengan kondisi *single drainage* kombinasi Tanpa PVD + Timbunan 4 m memiliki nilai penurunan yang terbesar, ditunjukkan pada **Tabel 6** untuk nilai konsolidasi.

Tabel 6. Rekapitulasi Penurunan Mohr Coulomb Model

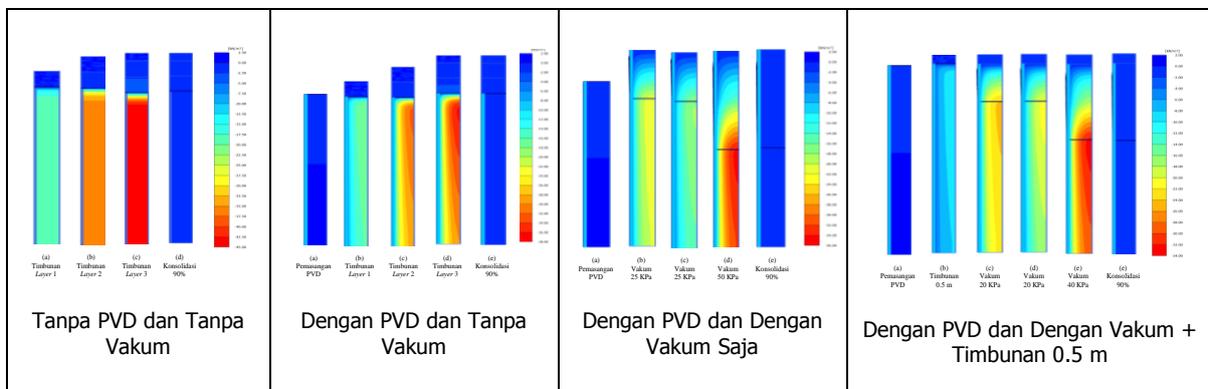
Kondisi	<i>Single Drainage</i>		<i>Double Drainage</i>	
	Waktu (hari)	Penurunan (m)	Waktu (hari)	Penurunan (m)
Tanpa PVD + Timbunan 2,5 m	23.343	0,413	5.851	0,414
Dengan PVD + Timbunan 2,5 m	111	0,411	111	0,412
Vakum 50 kPa	142	0,277	102	0,255
Timbunan 0,5 m + Vakum 40 kPa	112	0,310	91	0,289

Tabel 6. Rekapitulasi Penurunan Mohr Coulomb Model (lanjutan)

Kondisi	Single Drainage		Double Drainage	
	Waktu (hari)	Penurunan (m)	Waktu (hari)	Penurunan (m)
Tanpa PVD + Timbunan 4 m	17.757	0,608	4.874	0,614
Dengan PVD + Timbunan 4 m	110	0,612	142	0,615
Vakum 80 kPa	117	0,370	122	0,334
Timbunan 0,5 m + Vakum 70 kPa	112	0,427	156	0,397

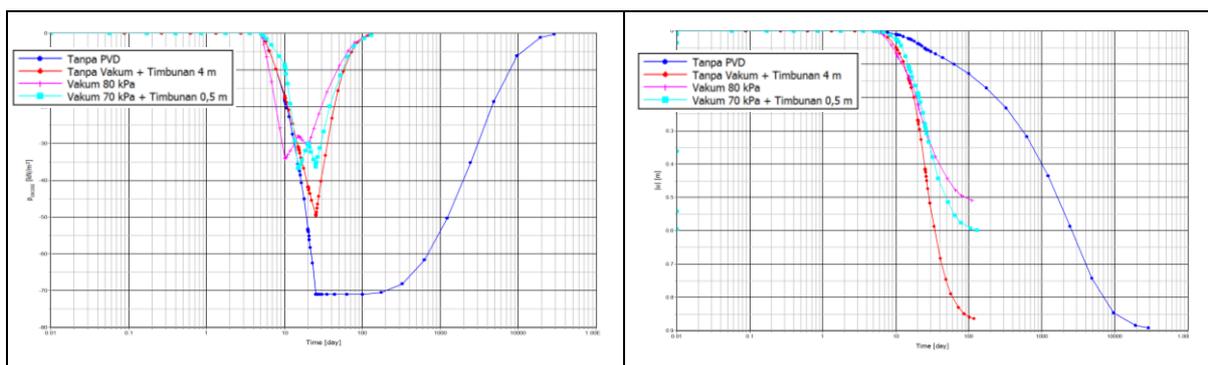
B. Pemodelan *Hardening Soil*

Hasil analisis yang didapatkan dari soil model *Hardening Soil* dengan model *Single Drain* ditunjukkan pada **Gambar 8** dan **Gambar 9**.



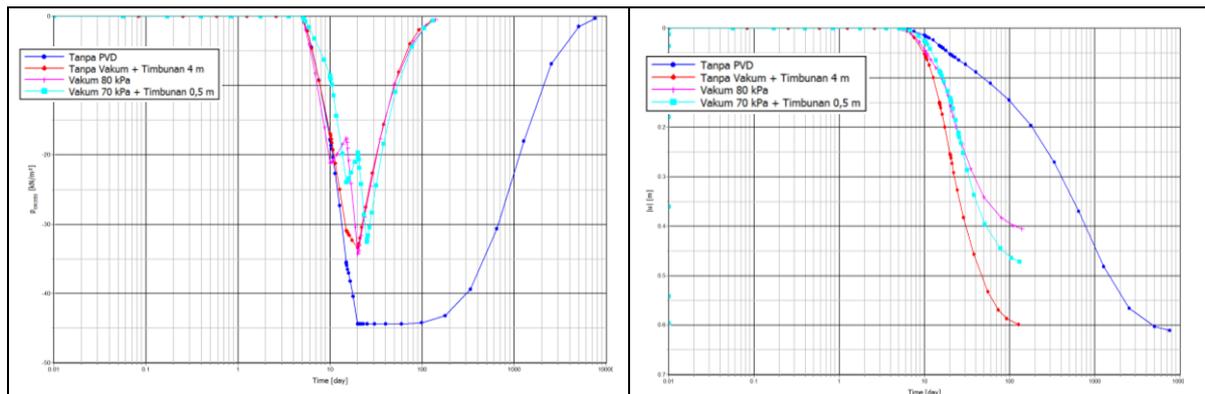
Gambar 8. Tekanan air pori ekses dengan *soil model Hardening Soil*

Pada **Gambar 8** menunjukkan perubahan tekanan air pori dari setiap tahapan pemodelan pada kondisi vakum dengan tekanan 50 KPa, pekerjaan mulai dari pemasangan PVD hingga konsolidasi 90%. Hasil analisis untuk model *Hardening Soil* (*single drainage*) dengan kondisi valum 50 KPa ditunjukkan pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Hasil analisis *soil model Hardening Soil* (*Single Drainage*)

Hasil analisis untuk model *Hardening Soil* (*single drainage*) dengan kondisi valum 80 KPa ditunjukkan pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Hasil analisis *soil model Hardening Soil (Single Drainage)*

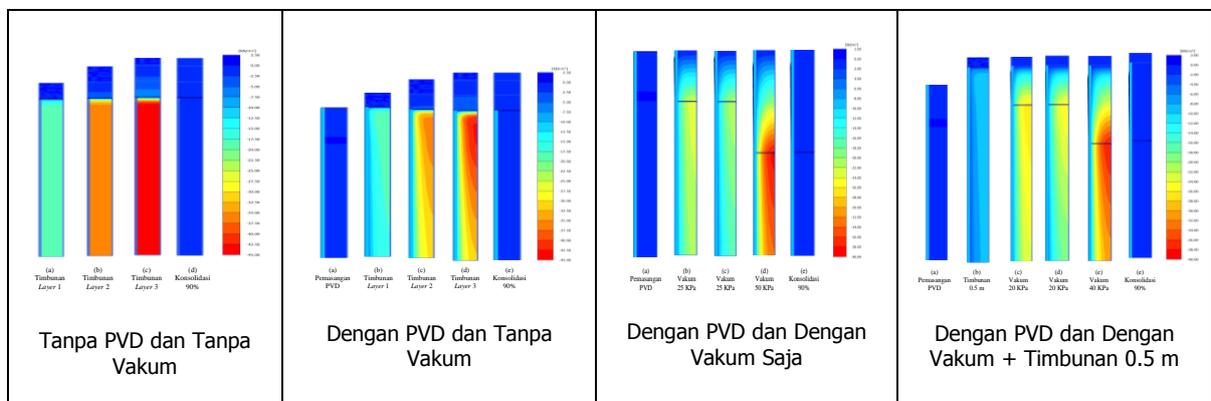
Hasil analisis *soil model Hardening Soil* dengan kondisi *single drainage* dan *double drainage* memiliki perbedaan yang cukup signifikan namun dari hasil analisis menunjukkan bahwa hasil dengan kondisi *single drainage* kombinasi Tanpa PVD + Timbunan 4 m memiliki nilai penurunan yang terbesar, ditunjukkan pada **Tabel 7** untuk nilai konsolidasi.

Tabel 7. Rekapitulasi Penurunan *Hardening Soil Model*

Kondisi	<i>Single Drainage</i>		<i>Double Drainage</i>	
	Waktu (hari)	Penurunan (m)	Waktu (hari)	Penurunan (m)
Tanpa PVD + Timbunan 2,5 m	30.159	0,612	7.554	0,619
Dengan PVD + Timbunan 2,5 m	128	0,598	128	0,598
Vakum 50 kPa	125	0,426	140	0,405
Timbunan 0,5 m + Vakum 40 kPa	131	0,489	131	0,472
Tanpa PVD + Timbunan 4 m	28.769	0,887	6.015	0,887
Dengan PVD + Timbunan 4 m	118	0,864	124	0,865
Vakum 80 kPa	110	0,507	125	0,477
Timbunan 0,5 m + Vakum 70 kPa	131	0,598	144	0,572

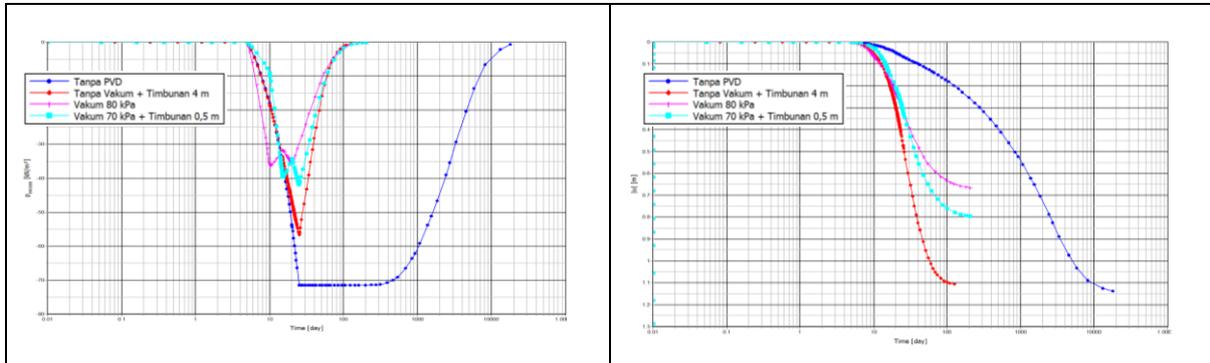
C. Pemodelan *Soft Soil*

Hasil analisis yang didapatkan dari *soil model Soft Soil* dengan model *Single Drain* ditunjukkan pada **Gambar 11** dan **Gambar 12**.



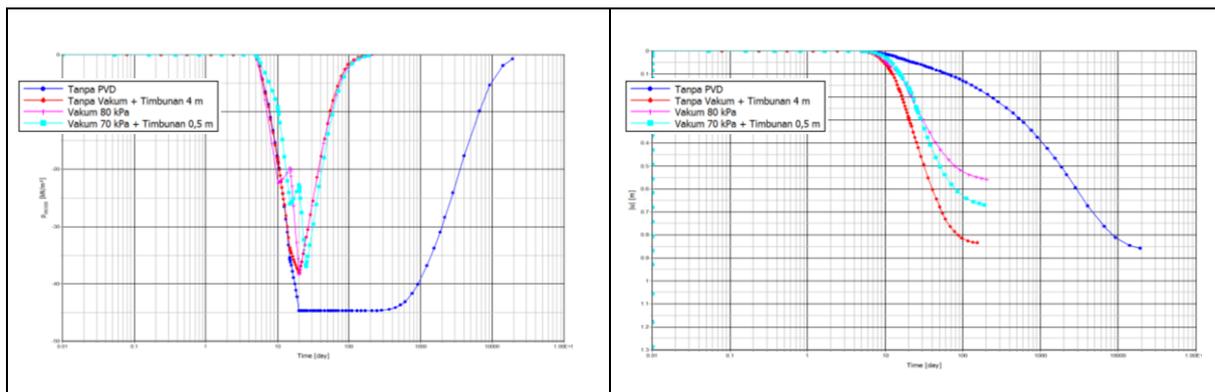
Gambar 11. Tekanan air pori eksres dengan *soil model Soft Soil*

Pada **Gambar 10** menunjukkan perubahan tekanan air pori dari setiap tahapan pemodelan pada kondisi vakum dengan tekanan 50 KPa, pekerjaan mulai dari pemasangan PVD hingga konsolidasi 90%. Hasil analisis untuk model *Soft Soil (single drainage)* dengan kondisi valum 50 KPa ditunjukkan pada **Gambar 11**.



Gambar 12. Hasil analisis soil model *Soft Soil (single drainage)*

Hasil analisis untuk model *Soft Soil (single drainage)* dengan kondisi valum 80 KPa ditunjukkan pada **Gambar 13**.



Gambar 13. Hasil analisis soil model *Soft Soil (Double Drain)*

Hasil analisis *soil model Soft Soil* dengan kondisi *single drainage* dan *double drainage* memiliki perbedaan yang cukup signifikan namun dari hasil analisis menunjukkan bahwa hasil dengan kondisi *single drainage* kombinasi Tanpa PVD + Timbunan 4 m memiliki nilai penurunan yang terbesar, ditunjukkan pada **Tabel 8** untuk nilai konsolidasi.

Tabel 8. Rekapitulasi Penurunan Model *Soft Soil*

Kondisi	<i>Single Drainage</i>		<i>Double Drainage</i>	
	Waktu (hari)	Penurunan (m)	Waktu (hari)	Penurunan (m)
Tanpa PVD + Timbunan 2,5 m	19.127	0,858	19.127	0,858
Dengan PVD + Timbunan 2,5 m	149	0,834	153	0,834
Vakum 50 kPa	192	0,580	202	0,557
Timbunan 0,5 m + Vakum 40 kPa	192	0,686	189	0,668
Tanpa PVD + Timbunan 4 m	17.867	1,137	17.867	1,137
Dengan PVD + Timbunan 4 m	125	1,106	128	1,107
Vakum 80 kPa	206	0,664	201	0,632
Timbunan 0,5 m + Vakum 70 kPa	193	0,795	200	0,767

5. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik simpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh kondisi *single drainage* dan *double drainage* tidak berbeda secara signifikan. Pada *soil model Soft Soil* penurunan dan waktu penurunan antara *single drain* dan *double drainage* menghasilkan nilai yang hampir sama.
2. *Soil Model Soft Soil* menghasilkan nilai penurunan yang paling besar dibandingkan dengan *soil model Mohr Coulomb* dan *Hardening Soil*. Sedangkan *soil model Mohr Coulomb* menghasilkan nilai penurunan yang paling kecil dibandingkan dengan kedua *soil model* yang digunakan.
3. Kapasitas vakum mempengaruhi penurunan, semakin besar kapasitas vakum semakin besar juga penurunan.

DAFTAR RUJUKAN

- Dam, L. T. K, Sandanbata, I., & Kimura, M. (2006). Vacuum Consolidation Method - Worldwide Practice and the Latest Improvement in Japan. *Annual Report of Hazama*, 12.
- Das, B. M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering*. USA: Cengage Learning.
- Ikhyia, I., & Schweiger, H. (2012). Numerical Modeling of Floating Prefabricated Vertical Drains in Layered Soil. *Acta Geotechnica Slovenica*, 2.
- Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, & Kelly, R. (2009). Modelling of combined vacuum and surcharge preloading with vertical drains. *Proceedings of 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (pp. 2204-2207). Netherlands: IOS Press.
- Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., V Wijeyakulasuriya, G McIntosh, & R Kelly. (2010). Soft soil improved by prefabricated vertical drains: performance and prediction. *Symposium on New Techniques for Design and Construction in Soft Clays* (pp. 227-246). Brazil: Officna de Textos.