

PERBANDINGAN PERILAKU PERBAIKAN TANAH METODE PRELOADING VAKUM DAN PRELOADING TIMBUNAN DENGAN ELEMEN HINGGA 2D

Zakwan Gusnadi¹⁾, Paulus P. Rahardjo²⁾, Aswin Lim³⁾

¹⁾Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung

^{2), 3)}Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan,
Bandung

email: zakwangusnadi@gmail.com¹⁾, rahardjo.paulus@gmail.com²⁾,
aswinlim@unpar.ac.id³⁾

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v11i2.513>

(Received: April 2021 / Revised: July 2021 / Accepted: August 2021)

Abstrak

Perbaikan tanah lunak dengan pra-beban (*preloading*) dimaksudkan untuk mereduksi penurunan pada masa operasional dan meningkatkan kekuatan tanah. *Preloading* dalam perbaikan tanah lunak biasanya dikombinasikan dengan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) guna mempercepat proses disipasi air pori. Metode *preloading* dapat dilakukan dengan cara konvensional menggunakan timbunan ataupun dengan tekanan vakum. Untuk mengetahui perilaku *preloading* dengan tekanan vakum ini digunakan metode elemen hingga 2D menggunakan program bantu ABAQUS (berasal dari nama alat hitung Abacus). Hasil analisis menunjukkan pada hari ke 217 perbaikan *preloading* vakum menghasilkan penurunan sebesar 1,23 m dan *preloading* timbunan menghasilkan penurunan sebesar 1,18 m, namun pola penurunan yang terjadi dengan *preloading* vakum terlihat lebih besar pada 35 hari pertama perbaikan. Pada perubahan tekanan air pori *preloading* vakum menunjukkan reduksi tekanan air pori, sedangkan dengan *preloading* timbunan tekanan air pori meningkat pada masa konstruksi dan tereduksi pada masa perbaikan. Lebih lanjut pada perilaku deformasi lateral di kaki timbunan, metode *preloading* vakum menunjukkan pergerakan lateral ke arah dalam area perbaikan sedangkan dengan *preloading* konvensional pergerakan lateral tanah terjadi ke arah luar area perbaikan.

Kata kunci: ABAQUS, Elemen Hingga 2D, Perbaikan Tanah, Vakum Preloading

Abstract

Improvement of soft soil by preloading is intended to lower the settlement of operation time and increasing soil strength. Preloading in the improvement of soft soil usually combined with Prefabricated Vertical Drain (PVD) to accelerate the pore water dissipation process. The preloading method can be done in a conventional way using the embankment or vacuum pressure. To find out the behaviour of preloading with this vacuum pressure, we used the finite element method 2D by using the ABAQUS support program. The result of the analysis shows on the 217th day, vacuum preloading improvement produces a settlement by 1.23 m and the embankment preloading produce 1.18 m, but the settlement pattern that occurs with preloading vacuum was seen to be greater in the first 35 days of improvement. In terms of changes in pore water pressure on vacuum preloading shows that the pattern of pore water pressure is reduced, while with pore water pressure on preloading heap increased during construction and reduced during improvement. Further on the lateral movement behaviour in the toe of the embankment, the vacuum preloading method shows the lateral movement towards the

improvement area while embankment preloading shows the lateral movement occurs towards the outside of the improvement area.

Keywords: *ABAQUS, Finite Element 2D, Soil Improvement, Vacuum Preloading*

1. Latar Belakang

Metode *preloading* vakum yang memanfaatkan tekanan atmosfer sebagai pra-beban pertama kali diusulkan oleh W. Kjellman pada tahun 1952 (Shi and Kong, 2016). Secara teori maksimal tekanan vakum yang dapat dihasilkan adalah sebesar 100 kPa, namun pada aplikasinya di lapangan tekanan yang dapat dihasilkan hanya sekitar 40–90 kPa (Wijaya and Rahardjo, 2019). Beberapa kelebihan menggunakan *preloading* vakum diantaranya tidak memerlukan material timbunan, masa perbaikan yang relatif lebih cepat, dan tanah dasar lebih stabil pada masa perbaikan, walaupun kedua metode *preloading* ini dimaksudkan untuk mereduksi penurunan pada masa operasional dan meningkatkan kekuatan tanah dasar namun perilaku dari kedua metode ini sangatlah berbeda. *Preloading* dengan tekanan vakum mengakibatkan kondisi tekanan air pori negatif selama masa perbaikan sehingga meningkatkan tegangan efektif tanah dasar dan menjadi lebih stabil dibanding pra-beban menggunakan material timbunan (Ding *et al.*, 2019).

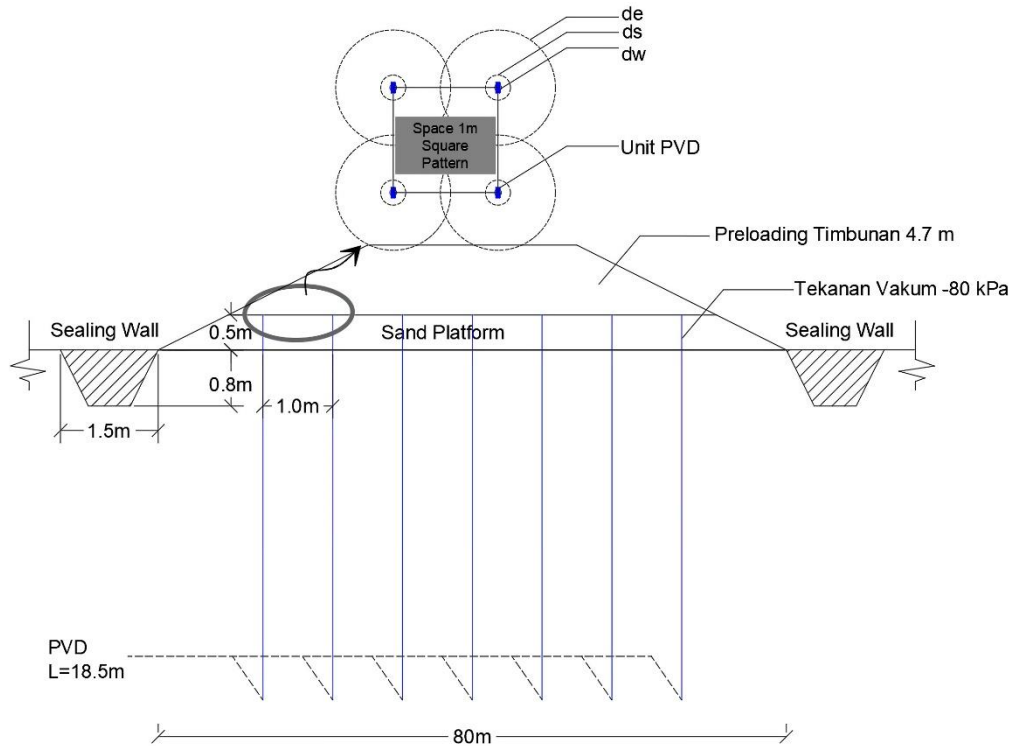
Mekanisme proses konsolidasi kedua metode *preloading* ini secara teoritis dijelaskan oleh (Chu and Yan, 2005). Pada *preloading* timbunan saat beban timbunan diaplikasikan beban dipikul oleh air dan menyebabkan tegangan air pori eksese. Besar tegangan air pori eksese yang terjadi sama dengan beban yang diberikan, kemudian air pori secara perlahan terdisipasi dan beban yang sebelumnya dipikul oleh air menjadi sepenuhnya dipikul oleh pegas (memodelkan material tanah). Penambahan tegangan efektif tanah yang terjadi sama dengan tegangan air pori yang terdisipasi sampai pada masa konsolidasi berakhir penambahan tegangan efektif tanah adalah sebesar beban yang diaplikasikan, sedangkan pada *preloading* vakum ketika beban vakum diaplikasikan tegangan air pori berkurang dan tegangan total adalah tetap sehingga tegangan efektif tanah meningkat. Besar kenaikan tegangan efektif adalah sama dengan jumlah pengurangan tegangan air pori dan tidak akan melebihi tegangan atmosfer.

Penelitian ini membahas mengenai perbandingan perilaku perbaikan tanah metode *preloading* vakum dan *preloading* timbunan pada lahan seluas $\pm 34.320 \text{ m}^2$ dengan lebar area perbaikan 80 m. Lahan yang diperbaiki ini akan digunakan sebagai lokasi pembangunan gedung apartemen. Hasil analisis kedua metode *preloading* ini dikomparasi untuk melihat perbedaannya. Perilaku yang ditinjau adalah penurunan, perubahan tekanan air pori, dan deformasi lateral.

2. Metode Penelitian

2.1 Deskripsi Studi

Sebelum lahan dilakukan perbaikan terlebih dahulu dilakukan penyelidikan tanah berupa pemboran dalam dan pengujian laboratorium untuk melihat karakteristik tanah dasar pada lokasi perbaikan. Untuk mereduksi penurunan dan meningkatkan kekuatan tanah dasar dilakukan perbaikan dengan metode *preloading* di mana pada masa perbaikan dapat mereduksi void tanah, mereduksi kompresibilitas tanah, dan meningkatkan kuat geser tanah dasar dengan proses konsolidasi dilakukan hingga derajat konsolidasi tertentu (Mesri and Khan, 2012).



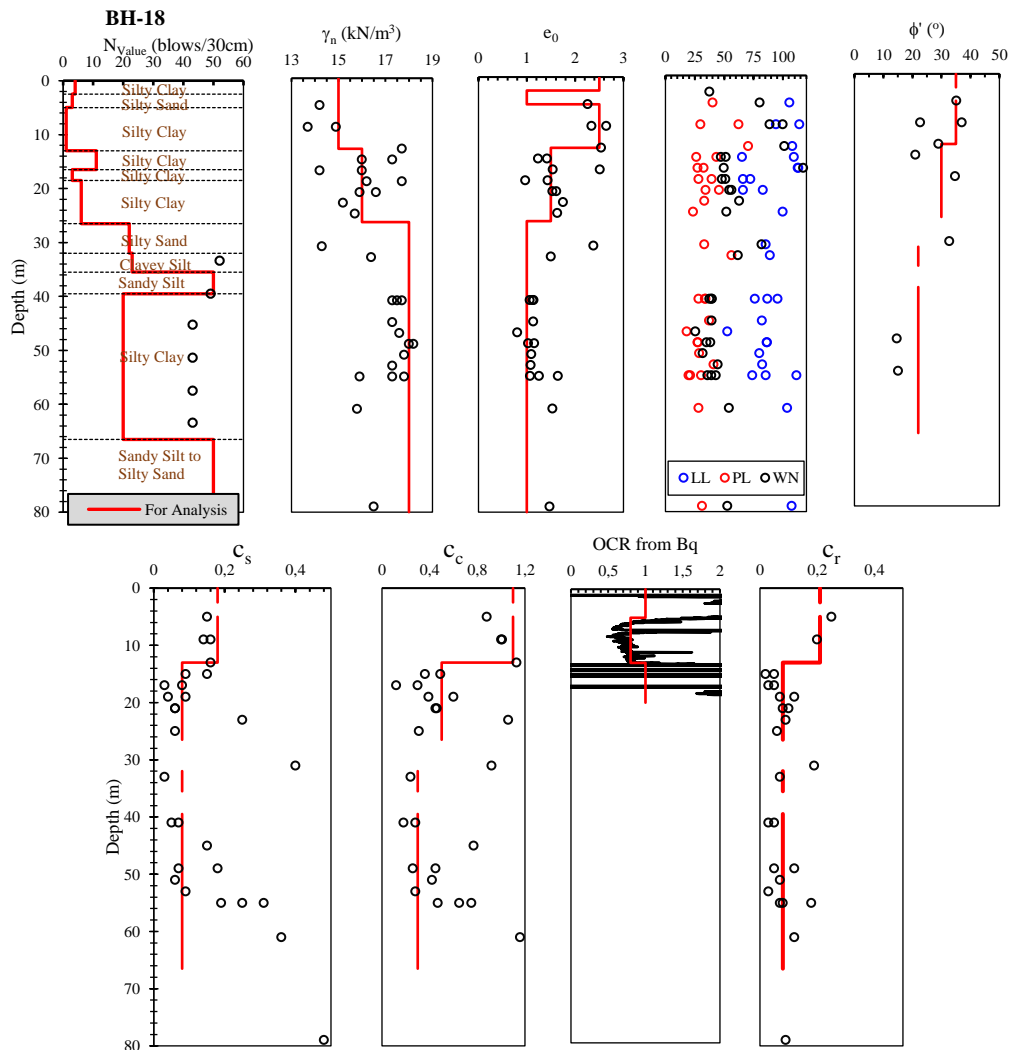
Gambar 1 Tipikal penampang melintang area perbaikan

Gambar 1 menunjukkan penampang melintang area perbaikan yang ditinjau. *Preloading* dilakukan dengan dua alternatif yaitu timbunan dan tekanan vakum di mana *preloading* sendiri dikombinasikan dengan *prefabricated vertical drain* (PVD) untuk mempercepat proses disipasi air pori selama masa perbaikan. PVD yang digunakan sepanjang 18,5 m, spasi 1 m, dan pola pemasangan persegi.

Preloading timbunan dilakukan setelah proses instalasi PVD pada *platform* pasir dengan kecepatan penimbunan 1 m selama tujuh hari, sedangkan pada *preloading* vakum tekanan vakum dari pompa disalurkan melalui horizontal drain yang terhubung langsung dengan PVD sehingga tekanan vakum dapat terdistribusi sepanjang kedalaman PVD. Selain itu sistem vakum pada elevasi *platform* diselubungi dengan *geotextille non woven* untuk mencegah terjadinya kebocoran sebaran tekanan vakum pada area perbaikan.

2.2 Kondisi Tanah Dasar

Kondisi tanah dasar area perbaikan ditunjukkan pada Gambar 2 di mana secara keseluruhan tanah dasar didominasi oleh jenis tanah *silty clay*. Pada kedalaman 0-26 m merupakan lapisan tanah *silty clay* dengan konsistensi *soft to very soft*. Kemudian kedalaman 26-80 m didominasi oleh *silty clay* dengan konsistensi *stiff to hard*. Terdapat sisipan pasir pada kedalaman 2,5-4 m, 26-40 m, dan 70-80 m. Besaran angka pori pada lapisan 0-13 m mencapai 2,5 dengan batas plastis rata-rata tanah dasar 40 dan nilai indeks kompresi berkisar antara 0,1-1,18.



Gambar 2 Kondisi tanah dasar area perbaikan

2.3 Model Elemen Hingga 2D dengan ABAQUS

Model elemen hingga yang dianalisis yaitu dengan *preloading* vakum dan *preloading* timbunan. Pemodelan dilakukan dalam kondisi *plane strain* dengan cara mengkonversi permeabilitas untuk mengekivalensi kondisi aliran *axisymmetric* ke kondisi aliran *plane strain*. Konversi aliran ke dalam kondisi *plane strain* dengan persamaan (1) (Indraratna *et al.*, 2012).

$$\frac{k_{hp}}{k_h} = \frac{\frac{2}{3}(n-1)^2}{n^2 \left[\ln(n) - \frac{3}{4} \right]} \quad (1)$$

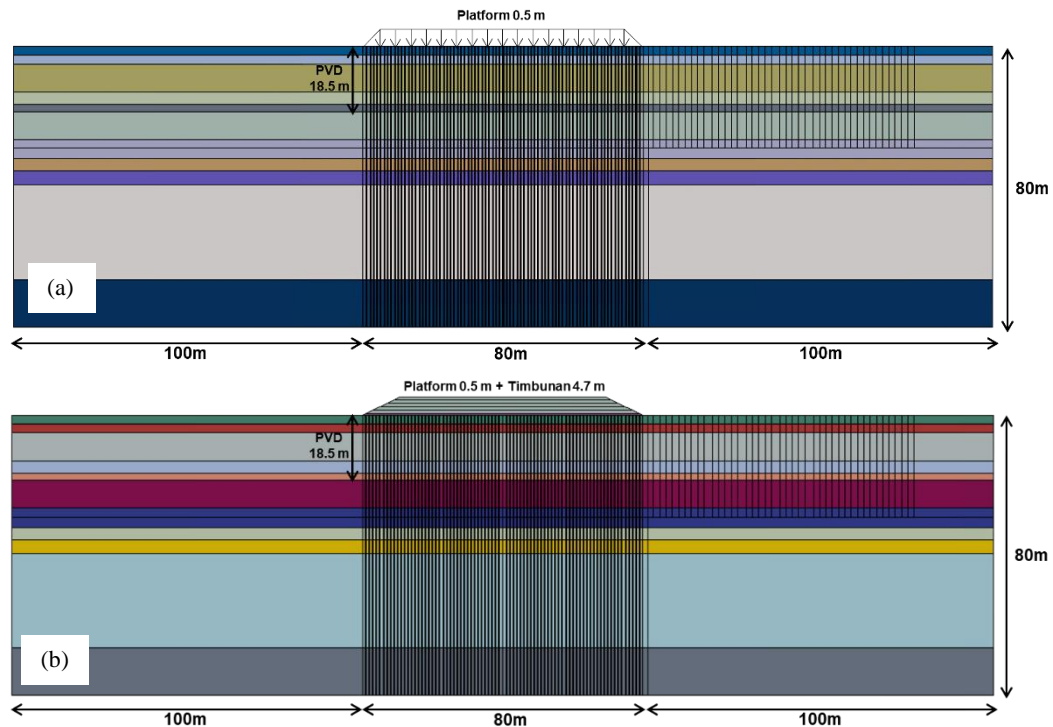
di mana k_{hp} adalah permeabilitas horizontal *plane strain* dan k_h adalah permeabilitas horizontal *axisymmetric*.

$$\frac{k_{sp}}{k_{hp}} = \frac{\beta}{\frac{k_{hp}}{k_h} \left[\ln\left(\frac{n}{s}\right) + \frac{k_h}{k_s} \ln(s) - \frac{3}{4} \right] - \alpha} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2(s-1)}{n^2(n-1)} \left[n(n-s-1) + \frac{1}{3}(s^2+s+1) \right] \tag{3}$$

$$\alpha = \frac{2}{3} \frac{(n-s)^2}{n^2(n-1)} \tag{4}$$

di mana k_{sp} adalah permeabilitas area smear kondisi *plane strain*, s adalah rasio diameter ekivalen smear (d_s) dan diameter ekivalen unit PVD (d_w), dan n adalah rasio diameter ekivalen pengaruh PVD (d_e) dan diameter ekivalen unit PVD (d_w).



Gambar 3 Geometri model: (a) *preloading* vakum dan (b) *preloading* timbunan

Gambar 3 menunjukkan geometri pemodelan yang dilakukan dalam analisis, sisi kiri dan kanan Geometri diberi suatu *boundary displacement* pada sumbu horizontal 0 ($U_x = 0$) dan pada sisi bawah diberi *boundary displacement* pada sumbu horizontal dan vertikal 0 ($U_x = U_y = 0$). (Geng, Indraratna and Rujikiatkamjorn, 2012) menjelaskan bahwa pada sistem preloading vakum distribusi tekanan vakum sepanjang kedalaman PVD adalah konstan. PVD dimodelkan sebagai garis sepanjang 18,5 m dan diberi boundary pore pressure 0 kPa untuk *preloading* timbunan dan sebesar -80 kPa untuk *preloading* vakum (Apriadi, Barnessa and Marsa, 2019). Beban timbunan dimodelkan sebagai *cluster* tanah setinggi 4,7 m. Tabel 1 menyajikan input parameter tanah untuk analisa. Model konstitutif tanah yang digunakan adalah model Modified Cam-Clay. Dalam menentukan parameter analisis digunakan beberapa persamaan (Helwany, 2007).

$$M = \frac{6 \cdot \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \tag{5}$$

$$\lambda = \frac{c_c}{2.3} \quad (6)$$

$$\kappa = \frac{c_s}{2.3} \quad (7)$$

di mana ϕ' adalah sudut geser dalam efektif, c_c adalah indeks kompresi, dan c_s adalah indeks *swelling* tanah.

Selanjutnya nilai OCR tanah ditinjau berdasarkan hasil uji CPTu yang diinterpretasi dengan persamaan (Rahardjo, Anggoro and Wirawan, 2016).

$$\text{OCR} = \frac{1}{1.2B_q + 0.1} \quad (8)$$

di mana B_q adalah pore pressure ratio dari uji CPTu. Angka *poisson's* diambil sebesar 0,35 untuk tanah lempungan dan 0,30 untuk tanah pasir, kemudian permeabilitas horizontal tanah dasar diambil berdasarkan uji disipasi lapangan sebesar 0,000145 untuk tanah lempungan dan 0,00104 untuk tanah pasir.

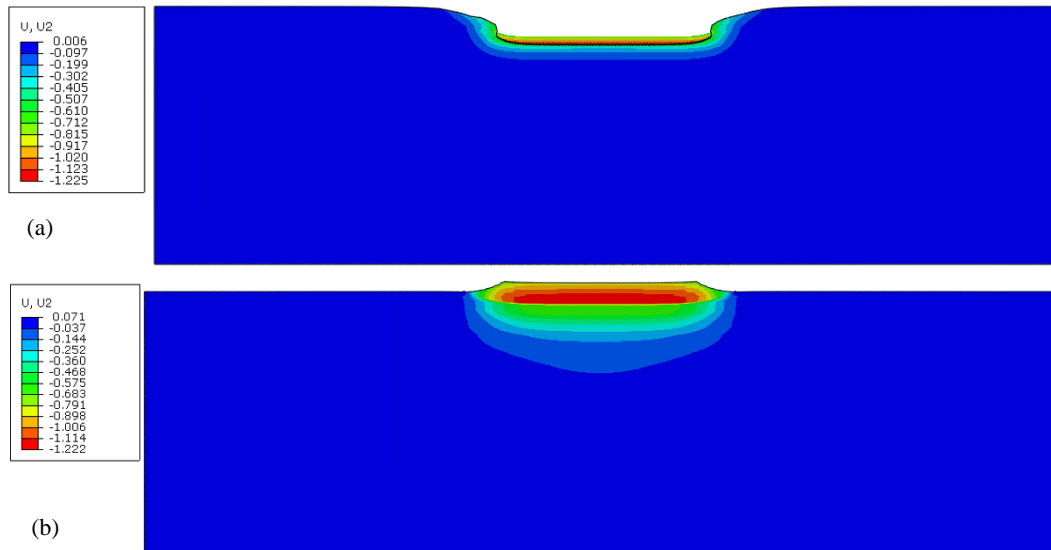
Tabel 1 Parameter tanah analisis

Jenis Tanah	Kedalaman (m)			γ_n (kN/m ³)	M	e_0	ν	λ	κ	OCR	k_h (m/day)
Silty Clay	0	-	2,5	15	1,42	2,5	0,35	0,48	0,08	1	1,45E-04
Silty Sand	2,5	-	5	15	-	1	0,3	-	-	-	1,04E-03
Silty Clay	5	-	13	15	1,42	2,5	0,35	0,48	0,08	0,80	1,45E-04
Silty Clay	13	-	16,5	16	1,20	1,5	0,35	0,22	0,03	1	1,45E-04
Silty Clay	16,5	-	18,5	16	1,20	1,5	0,35	0,22	0,03	1	1,45E-04
Silty Clay	18,5	-	26,5	16	1,20	1,5	0,35	0,22	0,03	1	1,45E-04
Silty Sand	26,5	-	32	18	-	1	0,3	-	-	-	1,45E-03
Clayey Silt	32	-	35,5	18	0,86	1	0,35	0,13	0,03	1	1,45E-04
Clayey Sand	35,5	-	39,5	18	-	1	0,3	-	-	-	1,45E-03
Silty Clay	39,5	-	66,5	18	0,86	1	0,35	0,13	0,03	1	1,45E-04
Sandy Silt	66,5	-	80	18	-	1	0,3	-	-	-	1,45E-03

3. Hasil dan Pembahasan

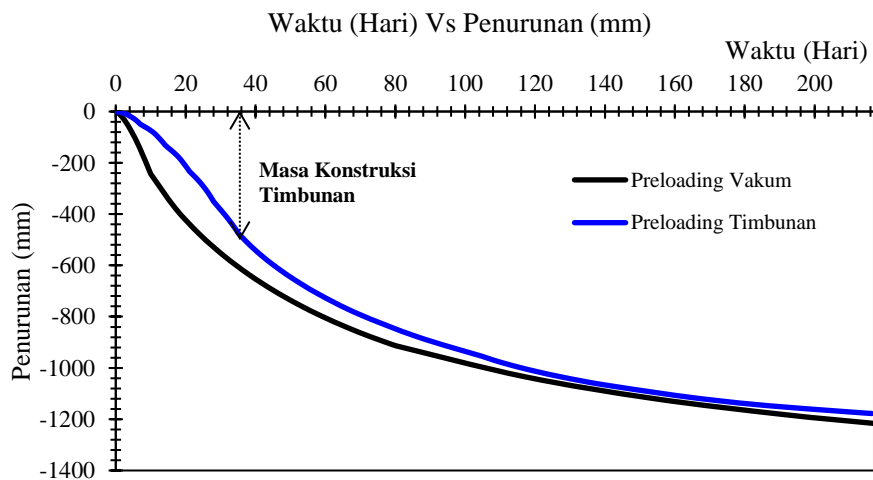
3.1 Penurunan

Perilaku penurunan tanah dasar sangat tergantung dari karakteristik tanahnya. Karakteristik tanah dasar setiap lokasi yang berbeda atau bahkan dalam lokasi sama namun pada titik uji yang berbeda akan memiliki karakteristik yang berbeda. Selain itu penurunan tanah dasar juga sangat tergantung dengan cara pembebanan yang dilakukan. Untuk melihat perbedaan perilaku penurunan pada tanah dasar dapat dilakukan dengan cara megkomparasi hasil analisis penurunan pada kedua metode *preloading* yang dilakukan.



Gambar 4 Kontur penurunan: (a) *preloading* vakum dan (b) *preloading* timbunan

Gambar 4 menunjukkan kontur penurunan yang terjadi pada kedua metode *preloading* yang dilakukan dimana besar penurunan pada metode perbaikan *preloading* vakum dan *preloading* timbunan tidak jauh berbeda.



Gambar 5 Grafik penurunan *preloading* vakum dan *preloading* timbunan

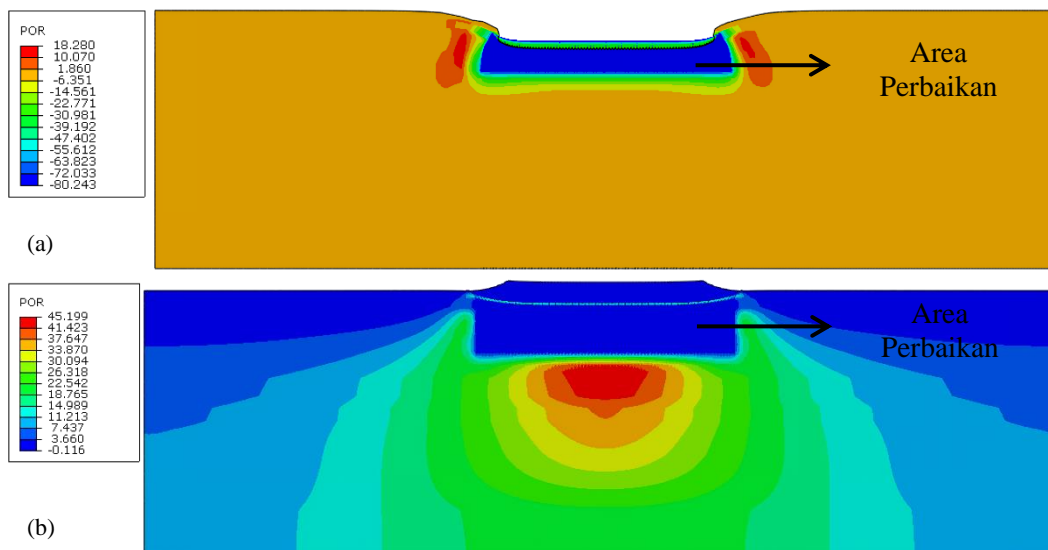
Kemudian jika dilihat pada grafik penurunan yang ditunjukkan Gambar 5 pada 35 hari pertama masa konstruksi penurunan dengan metode *preloading* timbunan menghasilkan penurunan yang lebih kecil dibanding penurunan metode *preloading* vakum.

Besar penurunan pada *preloading* timbunan 1,18 m dan *preloading* vakum 1,23 m dihitung dari timbunan pertama dan tekanan vakum diaplikasikan. Perbedaan besar penurunan ini terjadi akibat proses disipasi air pori *preloading* timbunan yang lebih lambat dibanding disipasi pada *preloading* vakum. Hal ini mengindikasikan bahwa derajat konsolidasi metode *preloading* timbunan lebih

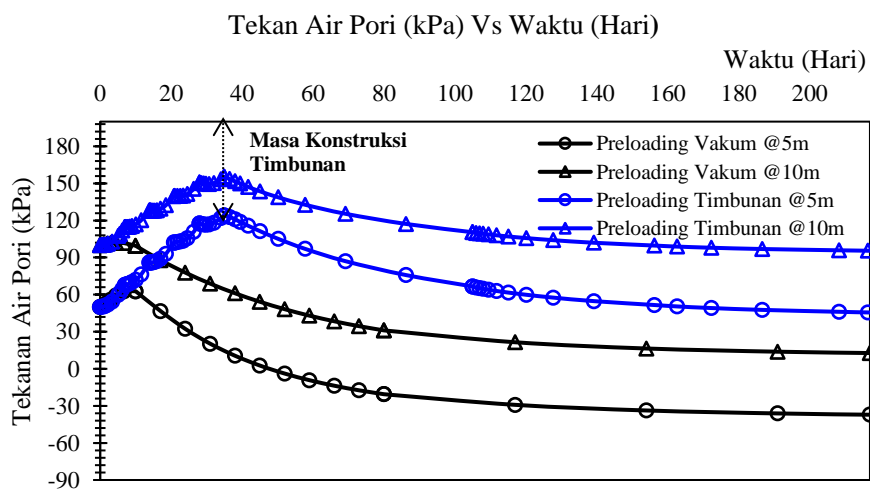
kecil dibanding metode *preloading* vakum dalam waktu yang sama. (Saowapakpiboon *et al.*, 2010) mengungkapkan bahwa *preloading* dengan vakum mempercepat waktu mencapai derajat konsolidasi 90% hingga 1-3 kali.

3.2 Perubahan Tekanan Air Pori

Perubahan tekanan air pori menunjukkan proses disipasi tekanan air pori selama proses perbaikan dilakukan. Proses disipasi tekanan air pori ini dipengaruhi beberapa faktor diantaranya permeabilitas tanah dan tipe pembebanan yang dilakukan. Untuk melihat perilaku perubahan tekanan air pori dari kedua metode *preloading* dapat dilakukan dengan meninjau perubahan tekanan air pori dikedalaman tertentu pada model yang dianalisis.



Gambar 6 Kontur tekanan air pori ekses: (a) *preloading* vakum dan (b) *preloading* timbunan

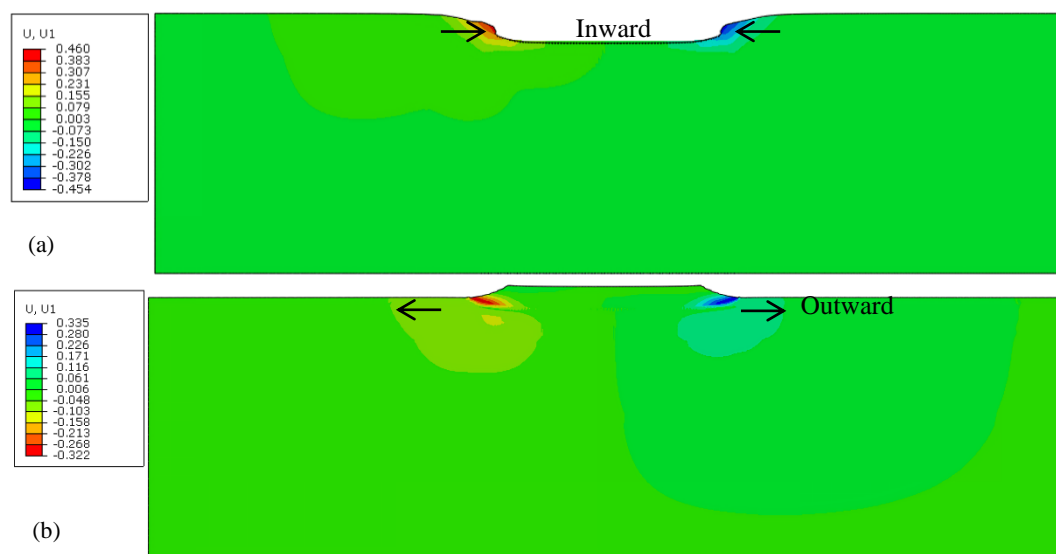


Gambar 7 Grafik perubahan tekanan air pori metode *preloading* vakum dan *preloading* timbunan

Gambar 6 menunjukkan kontur perubahan tekanan air pori eksek yang terjadi pada kedua metode *preloading* yang dilakukan di mana besar tekanan air pori eksek pada akhir masa perbaikan metode *preloading* timbunan mendekati 0 (menuju kondisi hidrostatik) sedangkan pada *preloading* vakum tekanan air pori sebesar -80 kPa (sesuai tekanan vakum yang diaplikasikan). Kemudian jika dilihat pada grafik perubahan tekanan air pori yang ditunjukkan Gambar 7 pada dua kedalaman yang ditinjau (5 m dan 10 m) 35 hari pertama masa konstruksi tekanan air pori metode *preloading* timbunan masih meningkat akibat pembebanan sebesar 70 kPa, artinya bahwa pada masa konstruksi ini tekanan air pori yang terdisipasi baru 10 kPa. sedangkan dengan metode *preloading* vakum tekanan air pori berkurang sebesar -50 kPa. hal ini membuktikan bahwa pada masa konstruksi disipasi air pori pada metode *preloading* timbunan lebih lambat dibanding *preloading* vakum.

3.3 Deformasi Lateral

Deformasi lateral tanah dasar terjadi akibat gaya lateral yang terjadi selama masa perbaikan. semakin besar gaya lateral yang terjadi maka deformasi lateral yang terjadi juga akan semakin besar. Selain gaya lateral deformasi lateral juga tergantung pada strength tanah dasar, semakin lunak tanah maka deformasi yang terjadi pun akan semakin besar. Pola deformasi lateral tanah dasar tergantung pada pelapisan tanah dasar dilokasi yang tinjauan.

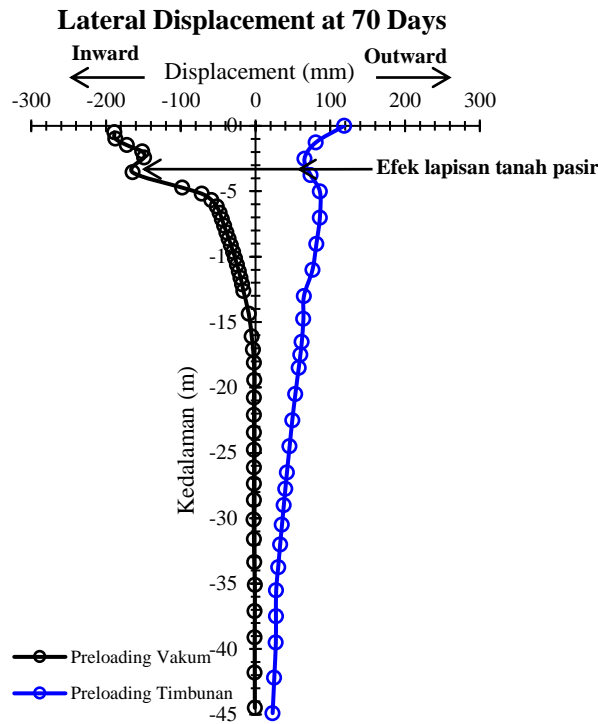


Gambar 8 Kontur deformasi lateral: (a) *preloading* vakum dan (b) *preloading* timbunan

Gambar 8 menunjukkan kontur deformasi lateral yang terjadi pada kaki timbunan kedua metode *preloading* yang dilakukan di mana pada perbaikan metode *preloading* vakum tanah dasar di kaki timbunan bergerak kearah dalam area perbaikan sedangkan pada *preloading* timbunan tanah dasar di kaki timbunan bergerak ke arah luar area perbaikan (Indraratna *et al.*, 2011).

Pergerakan kearah dalam pada *preloading* vakum diakibatkan oleh tekanan negatif vakum yang terdistribusi sepanjang PVD dan pergerakan kearah luar pada *preloading* timbunan diakibatkan oleh beban timbunan yang mendorong tanah

dasar. (Chai, Carter and Hayashi, 2005) mengungkapkan pergerakan lateral ke arah dalam area perbaikan terjadi jika tekanan vakum yang diaplikasikan lebih besar dari tekanan tanah *at rest*. Deformasi lateral akibat tekanan vakum dapat terjadi hingga 34,32m dari area perbaikan (Liu *et al.*, 2018).



Gambar 9 Perbandingan deformasi lateral *preloading* vakum dan *preloading* timbunan

Gambar 9 menunjukkan grafik deformasi lateral tanah sejarak 3 m dari kaki timbunan pada 70 hari masa perbaikan. Dari gambar tersebut terlihat jelas perbedaan deformasi lateral tanah dasar yang terjadi pada kedua metode *preloading*. Deformasi lateral *preloading* vakum bergerak ke arah dalam area perbaikan sebesar -0,2 m dan *preloading* timbunan bergerak ke arah luar area perbaikan sebesar 0,12 m. Terdapat *defect* pola pergerakan pada kedalaman 2,5 m akibat lapisan pasir.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perbandingan diketahui perilaku perbaikan tanah dengan *preloading* vakum dan *preloading* timbunan cukup berbeda. Dari sisi total penurunan pada hari ke 217 *preloading* vakum dan timbunan relatif dekat yakni 1,23 m dan 1,18 m dihitung mulai dari timbunan pertama dan pompa vakum diaplikasikan. perubahan tekanan air pori pada 35 hari pertama dengan *preloading* vakum menunjukkan reduksi tekanan air pori yang diakibatkan oleh *suction* pompa vakum, sedangkan dengan *preloading* timbunan tekanan air pori meningkat akibat distribusi beban timbunan. Kemudian *lateral displacement* yang terjadi pada kedua metode saling berlawanan, di mana tanah dasar bergerak ke arah dalam area

perbaikan pada metode perbaikan *preloading* vakum dan kearah luar area perbaikan dengan *preloading* timbunan. Pergerakan kearah dalam area perbaikan diakibatkan oleh *suction* tekanan negatif pompa vakum.

4.2 Saran

Dalam perencanaan perbaikan tanah lunak sebaiknya dipertimbangkan pemilihan tipe *preloading* yang akan digunakan. Jika pada lokasi perbaikan cukup sulit pengadaan material timbunan dan waktu konstruksi yang cukup singkat metode *preloading* dengan tekanan vakum dapat menjadi pilihan. Namun harus dipertimbangkan penanganan distribusi tekanan vakum jika area perbaikan berdekatan dengan struktur eksisting.

Daftar Kepustakaan

- Apriadi, D., Barnessa, R. A. and Marsa, N. A. I, 2019. Finite Element Study of Vacuum Preloading and Prefabricated Vertical Drains Behavior for Soft Soil Improvement. *Jurnal Teknik Sipil*, 26(3), p. 189. doi: 10.5614/jts.2019.26.3.1.
- Chai, J. C., Carter, J. P. and Hayashi, S, 2005. Ground deformation induced by vacuum loading–unloading. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(12), pp. 1552–8561. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:12_1552.
- Chu, J. and Yan, S. W, 2005. Estimation of Degree of Consolidation for Vacuum Preloading Projects. *International Journal of Geomechanics*, 5(2), pp. 158–165. doi: 10.1061/(asce)1532-3641(2005)5:2(158).
- Ding, J. et al, 2019. Case Study: Ground Improvement of Yangtze River Floodplain Soils with Combined Vacuum and Surcharge Preloading Method', *International Journal of Geomechanics*, 19(12), p. 05019008. doi: 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001516.
- Geng, X., Indraratna, B. and Rujikiatkamjorn, C, 2012. Analytical Solutions for a Single Vertical Drain with Vacuum and Time-Dependent Surcharge Preloading in Membrane and Membraneless Systems. *International Journal of Geomechanics*, 12(1), pp. 27–42. doi: 10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000106.
- Helwany, S, 2007. *Applied Soil Mechanics with ABAQUS Applications*, *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952. Canada: John Wiley & Sons.
- Indraratna, B. et al, 2011. Performance and Prediction of Vacuum Combined Surcharge Consolidation at Port of Brisbane. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(11), pp. 1009–1018. doi: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000519.
- Indraratna, B. et al, 2012. Soft ground improvement via vertical drains and vacuum assisted preloading. *Geotextiles and Geomembranes*, 30, pp. 16–23. doi: 10.1016/j.geotexmem.2011.01.004.

- Liu, J. et al, 2018. Estimation of Influence Scope of Lateral Displacement of Soft Ground under Vacuum Pressure with PVD. *Advances in Civil Engineering*, 2018. doi: 10.1155/2018/8248049.
- Mesri, G. and Khan, A. Q, 2012. Ground Improvement Using Vacuum Loading Together with Vertical Drains. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(6), pp. 680–689. doi: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000640.
- Rahardjo, P. P., Anggoro, B. W. and Wirawan, A, 2016. CPTu in Consolidating Soil. in *Geotechnical and Geophysical Site Characterisation 5. ISSMGE*, pp. 363–368.
- Saowapakpiboon, J. et al, 2010. Measured and predicted performance of prefabricated vertical drains (PVDs) with and without vacuum preloading. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(1), pp. 1–11. doi: 10.1016/j.geotexmem.2009.08.002.
- Shi, B. and Kong, X, 2016. Analysis of a Dam Foundation with Vacuum Preloading. in, pp. 51–55. doi: 10.1061/9780784480083.007.
- Wijaya, A. E. and Rahardjo, P. P, 2019. Vacuum Preloading Consolidation Settlement Analysis with Two Dimensional Finite Element Method. 10(7), pp. 455–457.