

PEMODELAN PERBAIKAN TANAH LEMPUNG LUNAK MENGGUNAKAN VACUUM PRELOADING

Indra Noer Hamdhan¹ dan Neta Lathifa Rahmanisa²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Jl. Penghulu K.H. Hasan Mustapa No.23, Bandung, Indonesia
indranh@itenas.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Jl. Penghulu K.H. Hasan Mustapa No.23, Bandung, Indonesia
netalathifar@gmail.com

Masuk: 27-12-2022, revisi: 01-08-2023, diterima untuk diterbitkan: 14-08-2023

ABSTRACT

One of the soil improvement methods is preloading, but in the process this method often experiences embankment landslides and also soft soil conditions which make consolidation settlement take a very long time. So that it can be done with the vacuum preloading method which is an alternative to improve water saturated soil where the vacuum pump will suck water and air which will accelerate the consolidation settlement. This study aims to determine and analyze the performance of the effect of vacuum, subsidence in several depths of the soft clay layer, the effect of PVD installation patterns, and lateral deformation due to embankment soil using PLAXIS 3D. The vacuum pressure capacity used is 60 kPa, 70 kPa, and 80 kPa with a PVD distance of 1,5 meters and a PVD depth of 90% floating penetration model. The effectiveness of the use of vacuum in the improvement of soft clay soils can reduce the settlement time by 95%-96% and the preloading of this embankment causes lateral displacement outward of the soil improvement, with vacuum causing lateral displacement inward of the soil improvement.

Keywords: soil improvement; soft clay; vacuum preloading; lateral displacement; installation pattern of prefabricated vertical drains

ABSTRAK

Salah satu metode perbaikan tanah yaitu dengan preloading, namun pada proses nya metode ini sering mengalami kelongsoran tanah timbunan dan juga kondisi tanah lunak yang membuat penurunan konsolidasi waktu yang sangat lama. Sehingga dapat dilakukan dengan metode vacuum preloading yang merupakan salah satu alternatif untuk memperbaiki tanah jenuh air dimana pompa vakum akan menghisap air dan udara yang akan mempercepat penurunan konsolidasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan menganalisis kinerja dari pengaruh besaran vacuum, penurunan dibebberapa kedalaman lapisan tanah lempung lunak, pengaruh pola pemasangan PVD, dan deformasi lateral akibat tanah timbunan menggunakan program Plaxis 3D. Kapasitas tekanan *vacuum* yang digunakan yaitu 60 kPa, 70 kPa, dan 80 kPa dengan jarak PVD 1,5 meter dan kedalaman PVD model *floating penetration* 90%. Efektivitas penggunaan *vacuum* pada perbaikan tanah lempung lunak ini dapat mengurangi waktu penurunan sebesar 95%-96% dan pada metode *preloading* timbunan ini menyebabkan perpindahan lateral ke arah luar dari perbaikan, sedangkan dengan *vacuum* akan menyebabkan perpindahan lateral ke arah dalam perbaikan.

Kata kunci: perbaikan tanah; tanah lempung lunak; *vacuum preloading*; deformasi lateral; pola pemasangan *prefabricated vertical drains*

1. PENDAHULUAN

Tanah merupakan material yang memiliki peranan penting dan sangat mempengaruhi kinerja konstruksi bangunan. Saat ini perkembangan infrastruktur di Indonesia itu sangat pesat, sehingga penggunaan lahan juga semakin bertambah luas yang mengakibatkan banyaknya infrastruktur dibangun diatas tanah yang kurang baik. Kondisi tanah lunak merupakan jenis tanah yang kurang baik, karena pada umumnya tanah lunak memiliki daya dukung yang relatif rendah dan pemampatan tanah dasarnya yang relatif besar serta berlangsung relatif lama (Tandirerung, 2020).

Berdasarkan SNI 8460:2017 tentang Perencanaan Geoteknik pada Bab 6.2, kondisi tanah kurang baik atau tanah lunak termasuk dalam salah satu kriteria perancangan perbaikan tanah, dimana tanah berpotensi mengalami penurunan total yang tidak dapat ditoleransi dan berpotensi mengalami penurunan dengan waktu yang cukup lama sehingga dilakukan metode perbaikan tanah yang dilakukan yaitu *vacuum preloading* dimana pompa *vacuum* ini akan menghisap air dan

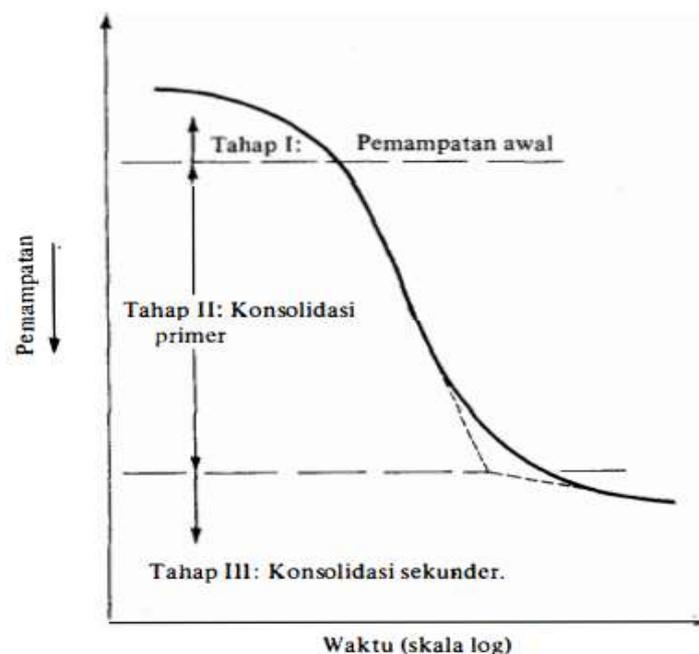
udara yang akan mempercepat penurunan konsolidasi dengan beberapa variasi jarak dan kedalaman *Prefabricated Vertical Drains* (PVD) yang ekonomis dilihat dari segi waktu penurunannya. Penelitian ini menggunakan program PLAXIS 3D. Analisis dilakukan dengan beberapa variasi tekanan *vacuum* yaitu 60 kPa, 70 kPa, dan 80 kPa.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan menganalisis kinerja dari pengaruh besaran *vacuum*, penurunan di beberapa titik kedalaman lapisan tanah lempung lunak, pola pemasangan PVD terhadap besar penurunan dan waktu penurunan serta arah deformasi lateral akibat tanah timbunan maupun dengan *vacuum*. Manfaat penelitian ini dapat mengetahui efektifitas waktu dari penurunan menggunakan *vacuum*.

Konsolidasi

Berdasarkan Das (2016), konsolidasi merupakan perubahan volume yang disebabkan oleh keluarnya air dari dalam pori akibat adanya proses pembebanan tanah yang disertai dengan pemindahan kelebihan tekanan air pori ke tegangan efektif yang akan menyebabkan terjadinya penurunan yang merupakan fungsi dari waktu (*time – dependent settlement*) pada lapisan tanah lempung. Menurut Endah dan Mochtar, penurunan konsolidasi ini terbagi menjadi tiga tahapan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1 (Das et al., 1995), yaitu:

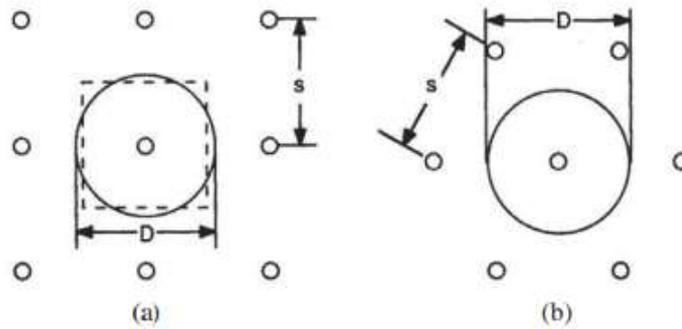
1. Tahap I: Pemampatan awal (*initial compression*), yang disebabkan oleh pembebanan awal (*preloading*).
2. Tahap II: Konsolidasi primer (*primary consolidation*), merupakan periode selama tekanan air pori secara lambat laun dipindahkan kedalam tegangan efektif, sebagai akibat dari keluarnya air dari pori-pori tanah.
3. Tahap III: Konsolidasi sekunder (*secondary consolidation*), terjadi setelah tekanan air pori hilang seluruhnya. Pemampatan yang terjadi disini adalah disebabkan oleh penyesuaian yang bersifat plastis dari butir-butir tanah.



Gambar 1. Grafik waktu pemampatan selama konsolidasi untuk suatu penambahan beban yang diberikan (Das et al., 1995)

Perbaikan tanah lempung lunak dengan metode PVD

PVD salah satu metode perbaikan tanah yang bisa mempercepat terjadinya proses konsolidasi sehingga air terdisipasi dengan cepat. Pada konsolidasi normal, aliran pori yang keluar dari tanah sangat lambat, dikarenakan permeabilitas yang bekerja hanya pada arah vertikal. Ada dua macam pola pemasangan drainase vertikal ini yaitu pola segitiga dan pola segiempat yang dapat ditunjukkan pada Gambar 2. Menurut Robert D Holtz, pola segitiga dalam pemasangan *prefabricated vertical drains* ini menghasilkan pemampatan yang seragam dibandingkan pola segiempat (Holtz et al., 1991). Efisiensi dari PVD dalam pemakaian tergantung tidak hanya dari kapasitas debit PVD nya tetapi pada permeabilitas tanah disekitarnya dan panjang dari PVD tersebut (Han, 2015).



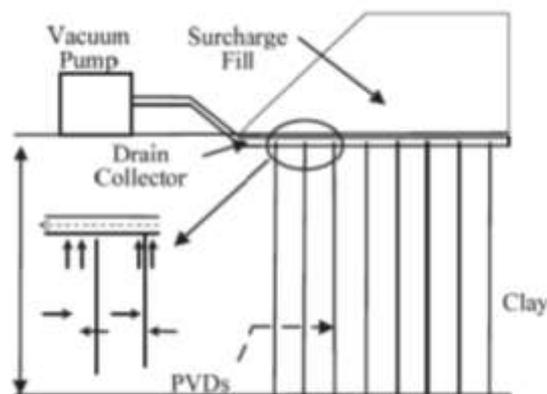
Gambar 2. Bentuk pola pemasangan PVD: (a) pola segiempat dan (b) pola segitiga (Han, 2015)

Vacuum preloading

Metode ini merupakan penyempurnaan dari metode PVD yang dilakukan kombinasi PVD dan vakum (pompa) untuk mempercepat dan meningkatkan penurunan (konsolidasi) dan juga meningkatkan tegangan geser pada tanah. Waktu konstruksi menjadi lebih singkat, tidak memerlukan peralatan berat, dan juga merupakan metode perbaikan tanah yang ramah lingkungan karena tidak ada campuran kimia yang digunakan (Chai et al., 2005). Menurut Chu et al. (2008) tekanan vakum yang diterapkan bisa mencapai 90 kPa, namun tekanan vakum yang sering digunakan hanya sekitar 60-80 kPa. Menurut Nadya Utami Rivanga dan Indra Noer Hamdhan, kapasitas vakum dapat mempengaruhi penurunan, sehingga semakin besar kapasitas vakum semakin besar juga penurunan (Rivanga & Hamdhan, 2018).

Secara umum adapun perbandingan metode *vacuum preloading* (Gambar 3) yang dikombinasikan dengan timbunan dan PVD dengan *preloading* konvensional (timbunan dengan PVD saja) (Indraratna, Rujikiatkamjorn, & Kelly, 2009). Adapun metode sebagai berikut

1. Tegangan efektif meningkat bersamaan dengan peningkatan dari arah manapun, sehingga perpindahan lateral yang terjadi adalah tekan. Dengan begitu keruntuhan geser dapat diminimalisir;
2. Tinggi tekanan *vacuum* dapat didistribusikan sampai kedalaman yang jauh dibawah lapisan tanah menggunakan PVD;
3. Volume tambahan timbunan untuk pembebanan dapat diturunkan dan tetap mencapai besar penurunan yang sama;
4. Karena tinggi timbunan dapat dikurangi, maka kelebihan tekanan pori maksimum yang timbul akan lebih kecil dibandingkan dengan *preloading* konvensional.



Gambar 3. Diagram metode *vacuum preloading* (Indraratna et al., 2009)

2. METODE PENELITIAN

Pada metodologi penelitian ini dilakukan beberapa tahapan. Tahapan yang pertama yaitu merumuskan masalah kemudian melakukan studi pustaka lalu mengumpulkan beberapa data seperti data pengujian tanah di lapangan dan data parameter tanah. Setelah itu melakukan pemodelan perbaikan tanah lunak menggunakan *software* PLAXIS 3D. Adapun dua pemodelan yang dilakukan yaitu pemodelan perbaikan tanah lunak dengan *preloading* dan pemodelan perbaikan tanah lunak dengan *preloading* dan PVD. Dari pemodelan tersebut menggunakan tinggi timbunan setebal

3 m serta melakukan beberapa variasi jarak PVD dan kedalaman PVD untuk nantinya melakukan pemodelan perbaikan tanah lempung lunak dengan *preloading*, PVD, dan *vacuum preloading*. Setelah melakukan pemodelan, didapatkan beberapa hasil yaitu besar penurunan dan waktu penurunan yang terjadi, pengaruh kapasitas vakum terhadap penurunan dan waktu, pengaruh pola pemasangan PVD terhadap penurunan dan waktu, serta deformasi lateral akibat tanah timbunan dan vakum.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini menggunakan data tanah berdasarkan pada hasil uji lapangan *Standar Penetration Test*. Model tanah yang digunakan pada penelitian ini yaitu tanah lempung menggunakan model tanah *soft soil model*, tanah pasir *hardening soil model*, dan tanah timbunan *mohr-coloumb*. Tabel 1-2 menunjukkan data parameter tanah yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 1. Parameter tanah

Jenis Tanah	Ketebalan (m)	$\gamma_{unsat}=\gamma_{sat}$ (kN/m ³)	Es (kN/m ²)	Eoed (kN/m ²)	Eur (kN/m ²)	m
<i>Very soft clay</i>	26	17	-	-	-	-
<i>loose sand</i>	1,1	20	2451	2451	7354	0,5
<i>medium clay</i>	3,6	18	-	-	-	-
<i>medium dense sand</i>	1,3	22,5	18384	18384	55152	0,5
<i>medium dense sand</i>	8,5	21,5	10418	10418	31253	0,5
timbunan	3	18	2000	2000	6000	-

Tabel 2. Parameter tanah (lanjutan)

Jenis Tanah	c'_{ref} (kN/m ²)	ϕ' (°)	Kx-Kz (m/hari)	Cc/Cs
<i>Very soft clay</i>	5	26,8	8.64×10^{-4}	0.3/0.03
<i>loose sand</i>	1	27,8	8.64×10^{-2}	-
<i>medium clay</i>	5	28,8	8.64×10^{-3}	0.1/0.01
<i>medium dense sand</i>	1	41,5	8.64×10^{-1}	-
<i>medium dense sand</i>	1	36,2	8.64×10^{-1}	-
Timbunan	10	30	8.64×10^{-2}	-

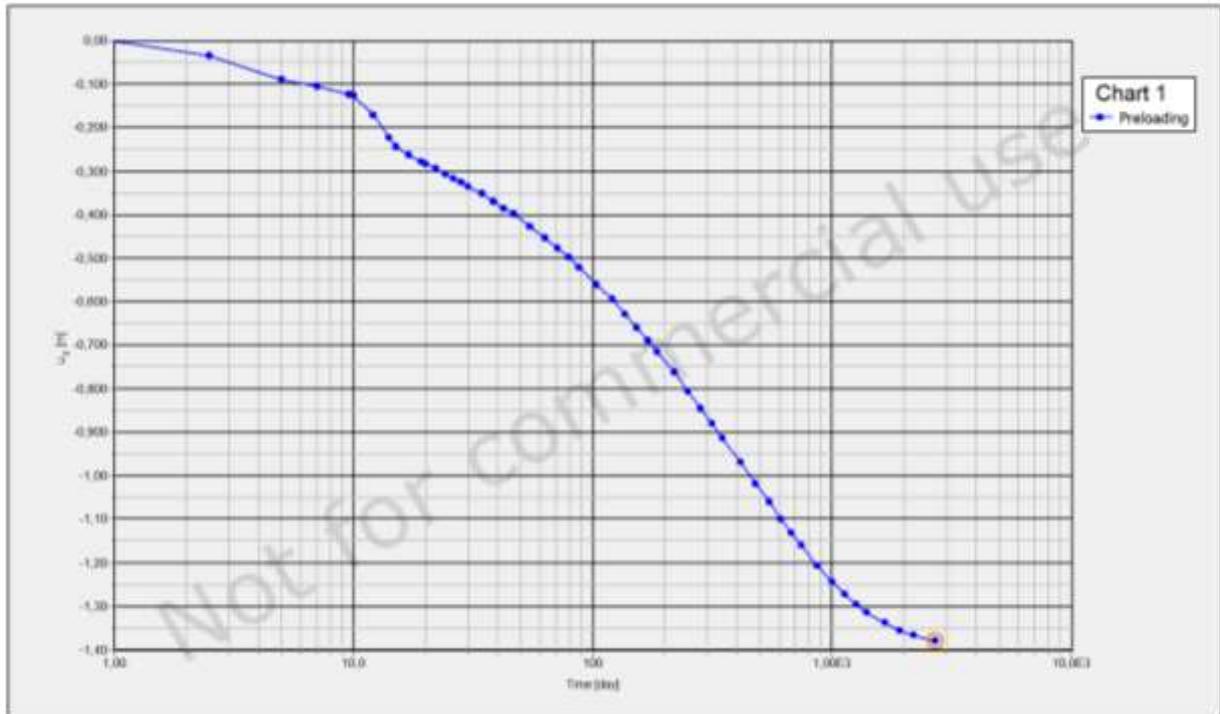
Hasil pemodelan perbaikan tanah lempung lunak dengan *preloading*

Pada tahapan pemodelan dengan *preloading* ini ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Tahapan pemodelan *preloading*

No	Tahapan Pekerjaan	Waktu Pekerjaan
1	Tanah Asli	-
2	Timbunan Tahap 1	5 hari
3	Konsolidasi 1	5 hari
4	Timbunan Tahap 2	5 hari
5	Konsolidasi 2	5 hari
6	<i>Minimum Excess Pore</i>	Hingga air pori terdisipasi

Pada pemodelan ini dilakukan perbaikan tanah lempung lunak menggunakan metode *preloading* dengan tanah timbunan pasir kelanauan yang memiliki tinggi timbunan sebesar 3 m secara bertahap dengan kemiringan 1V:2H. Pada Gambar 4, hasil grafik pemodelan perbaikan tanah lempung lunak dengan metode *preloading*.



Gambar 4. Hasil grafik pemodelan perbaikan tanah lempung lunak dengan metode *preloading*

Pemodelan perbaikan tanah lempung lunak dengan metode *preloading* ini mendapatkan nilai penurunan total hingga *minimum excess pore pressuse* sebesar 1,367 m selama 2176,471 hari atau sekitar 5,96 tahun. Pada metode *preloading* ini memang menghabiskan banyak waktu penurunan sehingga dilakukan metode lain untuk mempercepat waktu penurunan yaitu dengan PVD dan *vacuum*.

Hasil Pemodelan *Prefabricated Vertical Drains (PVD)* dengan *vacuum preloading*

Tahapan pemodelan *Prefabricated Vertical Drains (PVD)* dengan *vacuum preloading* ditunjukkan pada Tabel 4 model tanpa vakum dan Tabel 5 menunjukkan model dengan vakum.

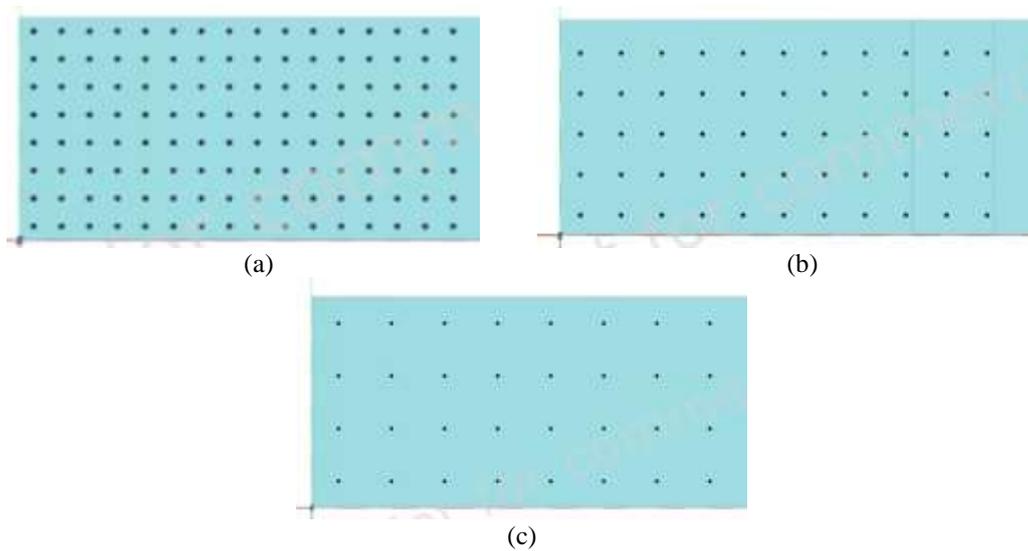
Tabel 4. Tahapan pemodelan tanpa vakum

No	Tahapan Pekerjaan	Waktu Pekerjaan
1	Tanah Asli	-
2	Pemasangan PVD	5 hari
3	Timbunan Tahap 1	5 hari
4	Konsolidasi 1	5 hari
5	Timbunan Tahap 2	5 hari
6	Konsolidasi 2	5 hari
7	<i>Minimum Excess Pore</i>	Hingga air pori terdisipasi

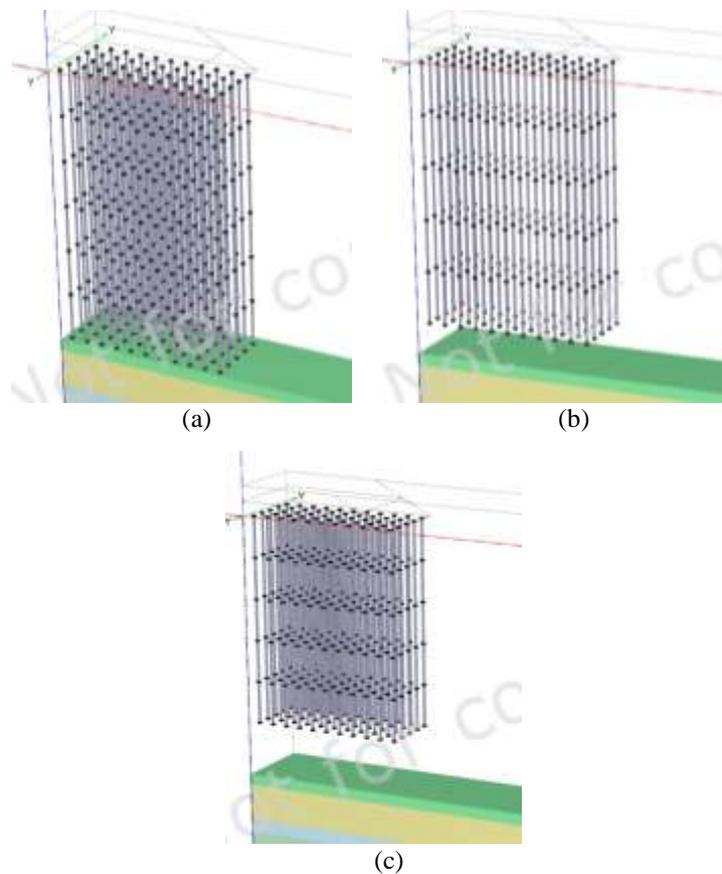
Tabel 5. Tahapan pemodelan dengan vakum

No	Tahapan Pekerjaan	Waktu Pekerjaan
1	Tanah Asli	-
2	Pemasangan PVD+vakum	5 hari
3	Timbunan Tahap 1	5 hari
4	Konsolidasi 1	5 hari
5	Timbunan Tahap 2	5 hari
6	Konsolidasi 2	5 hari
7	<i>Minimum Excess Pore</i>	Hingga air pori terdisipasi

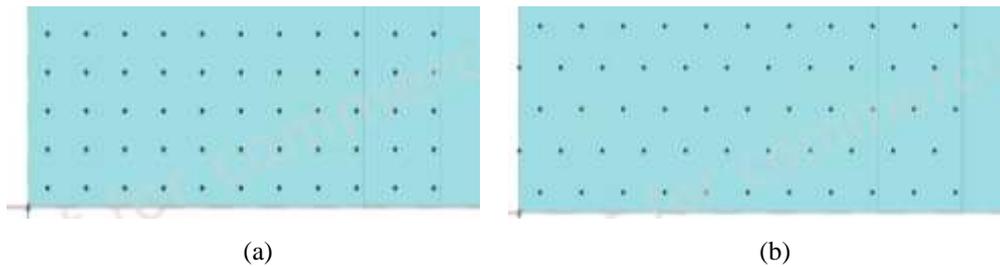
Pemodelan pada penelitian ini dilakukan 15 kali pemodelan dengan memvariasikan jarak dan kedalaman dari PVD, memvariasikan tekanan vakum, dan pola pemasangan PVD. Variasi jarak PVD (Gambar 5) yaitu 1 m; 1,5 m; dan 2 m dengan kedalaman PVD (Gambar 6) *full penetration* sebesar 26 m dan *floating penetration* yaitu 90% dan 80% atau 23,4 m dan 20,8 m. Untuk variasi tekanan vakum digunakan tekanan sebesar 60 kPa, 70 kPa, dan 80 kPa. Serta dua macam pola pemasangan PVD (Gambar 7) yaitu pola segiempat dan segitiga. Berikut dibawah ini pemodelan perbaikan tanah lempung lunak.



Gambar 5. Pemodelan jarak PVD: (a) spasi 1 m, (b) spasi 1.5 m; (c) spasi 2 m



Gambar 6. Pemodelan kedalaman PVD: (a) *full penetration* (26 m); (b) 90% *penetration* (23.4 m); (c) 89% *penetration* (20.8 m)



Gambar 7. Pemodelan pola pemasangan PVD: (a) pola segiempat; (b) pola segitiga

Hasil penentuan jarak dan kedalaman PVD

Setelah dilakukan pemodelan maka dapat diketahui jarak dan kedalaman dari *prefabricated vertical drains* yang ekonomis dari segi waktu penurunannya untuk pemodelan selanjutnya dengan menggunakan vakum. Berikut ini pada Tabel 6 hasil selisih nilai jarak dan Tabel 7 kedalaman PVD yang digunakan.

Tabel 6. Hasil selisih penurunan dan waktu penurunan berdasarkan jarak PVD

Jarak (m)	Penurunan (m)	Waktu Penurunan (hari)	Selisih Penurunan (m)	Selisih Waktu Penurunan (m)
1	1,284	126,031	-	-
1,5	1,316	136,139	0,032	10,108
2	1,331	147,551	0,015	11,412

Tabel 7. Hasil selisih penurunan dan waktu penurunan berdasarkan kedalaman PVD

Jarak (m)	Penurunan (m)	Waktu Penurunan (hari)	Selisih Penurunan (m)	Selisih Waktu Penurunan (m)
26	1,313	128,080	-	-
23,4	1,315	136,139	0,002	11,839
20,8	1,310	164,339	0,006	36,259

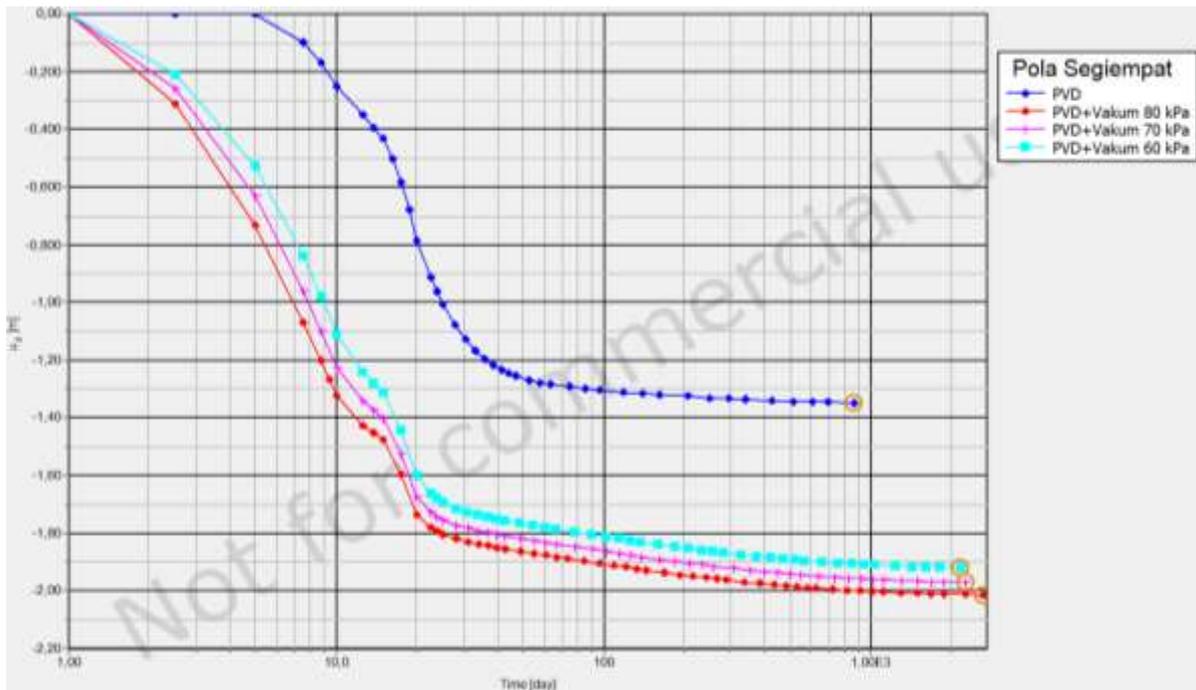
Berdasarkan hasil rekapitulasi dari jarak dan kedalaman PVD yang sudah dimodelkan, digunakan jarak PVD sebesar 1,5 m dan kedalaman PVD 90% *penetration* berdasarkan hasil yang ekonomis dari segi waktu penurunannya.

Hasil Pemodelan *Prefabricated Vertical Drains* (PVD) dengan *Vacuum Preloading*

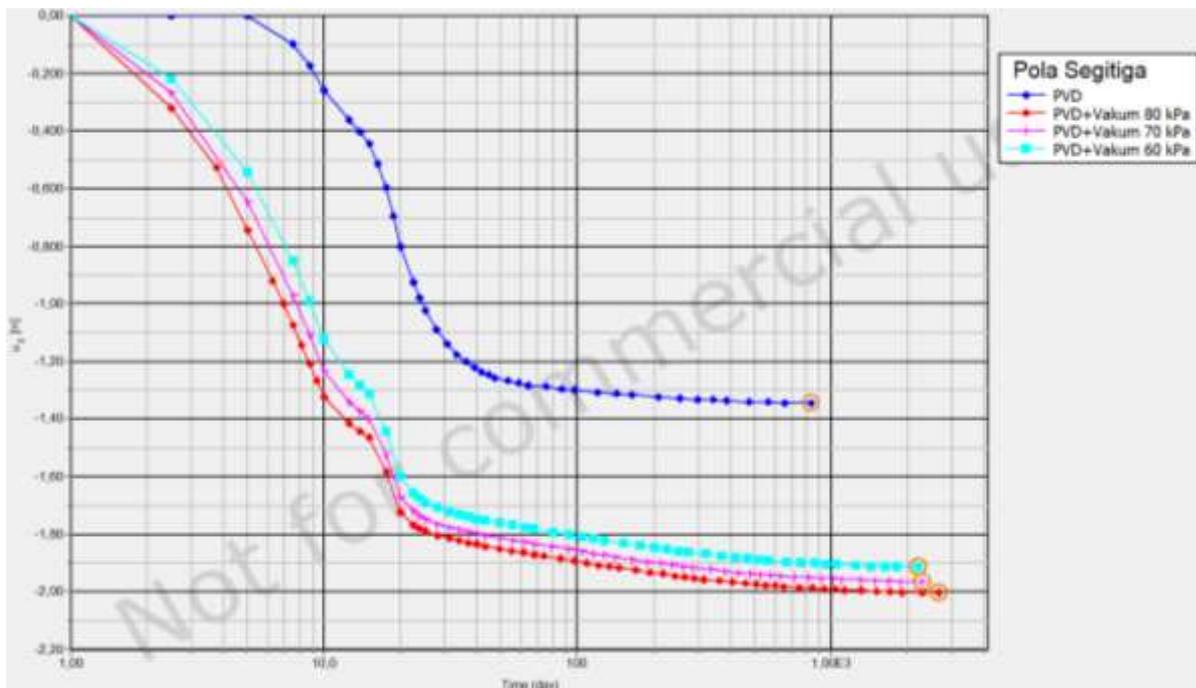
Setelah menentukan jarak dan kedalaman PVD, dilakukan pemodelan PVD dengan vakum yang dapat dilihat pada Gambar 8-9 hasil grafik hubungan antara penurunan dan waktu dengan PVD dan vakum menggunakan pola segiempat dan pola segitiga.

Penurunan dengan metode PVD ini menjadi patokan untuk waktu penurunan dengan menggunakan vakum. Berdasarkan Gambar 8-9, dengan menggunakan vakum ini waktu penurunannya lebih cepat karena adanya teknik menghisap oleh vakum itu sendiri yang menyebabkan air pori terdisipasi lebih cepat sehingga waktu penurunannya juga lebih singkat. Berikut ini pada Tabel 8-10 hasil rekapitulasi penurunan (uz) dan waktu penurunan (t) berdasarkan pola pemasangan PVD.

Pengaruh pola pemasangan PVD ini menghasilkan waktu penurunan yang tidak signifikan dengan waktu penurunan yang menggunakan vakum antara pola segiempat dan pola segitiga. Namun secara umum pemasangan PVD dengan pola segitiga ini membutuhkan waktu yang lebih singkat untuk menyelesaikan proses konsolidasi jika dibandingkan dengan pola segiempat.



Gambar 8. Hasil grafik hubungan antara penurunan dan waktu dengan PVD dan vakum menggunakan pola segiempat



Gambar 9. Hasil grafik hubungan antara penurunan dan waktu dengan PVD dan vakum menggunakan pola segitiga

Tabel 8. Hasil rekapitulasi penurunan (uz) dan waktu penurunan (t) dengan pola pemasangan PVD

Kondisi	POLA SEGIEMPAT		POLA SEGITIGA	
	uz (m)	t (hari)	uz (m)	t (hari)
PVD	1,315	139,919	1,306	119,931
PVD+vakum 80 kPa	1,315	9,895	1,306	9,810
PVD+vakum 70 kPa	1,315	11,913	1,306	11,667
PVD+vakum 60 kPa	1,315	15,093	1,306	15,038

Tabel 9. Selisih waktu penurunan

Kondisi	POLA SEGIEMPAT	POLA SEGITIGA
PVD+Vakum 80 kPa dengan PVD+Vakum 70 kPa	2,018 hari	1,857 hari
PVD+Vakum 80 kPa dengan PVD+Vakum 60 kPa	5,198 hari	5,228 hari
PVD+Vakum 70 kPa dengan PVD+Vakum 60 kPa	3,180 hari	3,371 hari

Tabel 10. Hasil rekapitulasi persentase waktu penurunan dengan pola pemasangan PVD

No	Metode	Waktu Penurunan (hari)	Persentase Waktu (%)
1	PVD	19,988	14,285
2	PVD+Vakum 80 kPa	0,085	0,859
3	PVD+ Vakum 70 kPa	0,246	2,065
4	PVD+ Vakum 60 kPa	0,055	0,364

Hasil perpindahan lateral

Menurut Yan dan Chu (2003), sebuah tanah timbunan yang dibangun tidak hanya memberikan tekanan konsolidasi pada tanah lempung lunak tetapi juga tegangan geser. Tegangan geser ini biasanya akan menginduksi perpindahan lateral ke luar dari tanah yang diperbaiki di bawah tanah timbunan. Biasanya, nilai maksimum penempatan lateral akibat pembebanan timbunan akan terjadi di bawah lapisan kerak yang relatif kaku. Sebaliknya, penerapan tekanan vakum akan menyebabkan perpindahan lateral ke dalam, yang terjadi sebagai akibat dari proses konsolidasi. Mekanisme perpindahan lateral yang disebabkan oleh pembebanan tanah timbunan dan tekanan vakum berbeda, secara umum kombinasi keduanya belum tentu menghasilkan nol perpindahan lateral. Namun demikian Chai et al. (2013) mengatakan kombinasi dari ini jenis pembebanan umumnya akan mengurangi keseluruhan ke luar perpindahan lateral dari tanah. Berikut ini pada Gambar 10 pergerakan lateral akibat *preloading*, *prefabricated vertical drains* (PVD), dan *vacuum preloading*.

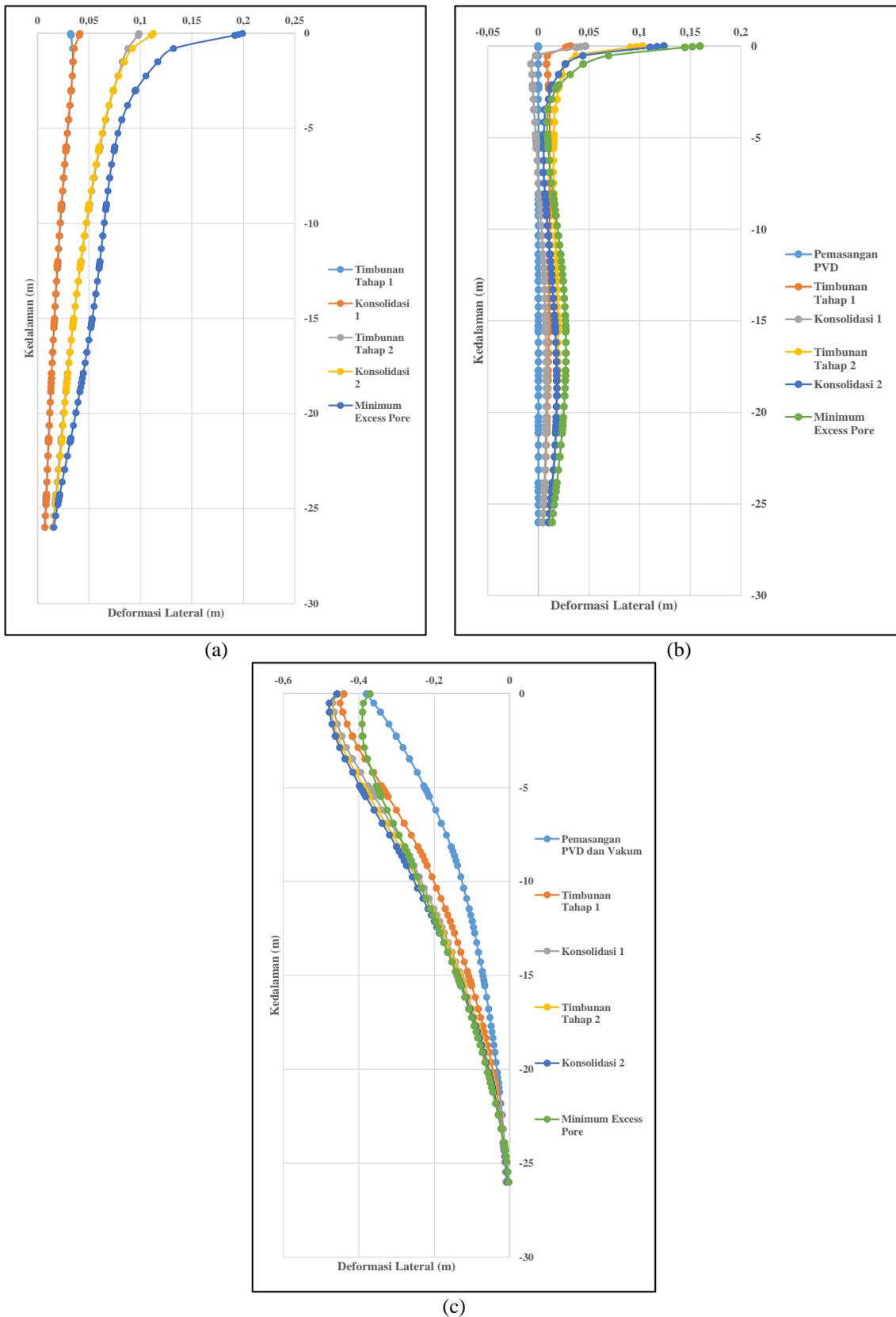
Pada saat tanah dasar dibebani hanya dengan *preloading* timbunan setinggi 3 m, arah deformasi nya ke kanan atau ke luar dari perbaikan, sedangkan dengan adanya PVD dan vakum arah deformasi nya ke kiri atau ke arah dalam perbaikan karena tekanan vakum dapat mereduksi deformasi lateral tanah yang mengakibatkan arah deformasi dari vakum tersebut ke arah dalam perbaikan. Pergerakan ke arah dalam *preloading* vakum diakibatkan oleh tekanan negatif vakum yang didistribusikan sepanjang PVD dan pergerakan ke arah luar *preloading* timbunan diakibatkan oleh beban timbunan yang mendorong tanah dasar.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Setelah dilakukannya pemodelan perbaikan tanah lempung lunak menggunakan metode *vacuum preloading* serta hasil analisis yang didapat, maka kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Selisih waktu penurunan dengan tekanan vacuum 80 kPa lebih cepat 17% dibandingkan dengan tekanan vacuum 70 kPa, tekanan vacuum 80 kPa lebih cepat 34% dibandingkan dengan tekanan vacuum 60 kPa, dan tekanan vacuum 70 kPa lebih cepat 21% dibandingkan dengan tekanan vacuum 60 kPa. Karena sesuai dengan prinsip vakum yaitu “menghisap” yang dimana pompa vakum akan menghisap air dan udara yang akan mempercepat penurunan konsolidasi kemudian efektivitas penggunaan vacuum pada perbaikan tanah lempung lunak ini dapat mengurangi waktu penurunan sebesar 95%-96%.
2. Jarak PVD yang ekonomis dilihat dari segi waktu penurunannya yaitu 1,5 m. Hal tersebut dikarenakan semakin kecil jarak PVD atau semakin rapat nya jarak PVD, maka semakin cepat waktu penurunannya karena penambahan PVD lebih banyak yang mengakibatkan tidak ekonomis.
3. Kedalaman PVD dengan pemasangan floating penetration 90% digunakan pada penelitian ini, karena dapat menghemat 10% dibandingkan dengan pemasangan full penetration.



Gambar 11. Grafik deformasi lateral: (a) metode *preloading*; (b) metode *prefabricated vertical drains (PVD)*; dan (c) metode *vacuum preloading*

4. Dengan adanya vacuum pada pola segitiga, waktu penurunan hanya 15 hari. Rata-rata selisih waktu penurunan pola pemasangan segiempat dengan pola pemasangan segitiga dengan adanya vacuum yaitu 1,096%.
5. Deformasi lateral pada preloading timbunan menyebabkan perpindahan lateral ke luar dari tanah, sebaliknya pada penerapan vakum akan menyebabkan perpindahan lateral ke dalam tanah. Deformasi lateral antar variasi tekanan vakum memiliki deformasi yang cukup signifikan. Namun dengan menggunakan pola yang berbeda tidak terlalu signifikan.

Saran

Dari hasil penelitian ini adapun beberapa saran yaitu sebagai berikut:

1. Melakukan Analisa efek smear zone pada aera pemasangan prefabricated vertical drains (PVD).
2. Perlunya penyesuaian besar kapasitas tekanan vakum dengan tinggi timbunan yang akan dimodelkan agar dapat melihat rencana konstruksi yang akan sebenarnya dibuat karna dengan adanya vacuum sudah dapat mengurangi tinggi timbunan sebagai beban preloading.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Nasional. (2017). Persyaratan perancangan geoteknik (SNI 8460:2017)
- Chai, J. C., Carter, J. P., & Hayashi, S. (2005). Ground deformation induced by vacuum consolidation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(12), 1552-1561. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:12\(1552\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:12(1552))
- Chai, J., Ong, C. Y., Carter, J. P., & Berdago, D. T. (2013). Lateral displacement under combined vacuum pressure and embankment. *Geotechnique*, 63(10), 842-856. <https://doi.org/10.1680/geot.12.P.060>
- Chu, J., Yan, S., & Indranata, B. (2008). Vacuum preloading techniques - recent developments and applications. *GeoCongress 2008: Geosustainability and Geohazard Mitigation*. [https://doi.org/10.1061/40971\(310\)73](https://doi.org/10.1061/40971(310)73)
- Das, B. M. (2016). *Principles of foundation engineering*. Cengage Learning.
- Das, B. M., Mochtar, N. E. & Mochtar, I. B. (1995). *Mekanika tanah (prinsip-prinsip dasar rekayasa geoteknik)*. Erlangga.
- Han, J. (2015). *Principles and practice of ground improvement*. John Wiley & Sons, Inc.
- Holtz, R. D., Jamiolkowski, M. B., Lancellotta, R., & Pedroni, R. (1991). *Prefabricated vertical drains: Design and performance*. Construction Industry Research & Information Assoc. <https://trid.trb.org/view/369833>
- Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., & Kelly, R. (2009). Modelling of combined vacuum and surcharge preloading with vertical drains. In Hamza, M., Shahien, M. & El-Mossallamy, Y. (Eds.), *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (pp. 2204-2207). IOS Press. <http://dx.doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-2204>
- Rivanga, N. U. & Hamdhan, I. N. (2018). Analisis vacuum consolidation pada perbaikan tanah lempung lunak dengan model axisymmetric. *Reka Racana*, 1(4), 68-79.
- Tandirerung, A. C. (2020, Juli 16). Metode vacuum consolidation sebagai alternatif penanganan tanah lunak untuk konstruksi jalan. *Dinas PUPR Kota Banda Aceh*. <https://dinasupr.bandaacehkota.go.id/2020/07/16/metode-vacuum-consolidation-sebagai-alternatif-penanganan-tanah-lunak-untuk-konstruksi-jalan/>
- Yan, W. S. & Chu, J. (2003). Soil improvement for a road using the vacuum preloading method. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement*, 7(4), 165-172. <https://doi.org/10.1680/grim.2003.7.4.165>

