

STUDI PARAMETRIK JARAK PENGARUH PENURUNAN DAN PERGERAKAN LATERAL AKIBAT *VACUUM PRE-LOADING* PADA DAMAGE AREA SEKITAR

Mario Oktavianus Lay¹, Inda Sumarli², dan Ali Iskandar³

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
vian.lay@yahoo.com

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
indasumarli@gmail.com

³Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
ali.iskandar1999@gmail.com

Masuk: 03-07-2020, revisi: 10-07-2020, diterima untuk diterbitkan: 04-08-2020

ABSTRACT

Soil-fill is type of soil with low bearing capacity, therefore it's need soil improvement to resolve the settlement. Soil improvement divided into 2 categories, namely methods that use new material and reinforcement. Commonly used method is PVD combined with vacuum pre-loading. Pre-loading is an application to increase surcharge load which aims to reduce the primary settlement occurs. Pre-loading not only causes settlement, but also cause lateral displacement which cause damage to the outside area around the improvement area. Thus, an analysis of distance effect between the improvement boundary and outside of improvement area in needed to prevent damage to utility around the site. Deformation analysis will be assisted by 2-Dimensional finite element program. Width of the improvement area is 80 meters with a depth of PVD is 14,5 meters to verify parameters. With the parameters that have been verified, an analysis is carried out on PVD with depth of 5m to 30m to determined distance effect of settlement and lateral displacement from boundary of the improvement area to until the value of the settlement and lateral displacement reaches <2cm. Result of studies on general is to find distance effect caused by vacuum pre-loading in areas outside the improvement boundary.

Keywords: PVD; finite element program (2D); distance effect; settlement; lateral displacement

ABSTRAK

Tanah hasil urugan merupakan jenis tanah lunak dengan daya dukung yang rendah, sehingga terjadi penurunan konsolidasi dan membutuhkan perbaikan. Perbaikan tanah dibagi menjadi 2 kategori, yaitu metode yang menggunakan material baru dan menggunakan pemanfaatan perkuatan. Metode yang umum digunakan adalah PVD yang dikombinasikan dengan *vacuum pre-loading*. *Pre-loading* adalah aplikasi penambahan beban surcharge yang bertujuan agar terjadinya penurunan primer. *Pre-loading* tidak hanya menyebabkan penurunan, tetapi juga menyebabkan terjadinya perpindahan secara lateral kearah luar yang dapat menyebabkan kerusakan pada area luar disekitar daerah perbaikan. Sehingga, dibutuhkan analisis jarak pengaruh antara batas lahan perbaikan dengan daerah luar perbaikan, untuk mencegah kerusakan pada struktur atau utilitas disekitar lokasi perbaiki. Analisis deformasi menggunakan program elemen hingga 2D. Lebar area perbaikan 80 meter dengan kedalaman PVD 14,5 meter untuk melakukan verifikasi parameter. Dengan parameter yang telah diverifikasi, dilakukan analisis pada PVD dengan kedalaman 5m hingga 30m untuk mengetahui jarak pengaruh penurunan dan pergerakan lateral dari batas lahan perbaikan hingga nilai penurunan dan pergerakan lateral <2 cm. Hasil studi secara umum menunjukkan seberapa besar jarak pengaruh yang diakibatkan oleh vacuum pre-loading pada daerah diluar batas perbaikan.

Kata kunci: PVD; program elemen hingga 2D; jarak pengaruh; penurunan; pergerakan lateral

1. PENDAHULUAN

Tanah hasil urugan pada daerah yang sebelumnya merupakan rawa umumnya merupakan jenis tanah lunak yang memiliki daya dukung tanah rendah serta penurunan yang terjadi relatif besar. Apabila tidak dilakukan perbaikan tanah terlebih dahulu pada jenis tanah ini. maka bangunan yang di bangun di tanah hasil urugan akan mengalami penurunan konsolidasi. Konsolidasi merupakan fenomena dalam mekanika tanah yang menimbulkan permasalahan geoteknik yang terjadi pada waktu yang lama. Konsolidasi terjadi akibat berkurangnya volume rongga air pori dari

tanah jenuh yang memiliki permeabilitas rendah akibat beban yang bekerja dalam periode waktu tertentu, sehingga diperlukan perbaikan tanah. Pada penelitian ini membahas metode *vacuum pre-loading* dan pemanfaatan PVD.

Pre-loading adalah aplikasi penambahan beban *surchage* sebelum konstruksi dilakukan, agar terjadinya penurunan primer. Karena tanah kompresif biasanya ditandai dengan permeabilitas yang sangat rendah, waktu yang diperlukan untuk konsolidasi sangat lama, walaupun dengan penambahan beban *surchage load* yang cukup tinggi. Oleh karena itu, penerapan *pre-loading* saja mungkin tidak dapat dilakukan karena jadwal konstruksi yang ketat, PVD dikombinasikan dengan *pre-loading* yang bertujuan untuk mempercepat konsolidasi selama masa konstruksi, namun terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu, jarak antar saluran, pola pemasangan, serta jarak antara batas lahan yang diperbaiki dengan eksisting bangunan disekitar.

Mekanisme pembebanan dengan sistem vacuum sebagai *pre-loading* berupa tekanan negative hisap tidak hanya menyebabkan penurunan pada tanah dasar, namun juga menyebabkan terjadinya perpindahan lateral kearah luar sehingga menyebabkan kerusakan pada area disekitar daerah perbaikan. Penelitian ini akan fokus pada jarak pengaruh antara batas lahan perbaikan dengan daerah luar perbaikan, untuk mencegah kerusakan pada struktur atau utilitas di sekitar lokasi perbaikan dengan melakukan pengaturan kedalaman PVD yang diperkirakan mampu mengurangi jarak pengaruh.

Berdasarkan latar belakang masalah di atas, penulis akan melakukan analisis mengenai jarak pengaruh penurunan dan pergerakan lateral yang diakibatkan oleh *vacuum pre-loading*, sehingga dapat meminimalisir kerusakan dengan melakukan analisis pada kedalaman PVD 5 m hingga 30 m.

Dari penelitian tersebut diharapkan dapat mengetahui jarak pengaruh penurunan dan pergerakan lateral diluar daerah perbaikan dengan masing-masing kedalaman PVD.

Berat jenis tanah (γ) dan kadar air (w)

Berat satuan dan kadar air dari tanah berkorelasi dengan derajat kepadatan, derajat saturasi, komposisi mineral dan kedalaman *overburden*. Secara teori, komposisi mineral dan derajat kepadatan di suatu perkotaan yang sama tidak jauh berbeda. Oleh karena itu, pada saat tanah di sekitar area perkotaan mendekati 100% jenuh, maka berat satuan jenuh dan kadar air akan memiliki kemiripan. Tetapi, semakin dalam suatu lapisan, maka semakin besar berat satuan, dan memiliki kadar air yang kecil. (Ou, 2006).

Permeabilitas (k)

Permeabilitas merupakan keadaan dimana air mampu untuk mengalir di tanah, dan merupakan salah satu sifat dasar tanah yang bisa dilihat pada Tabel 1 (Ou, 2006). Koefisien permeabilitas tergantung pada beberapa faktor, yaitu: kekentalan cairan, distribusi ukuran pori, distribusi ukuran butir, angka pori, kekasaran permukaan butiran tanah, dan derajat kejenuhan tanah. (Das, 1988).

Tabel 1. Koefisien permeabilitas (Sumber: Ou, 2006)

<i>Soil Type</i>	k (cm/sec)
<i>Clean gravel</i>	$> 10^{-1}$
<i>Coarse to fine soil</i>	$10^{-1} - 10^{-3}$
<i>Fine sand, silty sand</i>	$10^{-3} - 10^{-5}$
<i>Silt, Silty clay</i>	$10^{-4} - 10^{-6}$
<i>Clay</i>	$< 10^{-7}$

Settlement

Penambahan beban di atas suatu permukaan tanah dapat menyebabkan lapisan tanah di bawahnya mengalami pemampatan. Pemampatan tersebut disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, keluarnya air atau udara dari dalam pori, dan sebab-sebab lain. Beberapa atau semua faktor tersebut mempunyai hubungan dengan keadaan tanah yang bersangkutan. Secara umum, penurunan (*settlement*) pada tanah yang disebabkan oleh pembebanan dapat dibagi dalam dua kelompok besar (Das, 1988), yaitu: penurunan konsolidasi dan penurunan segera.

Penurunan konsolidasi

Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*), yang merupakan hasil dari perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat dari keluarnya air yang menempati pori-pori tanah. Keluarnya air dari dalam pori selalu disertai dengan berkurangnya volume tanah, berkurangnya volume tanah tersebut dapat menyebabkan penurunan lapisan

tanah itu. Karena air pori di dalam tanah berpasir dapat mengalir keluar dengan cepat, maka penurunan segera dan penurunan konsolidasi terjadi bersamaan. (Das, 1988).

Untuk lempung *normally consolidated*:

$$S_c = \frac{C_c H}{1+e_0} \log \left(\frac{p_o + \Delta P}{p_o} \right) \quad (1)$$

Untuk lempung *over-consolidated*:

(a) Bila $(P_o + \Delta p) \leq P_c$, maka

$$S_c = \frac{C_s H}{1+e_0} \log \left(\frac{p_o + \Delta P}{p_o} \right) \quad (2)$$

(b) Bila $(P_o + \Delta p) \geq P_c$, maka

$$S_c = \frac{C_s H}{1+e_0} \log \frac{p_o}{p_c} + \frac{C_c H}{1+e_0} \log \left(\frac{p_o + \Delta P}{p_o} \right) \quad (3)$$

dengan C_c = indeks pemampatan, C_s = indeks pemuaihan, H = tebal lapisan, e_0 = angka pori awal pada saat volume tanah sama dengan V_0 , P_o = tekanan efektif, Δp = penambahan tekanan.

Penurunan elastis

Penurunan elastis 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. Besar penurunan elastis dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut. (Gunawan, et. al., 2020)

$$S_i = \frac{\Delta \sigma}{M} H \quad (4)$$

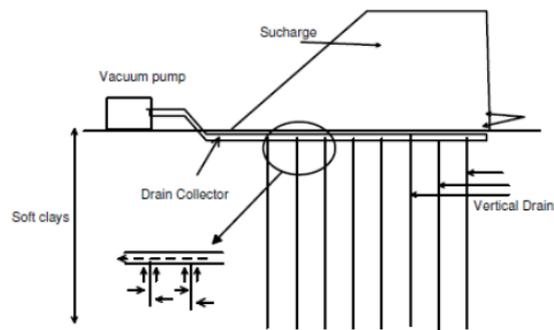
dengan $\Delta \sigma$ = tegangan total, M = *constrained modulus*

Vacuum pre-loading

Pada kondisi tertentu, pembebanan berupa timbunan diatas tanah lunak tidak dapat dilakukan, hal tersebut disebabkan oleh kondisi tanah dasar yang sangat lunak sehingga tidak memungkinkan untuk diberi beban timbunan walaupun dengan tinggi timbunan yang tidak seberapa tinggi. Untuk itu sistem *pre-loading* yang digunakan adalah bukan sistem *conventional pre-loading*, melainkan menggunakan metode *vacuum pre-loading*.

Prinsip penggunaan *vacuum pre-loading* pada tanah lempung lunak pertama kali diperkenalkan oleh W. Kjellman dari Swedish Geotechnical Institute pada tahun 1952. Pada metode ini, pembebanan menggunakan timbunan diganti dengan menggunakan tekanan atmosfer.

Peralatan ini terdiri dari sistem drainase vertikal dengan lapisan drainase diatasnya (lapisan pasir). Lapisan pasir tersebut ditutupi oleh lapisan yang kedap air. Drainase horizontal dipasang pada lapisan drainase dan berhubungan langsung dengan pompa *vacuum*. Untuk menjaga kelembapan udara, *membrane* kedap air itu ditempatkan pada dasar dari saluran yang diisi penuh dengan *bentonite*. Tegangan negatif akan terjadi pada lapisan drainase tersebut akibat proses pemompaan *vacuum* dapat dilihat pada gambar 1. Tegangan negatif tersebut akan menghasilkan *negative pore water pressure*, yang disebabkan oleh meningkatnya nilai tegangan efektif pada tanah sehingga dapat menyebabkan terjadinya konsolidasi pada tanah. (Indraratna, et.al., 2009)



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

Dalam analisis geoteknik, tekanan atmosfer sering diabaikan atau dianggap nol dalam hitungan tegangannya. Akan tetapi, dalam teori konsolidasi vakum, tekanan atmosfer perlu dipertimbangkan. Saat tekanan vakum diaplikasikan, tegangan vertikal tetap sama, akan tetapi tekanan pori berkurang. Besarnya kenaikan tegangan efektif sama dengan

tekanan isapan dari pompa vakum dikalikan dengan nilai efisiensi. Umumnya, efisiensi pompa vakum berkisar antara 70 – 80% dari tekanan atmosfer. (Chu & Yan, 2005).

Keuntungan menggunakan sistem *vacuum pre-loading* ini adalah tidak diperlukannya material tambahan, waktu pelaksanaan juga relatif lebih singkat selain itu peralatan yang digunakan bukan merupakan peralatan berat dan besar. Selain itu juga, tidak digunakan bahan kimia untuk stabilitas sehingga relative aman untuk lingkungan. (Chai, et. al., 2005).

Keuntungan lain dari penggunaan metode ini adalah konsolidasi secara isotropic dapat mengurangi resiko terjadinya keruntuhan akibat beban konstruksi di atasnya. Selain itu, resiko terjadinya keruntuhan pada talud juga bisa dihindari dengan melakukan kontrol terhadap pemampatan (Masse, et. al., 2001). Ada beberapa hal penting yang harus diperhatikan jika menggunakan metode ini (Masse, et. al., 2001) yaitu:

1. Untuk menjaga keefektifan pengaliran dibawah *membrane*, perlu dilakukan pengecekan dan pengaturan kadar air serta udara selama proses pemompaan.
2. Menjaga kondisi jenuh air pada tanah dibawah lapisan *membrane*.
3. Menjaga *vacuum* tetap pada level yang efektif.
4. Menjaga agar tidak terjadi kebocoran sama sekali peralatan *vacuum* maupun pada *membrane* pelapis.
5. Memperkuat dan melapisi sistem pada saluran disisi area yang akan di *vacuum pre-loading*.

Vertical drain

Karena memiliki permeabilitas yang rendah, tanah lempung akan mengalami konsolidasi dalam waktu yang lama. Untuk mempersingkat waktu konsolidasi, maka *vertical drain* dikombinasikan dengan *pre-loading* atau *vacuum*. *Vertical drain* adalah jalur drainase buatan yang dimasukan ke dalam lapisan tanah. Dengan demikian, pada saat konsolidasi air akan dikeluarkan dan mengalir melalui saluran vertikal, sehingga dapat mempercepat konsolidasi dan memperoleh peningkatan kekuatan. (Holtz, et.al., 1991).

Prefabricated vertical drain (PVD)

Prefabricated Vertical Drain dapat didefinisikan sebagai material atau produk sintetis yang terdiri dari lapisan filter (*drain jacket*) yang mengelilingi inti dengan karakteristik: a.) Kemampuan air tanah untuk meresap ke saluran pembuangan; b.) Sarana yang digunakan untuk mengalirkan air pori ke sepanjang saluran pembuangan. (Bergado, et.al., 1996).

Lapisan filter terdiri dari polyester yang berfungsi untuk memisahkan air dari tanah lunak disekitarnya dan filter berfungsi untuk membatasi perpindahan partikel halus ke dalam untuk mencegah penyumbatan.

PVD dapat digunakan pada pembangunan/pekerjaan di darat dan/atau di laut untuk tujuan sebagai berikut: (Badan Standardisasi Nasional, 2017)

1. Mengurangi besaran penurunan setelah pembangunan.
2. Mempercepat proses konsolidasi dengan mengurangi panjang lintasan disipasi tegangan air pori berlebih.
3. Meningkatkan stabilitas (dengan menaikkan tegangan efektif dalam tanah).
4. Mengurangi/mitigasi efek likuifaksi.

PVD ini dapat dikombinasikan dengan metode perbaikan tanah lain, yaitu: elektro osmosis kolom pasir (*compacted sand piles*), kompaksi dinamik (*dynamic compaction*) dan *deep mixing*.

2. METODE PENELITIAN

Pengolahan data

Dari data tanah yang telah diperoleh, maka data tanah tersebut akan di korelasi untuk menentukan parameter-parameter tanah, agar hasil dari pemodelan tersebut sesuai dengan yang didapatkan dari lapangan. Dari parameter-parameter yang telah didapatkan, maka akan dilakukan beberapa pemodelan, model-model tersebut adalah:

1. Pemodelan aktual *vacuum pre-loading* dengan *vertical drain*.
2. Pemodelan modifikasi *vacuum pre-loading* dengan *vertical drain*, dengan kedalaman 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, dan 30 m.

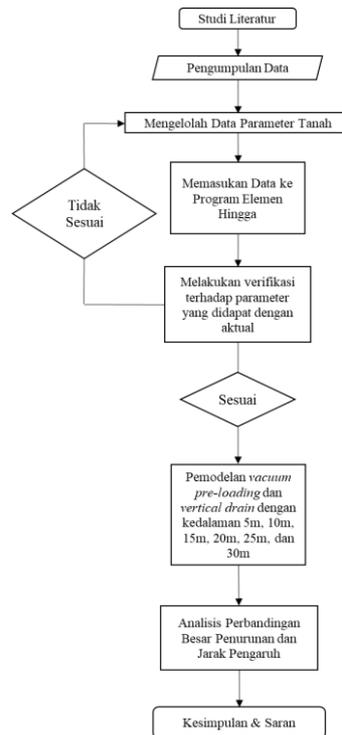
Langkah-langkah pengolahan data yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan korelasi parameter dari data tanah yang diperoleh agar dapat melengkapi parameter-parameter.
2. Membentuk pemodelan *vacuum pre-loading* dengan PVD menggunakan program elemen hingga 2D dengan parameter yang telah didapat agar sesuai dengan aktual, jika tidak sesuai maka dilakukan korelasi kembali.

3. Membentuk pemodelan *vacuum pre-loading* dan PVD, dengan parameter-parameter yang telah sesuai dengan aktual.
4. Membentuk pemodelan *vacuum pre-loading* dan PVD, dengan kedalaman 5m, 10m, 15m, 20m, 25m, dan 30m.
5. Membandingkan hasil dari keluaran (*output*) jarak pengaruh dari program berdasarkan kedalaman masing-masing PVD.

Diagram alir

Langkah-langkah yang akan dilakukan pada penelitian digambarkan pada alir penelitian seperti pada Gambar 2.

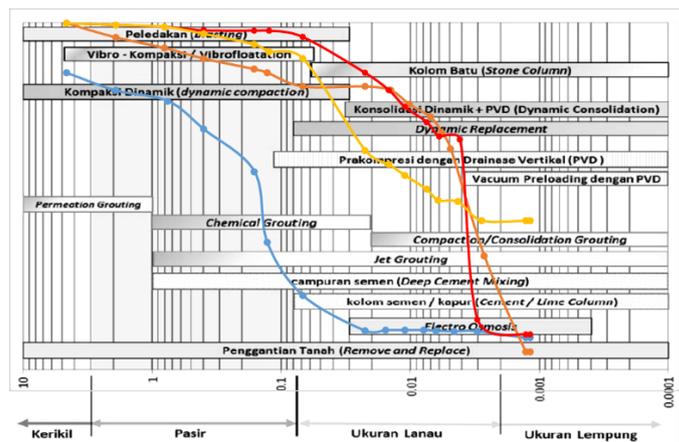


Gambar 2. Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter tanah

Klasifikasi tanah yang ditentukan berdasarkan data investigasi tanah dengan jarak yang paling dekat ke lokasi tinjauan, diantaranya CPTe 3-4, CPTe 3-5, CPTu-03, BH-09 dan BH-10, dari data hasil investigasi tersebut di dapat jenis tanah dengan menggabungkan nilai besaran N-SPT dari masing-masing data tersebut dan selanjutnya diklasifikasikan. Berdasarkan hasil klasifikasi jenis-jenis tanah, maka dapat dipastikan jenis tanah tersebut dapat dilakukan perbaikan dengan metode *vacuum pre-loading* dan PVD berdasarkan Gambar 3.



Gambar 3. Kriteria penentuan jenis perbaikan tanah dengan *grain size* (Sumber: SNI 8460:2017)

Resume hasil analisis parameter tanah

Berdasarkan data-data yang diperoleh dari hasil korelasi, dan analisis dari data hasil investigasi untuk menentukan parameter-parameter tanah yang akan digunakan pada program elemen hingga. Resume hasil analisis parameter tanah yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2. Namun, parameter yang digunakan untuk verifikasi hasil data lapangan pada analisis yaitu sampai kedalaman 29.3 meter.

Tabel 2. Resume hasil analisis parameter tanah

Lapisan Tanah	Kedalaman (m)	N-SPT	Jenis Tanah	Konsistensi Tanah	γ_{sat} (kN/m ²)	γ_{unsat} (kN/m ²)	Kx,Ky (m/day)	Es (kN/m ²)
Lapisan 1	0 – 4,8	1	Silty Clay	Very Soft	18	14	$8,64 \times 10^{-5}$	2000
Lapisan 2	4,8 – 15,9	2	Silty Clay	Soft	18	14	$8,64 \times 10^{-5}$	2000
Lapisan 3	15,9 – 18	10	Silty Clay	Stiff	18	14	$8,64 \times 10^{-5}$	9300
Lapisan 4	18 – 29,3	12	Silty Clay	Stiff	18	14	$8,64 \times 10^{-3}$	54000
Lapisan 5	29,3 – 37	31	Sand	Dense	18	14	$8,64 \times 10^{-3}$	32500
Lapisan 6	37 – 62	25	Silty Clay	Very Stiff	18	14	$8,64 \times 10^{-5}$	100000
Lapisan 7	62 – 74,9	23	Silty Clay	Very Stiff	18	14	$8,64 \times 10^{-5}$	100000
Lapisan 8	74,9 – 80,4	28	Silty Clay	Very Stiff	19,5	15	$8,64 \times 10^{-3}$	100000

Lapisan Tanah	μ	e	Cc	Cs	Su (kN/m ²)	c' (kN/m ²)	ϕ (°)	ψ (°)	OCR	K ₀
Lapisan 1	0,3	2,5	0,9	0,18	5	1	30	0	1	0,5
Lapisan 2	0,35	2,17	0,77	0,15	10	2	29	0	1,2	0,563
Lapisan 3	0,35	2,17	0,77	0,15	35	7	30	0	2	0,707
Lapisan 4	0,35	1,7	0,58	0,12	50	10	30	0	2,6	0,806
Lapisan 5	0,35	1,7	0,58	0,12	85	17	36	6	3	0,866
Lapisan 6	0,35	1	0,3	0,06	110	22	30	0	3	0,866
Lapisan 7	0,5	1	0,3	0,06	105	21	30	0	3	0,866
Lapisan 8	0,4	1	0,3	0,06	115	23	30	0	3	0,866

Hasil analisis program elemen hingga 2D

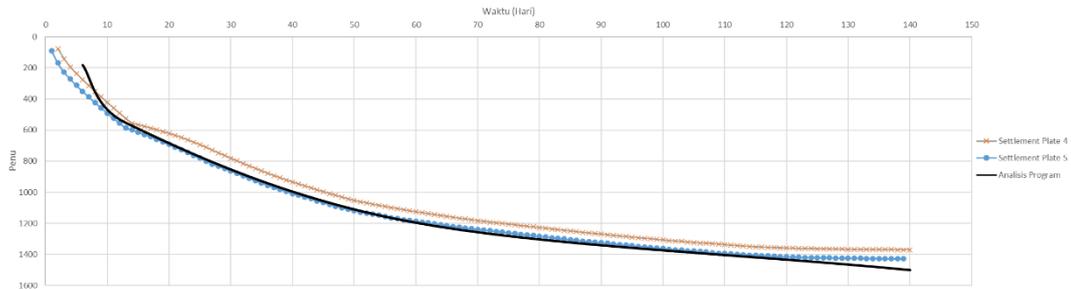
Setelah semua tahapan pemodelan selesai di analisis, maka hasil penurunan dan pergerakan lateral dapat dilakukan verifikasi hasil terhadap parameter yang digunakan. Setelah hasil penurunan sesuai dengan data lapangan, maka parameter tersebut akan digunakan untuk analisis PVD dengan kedalaman 5 m, 10 m, 15m, 20 m, 25 m, dan 30 m untuk menentukan jarak pengaruh lateral.

- Hasil Penurunan dan Pergerakan Lateral Pada Kedalaman 14,5 meter (Sesuai Data Lapangan)

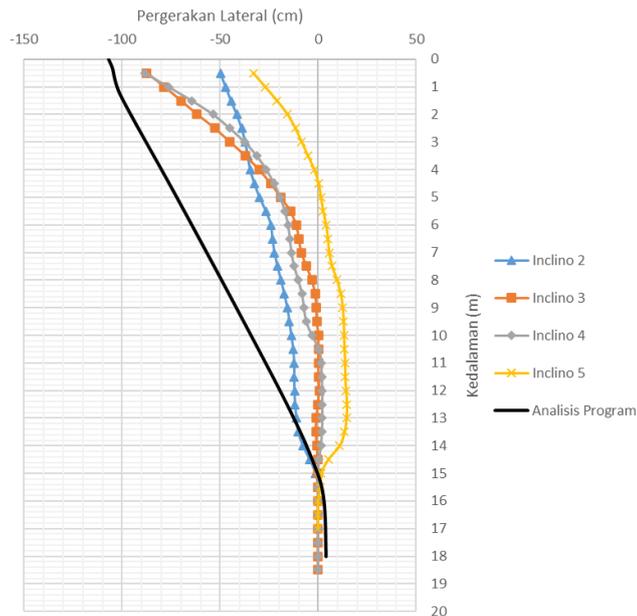
Data hasil analisis PVD dengan kedalaman 14,5 meter sesuai dengan data lapangan digunakan untuk melakukan verifikasi terhadap parameter yang digunakan. Berdasarkan analisis yang dilakukan dengan program elemen hingga terdapat 2 hasil analisis yaitu dengan model material *Mohr-coulomb* dan *Soft soil model*.

o *Mohr-Coulomb*

Berdasarkan analisis dengan model material *Mohr-Coloumb*, nilai penurunan telah menunjukkan hasil yang sesuai dengan hasil *monitoring*, tetapi nilai pergerakan lateral yang dihasilkan dengan model material ini tidak sesuai dengan data *monitoring*. Hasil analisis dapat di lihat pada Gambar 4 dan 5.



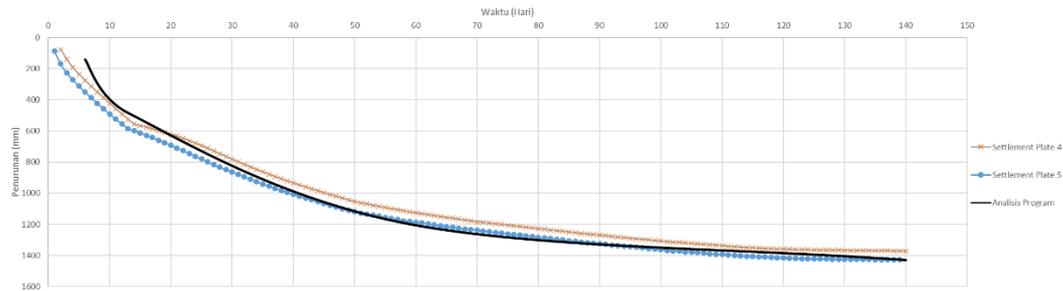
Gambar 4. Kurva perbandingan *settlement* terhadap waktu dengan *mohr-coulomb*



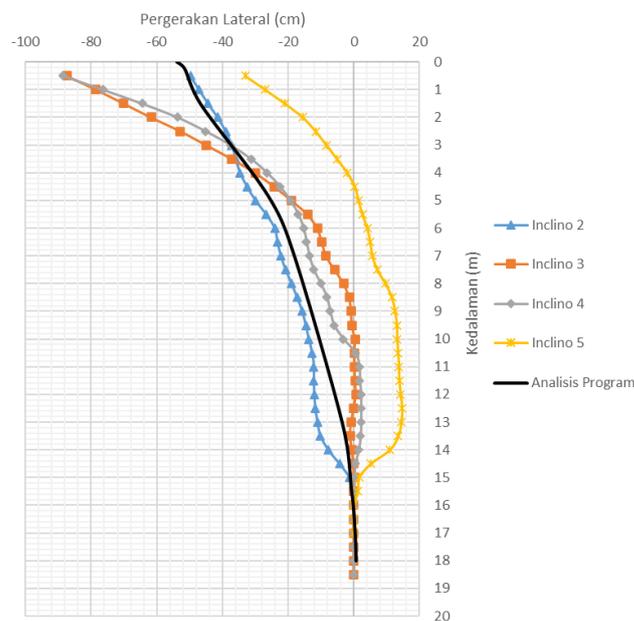
Gambar 5. Grafik perbandingan pergerakan lateral inklinometer dan hasil analisis dengan *mohr-coulomb*

o *Soft Soil Model*

Berdasarkan hasil analisis dengan model material *Soft soil model*, nilai penurunan dan pergerakan lateral telah menunjukkan nilai yang sesuai dengan hasil *monitoring*. Pada hasil analisis dan hasil *monitoring* penurunan dapat dilihat pada Gambar 6 dan hasil pergerakan lateral yang dibandingkan dengan empat buah inklinometer yang dipasang disekitar daerah perbaikan dapat di lihat pada Gambar 7.



Gambar 6. Kurva perbandingan *settlement* terhadap waktu dengan *soft soil model*



Gambar 7. Grafik perbandingan pergerakan lateral inklinometer dan hasil analisis dengan *soft soil model*

Namun, berdasarkan hasil penurunan dan pergerakan lateral, model material *mohr-coulomb* tidak sesuai dengan data monitoring, nilai penurunan yang didapat pada 140 hari perbaikan adalah 1,5 meter, sedangkan pada model material *soft soil* didapat nilai penurunan 1,43 meter. Maka, model yang akan digunakan pada analisis PVD dengan kedalaman 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, dan 30 m adalah *Soft Soil Model*, karena hasil analisis penurunan dan pergerakan lateral cukup sesuai dengan data monitoring. Nilai penurunan tiap fase pada masing-masing model material seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil penurunan dan pergerakan lateral tiap fase

Fase	Data Lapangan (mm)	<i>Soft Soil Model</i> (mm)	<i>Mohr-Coulomb</i> (mm)
1	312	142,5	182,66
2	555	483,9	551,74
3	1134	1200	1190
4	1428	1430	1500

Dan setelah melakukan uji parameter agar mendapatkan nilai penurunan dan pergerakan lateral yang sesuai dengan data hasil monitoring, terdapat beberapa parameter yang di ubah untuk mencapai nilai penurunan yang sesuai seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter hasil verifikasi dengan data lapangan yang digunakan pada pemodelan

Lapisan Tanah	γ_{sat} (kN/m ²)		Kx,Ky (m/day)		Es (kN/m ²)		e		Cc	
	Awal	Akhir	Awal	Akhir	Awal	Akhir	Awal	Akhir	Awal	Akhir
Lapisan 1	18	14	$8,64 \times 10^{-5}$	$5,76 \times 10^{-5}$	2000	500	2,5	1,8	0,9	0,1
Lapisan 2	18	16	$8,64 \times 10^{-5}$	$8,64 \times 10^{-5}$	2000	700	2,17	1,6	0,77	0,09
Lapisan 3	18	16	$1,25 \times 10^{-5}$	$1,25 \times 10^{-5}$	9300	3720	2,17	1,5	0,77	0,06
Lapisan 4	18	16	$8,64 \times 10^{-3}$	$8,64 \times 10^{-3}$	54000	13500	1,7	1,1	0,58	0,04

Lapisan Tanah	Cs		OCR		K ₀	
	Awal	Akhir	Awal	Akhir	Awal	Akhir
Lapisan 1	0,18	14	$8,64 \times 10^{-5}$	$5,76 \times 10^{-5}$	2000	500
Lapisan 2	0,15	16	$8,64 \times 10^{-5}$	$8,64 \times 10^{-5}$	2000	700
Lapisan 3	0,15	16	$1,25 \times 10^{-5}$	$1,25 \times 10^{-5}$	9300	3720
Lapisan 4	18	16	$8,64 \times 10^{-3}$	$8,64 \times 10^{-3}$	54000	13500

Setelah mendapatkan hasil penurunan yang sesuai dengan data monitoring, di dapat resume parameter yang digunakan pada analisis lanjutan dengan kedalaman PVD 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, dan 30 m seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Resume parameter hasil verifikasi dengan data lapangan yang digunakan pada analisis lanjutan

Lapisan Tanah	Kedalaman (m)	N-SPT	Jenis Tanah	Konsistensi Tanah	γ_{sat} (kN/m ²)	γ_{unsat} (kN/m ²)	Kx,Ky (m/day)	Es (kN/m ²)
Lapisan 1	0 – 4,8	1	<i>Silty Clay</i>	<i>Very Soft</i>	14	14	$5,76 \times 10^{-5}$	500
Lapisan 2	4,8 – 15,9	2	<i>Silty Clay</i>	<i>Soft</i>	16	14	$8,64 \times 10^{-5}$	700
Lapisan 3	15,9 – 18	10	<i>Silty Clay</i>	<i>Stiff</i>	16	14	$1,25 \times 10^{-5}$	3720
Lapisan 4	18 – 29,3	12	<i>Silty Clay</i>	<i>Stiff</i>	16	14	$8,64 \times 10^{-3}$	13500

Lapisan Tanah	μ	e	Cc	Cs	Su (kN/m ²)	c' (kN/m ²)	ϕ (°)	ψ (°)	OCR	K ₀
Lapisan 1	0,3	1,8	0,52	0,1	5	1	30	0	1,38	0,587
Lapisan 2	0,35	1,6	0,42	0,09	10	2	29	0	1,6	0,647
Lapisan 3	0,35	1,5	0,3	0,06	35	7	30	0	2	0,707
Lapisan 4	0,35	1,1	0,2	0,04	50	10	30	0	2,6	0,806

- Hasil Penurunan dan Pergerakan Lateral Pada Kedalaman 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, dan 30 m

Pada hasil analisis PVD dengan kedalaman 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, dan 30 m didapat hasil penurunan maksimum dan pergerakan lateral maksimum pada jarak 2,5 meter dari batas perbaikan seperti pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil penurunan dan pergerakan lateral maksimum

Kedalaman (m)	Hasil Penurunan* (cm)	Hasil Pergerakan Lateral** (cm)
5	102	27,07
10	140	62,05
15	164	88,01
20	187	89,7
25	190	117,51
30	204	122,37

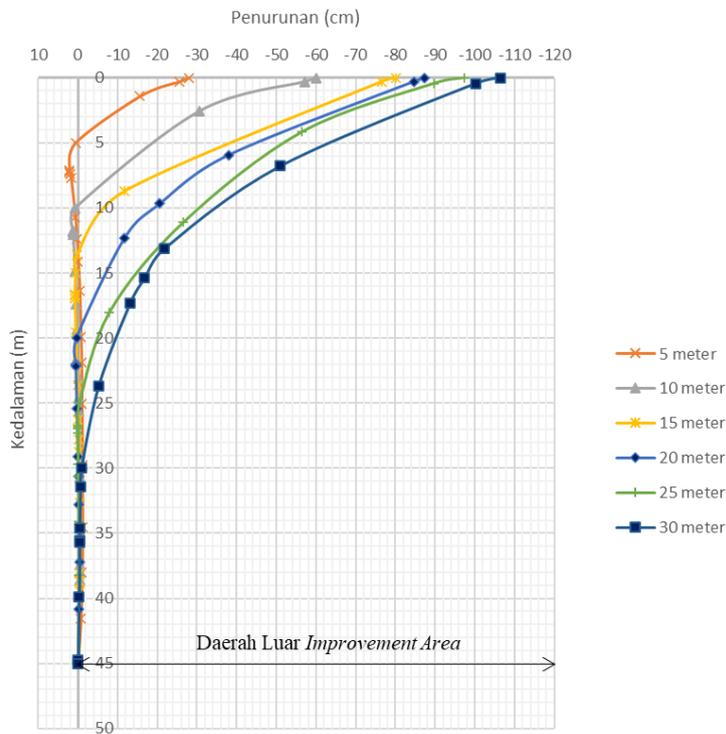
catatan: *nilai penurunan maksimum pada daerah tengah area perbaikan;

**nilai pergerakan lateral maksimum pada jarak 2,5 meter dari batas perbaikan

Nilai penurunan maksimum terdapat pada gambar potongan horizontal dan potongan vertikal dengan nilai tiap kedalaman dapat dilihat pada Gambar 8 dan Gambar 9.

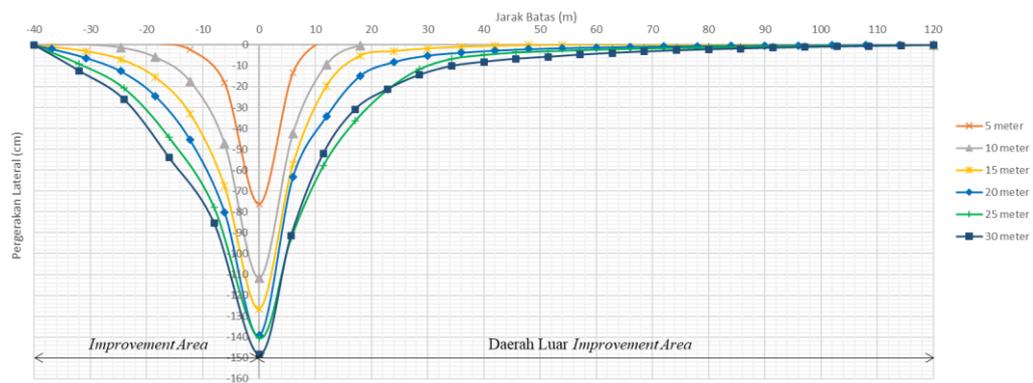


Gambar 8. Potongan horizontal *settlement* pada muka tanah setiap kedalaman PVD

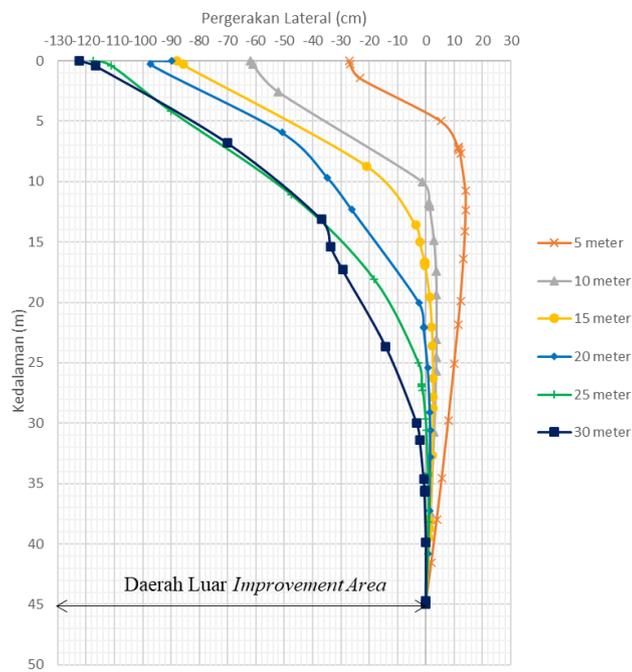


Gambar 9. Potongan vertikal *settlement* setiap kedalaman PVD

Hasil analisis pergeseran lateral terdapat 2 potongan, arah vertikal dan arah horizontal dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11.

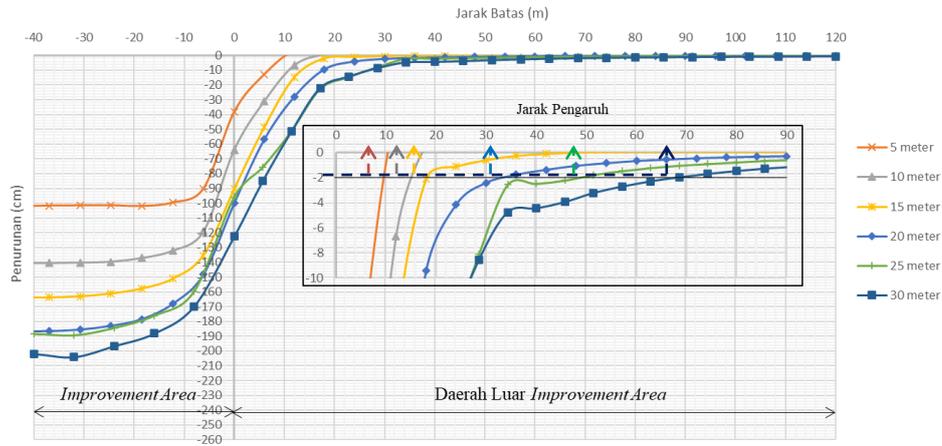


Gambar 10. Potongan horizontal pergerakan lateral tanah pada setiap kedalaman PVD

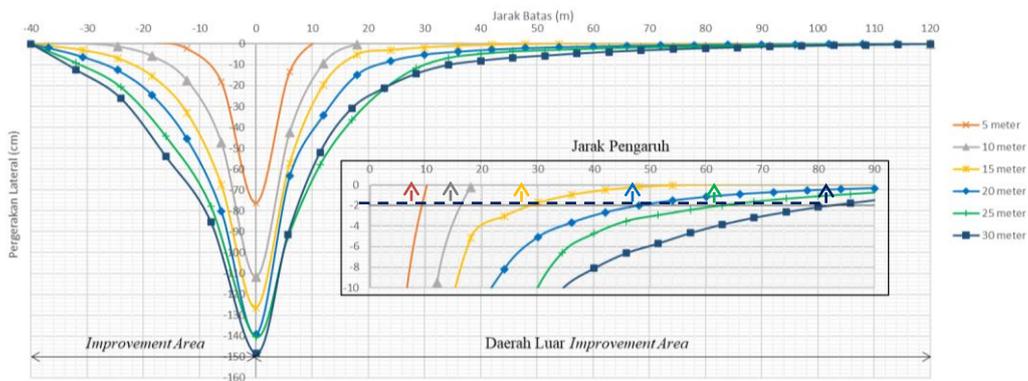


Gambar 11. Potongan vertikal pergerakan lateral tanah pada setiap kedalaman PVD

Berdasarkan hasil analisis pada PVD dengan kedalaman 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, dan 30 m, maka di dapat jarak pengaruh penurunan hingga kurang dari 2 cm dan pergerakan lateral hingga kurang dari 2 cm di luar batas lahan perbaikan dapat dilihat pada Gambar 12 dan Gambar 13, dan Hasil analisis dapat di lihat pada Tabel 7.



Gambar 12. Analisis jarak pengaruh akibat penurunan



Gambar 13. Analisis jarak pengaruh akibat pergerakan lateral

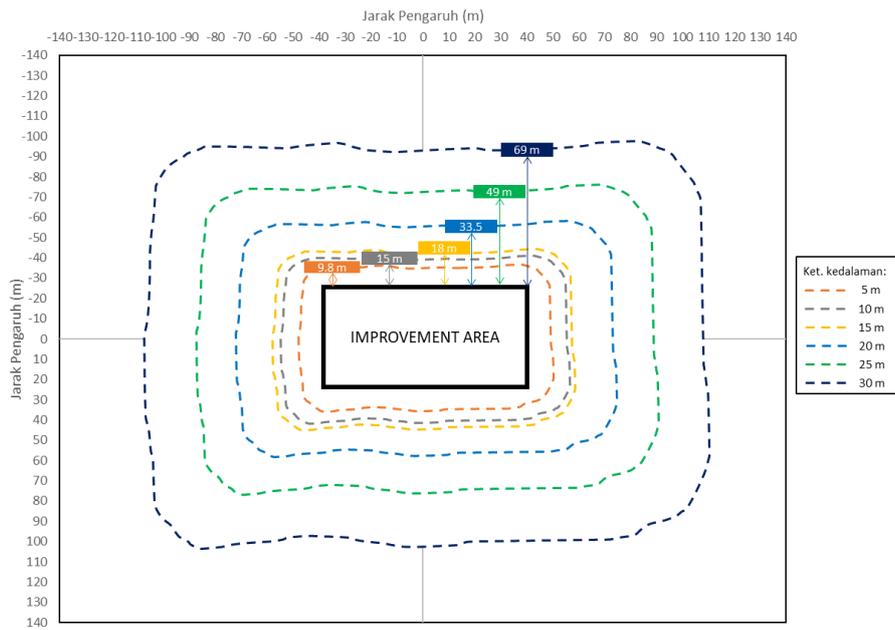
Tabel 7. Hasil analisis jarak pengaruh penurunan dan pergerakan lateral di luar daerah perbaikan

Kedalaman PVD (m)	Jarak Pengaruh	
	Penurunan*	Pergerakan Lateral**
5	9,8 m	9,5 m
10	15 m	16 m
15	18 m	28 m
20	33,5 m	49,5 m
25	49 m	63 m
30	69 m	83 m

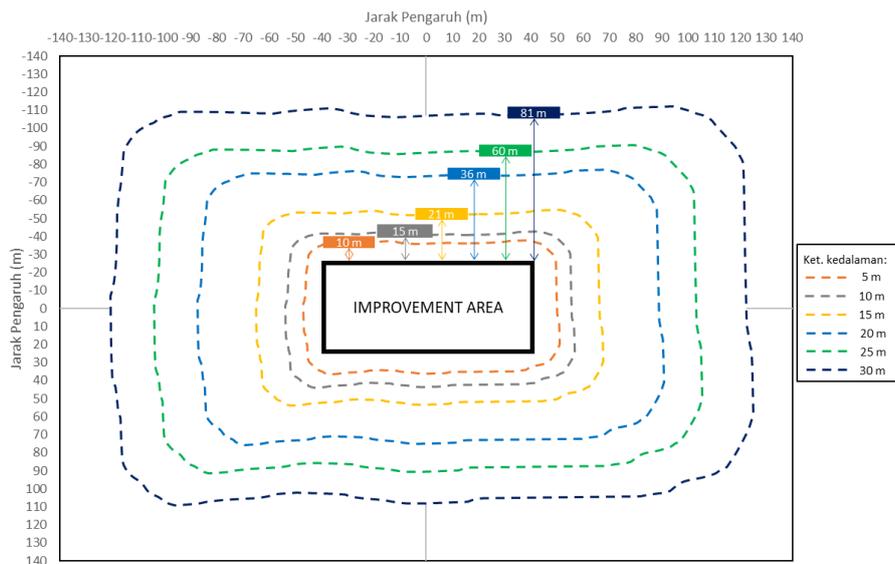
catatan: *jarak pengaruh dihitung dari batas perbaikan hingga penurunan < 2 cm

**jarak pengaruh dihitung dari batas perbaikan hingga pergerakan lateral < 2cm

Berdasarkan hasil analisis tersebut, dapat dilihat sketsa tampak atas jarak pengaruh akibat penurunan dan pergerakan lateral seperti pada Gambar 14 dan 15.



Gambar 14. Sketsa jarak pengaruh akibat penurunan



Gambar 15. Sketsa jarak pengaruh akibat pergerakan lateral

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan program elemen hingga 2D, maka dapat di tarik kesimpulan yang bisa dilihat pada Tabel 7 di atas dan direkap di bawah yaitu:

1. Jarak pengaruh penurunan yang di ukur hingga penurunan yang terjadi kurang dari 2 cm akibat vacuum pre-loading terhadap area di luar batas lahan perbaikan dengan kedalaman PVD 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, dan 30 m adalah:

Kedalaman PVD (m)	Jarak Pengaruh akibat Penurunan (m)
5	9,8 m
10	15 m
15	18 m
20	33,5 m
25	49 m
30	69 m

2. Jarak pengaruh pergerakan lateral yang di ukur hingga nilai pergerakan lateral yang terjadi kurang dari 2 cm akibat *vacuum pre-loading* terhadap area di luar batas lahan perbaikan dengan kedalaman PVD 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, dan 30 m adalah:

Kedalaman PVD (m)	Jarak Pengaruh akibat Pergerakan Lateral (m)
5	9,5 m
10	16 m
15	28 m
20	49,5 m
25	63 m
30	83 m

Saran

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, Adapun saran untuk melengkapi studi ini adalah:

1. Pada saat melakukan *meshing* dapat di buat dengan lebih detail lagi agar hasil yang didapatkan lebih akurat.
2. Studi lebih lanjut diperlukan untuk memodelkan proses *unloading* pada *vacuum pre-loading*, sehingga pemodelan dapat dilanjutkan untuk tahap konstruksi selanjutnya.
3. Studi dapat dikembangkan untuk memperoleh metode-metode penanganan agar pengaruh deformasi lateral akibat *vacuum pre-loading* dapat dikurangi atau dihilangkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. *Persyaratan Perancangan Geoteknik*. BSN, 2017.
- Bergado, D.T., et al. *Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environment*. 1996.
- Chai, J.C., J.P. Carter dan S. Hayashi. "Ground Deformation induced by Vacuum Consolidation." *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* (2005).
- Chu, J. dan S. W. Yan. "Estimation of Degree of Consolidation for Vacuum Preloading Projects." *International Journal of Geomechanics* (2005).
- Das, Braja M. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik)*. 1988.
- Gunawan, Tomy, Alfred Jonathan S. dan Ali Iskandar. "Analisis Penurunan Pada Timbunan Dengan Prefabricated Vertical Drain (PVD) Menggunakan Data Hasil Uji CPTu." *Jurnal Mitra Teknik Sipil* (2020): 69-80.
- Holtz, R.D. "Prefabricated Vertical Drains: Design and Performance." *CTRIA ground engineering report: Ground improvement* (1991).
- Indraratna, Buddhima, Rujikiatkamjorn dan R. Kelly. "Modelling of Combined Vacuum and Surcharge Preloading with Vertical Drains." (2009).
- Masse, F., et al. "Vacuum consolidation: A review of 12 years of successful development." *ASCE* (2001).
- Ou, Chang-Yu. *Deep Excavation Theory and Practice*. London: Taylor & Francis Group, 2006.