

METODE *VACUUM PRELOADING* SEBAGAI SALAH SATU ALTERNATIF SOLUSI PEMBANGUNAN TIMBUNAN DI ATAS TANAH LUNAK

Hary Christady Hardiyatmo

Guru Besar Departement Teknik Sipil dan Lingkungan
Fakultas Teknik - Universitas Gadjah Mada – Yogyakarta
email: harychristady@yahoo.com

ABSTRAK

Banyak bangunan infrastruktur transportasi dibangun pada tanah lunak yang tebal, sehingga masalah penurunan yang berlebihan menjadi penting dan harus dicari solusinya. Pada lokasi tersebut, sebelum dilakukan pembangunan infrastruktur, umumnya dilakukan lebih dulu perbaikan tanah guna menjamin stabilitas jangka pendek maupun jangka panjangnya. Cara-cara perbaikan tanah yang lazim dilakukan dapat berupa pembongkaran dan penggantian, prapembebanan, drainase vertikal, injeksi, stabilisasi tanah, perkuatan tanah dan lain-lainnya. Salah satu alternatif cara perbaikan tanah yang sering digunakan dalam pembangunan timbunan pada tanah lunak adalah drainase vertikal. Dalam perkembangannya, pada waktu sekarang ini, drainase vertikal konvensional dikombinasikan dengan prapembebanan vakum. Beberapa keuntungan dapat diperoleh dari cara ini, antara lain tinggi timbunan sebagai preload dapat direduksi dan masalah ketidakstabilan lereng timbunan saat pembangunan dapat diminimalkan. Keberhasilan pemakaian metode vakum ini bergantung banyak faktor, seperti: kebocoran sistem membran, adanya lensa-lensa tanah lolos air di dalam zona tanah yang ditangani. Makalah ini menyajikan state-of-the art dari berbagai hal yang menyangkut teori dan aplikasi metode prapembebanan vakum bila digunakan dalam perbaikan tanah lunak.

Kata-kata kunci : timbunan, tanah lunak, drainase vertikal, metode vakum

A. Pendahuluan

Perbaikan tanah lunak dengan drainase vertikal pracetak (*Prefabricated Vertical Drain, PVD*) merupakan salah satu cara yang paling banyak digunakan. Pemasangan PVD ke dalam tanah mereduksi lintasan drainase, sehingga mempercepat konsolidasi. Masalahnya adalah bila timbunan yang dibangun cukup tinggi, sehingga problem stabilitas lereng menjadi hal yang paling menentukan. Untuk memecahkan masalah ini, maka aplikasi konsolidasi vakum yang dikombinasikan dengan drainase vertikal dan pra-pembebanan (*preloading*) dipandang lebih efisien (Chu et al., 2000; Indrarnatna, 2010; Mesri dan Khan, 2012). Metode prapembebanan vakum (*vacuum preloading*) ini awalnya diusulkan oleh Kjellman (1952).

Seperti halnya pada penggunaan drainase vertikal PVD konvensional, perbaikan tanah dengan konsolidasi vakum dikombinasikan dengan drainase vertikal ini juga bertujuan untuk mempercepat konsolidasi selama masa konstruksi, sehingga ketika bangunan sudah selesai dibangun, penurunan sudah sangat kecil. Kelebihan dari percepatan konsolidasi dengan metode *vacuum preloading* dengan PVD,

konsolidasi menjadi lebih cepat oleh pengaruh kecepatan aliran rembesan air ke arah radial yang lebih cepat akibat tekanan vakum. Tekanan air pori negatif (isapan) yang tersebar di sepanjang drainase vertikal dan lapisan pasir di permukaan tanah, mempercepat proses konsolidasi, mereduksi perpindahan tanah ke arah lateral, dan menaikkan tegangan efektif.

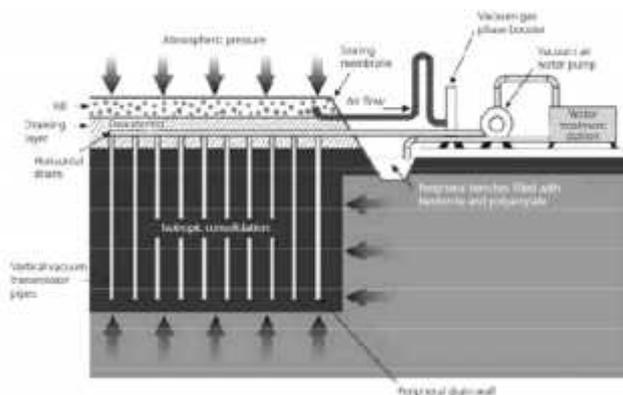
Keuntungan dari cara tersebut, tinggi timbunan dan gerakan lateral tanah dapat direduksi, sehingga problem ketidakstabilan lereng dapat dikurangi. Pada lempung lunak yang tebal di mana timbunan relatif tinggi tidak dapat dibangun tanpa menyebabkan gangguan stabilitas (gerakan lateral tanah besar), aplikasi kombinasi drainase vertikal dengan tekanan vakum sering lebih ekonomis. Dalam beberapa proyek, penghematan biaya perbaikan tanah dengan menggunakan metode *vacuum preloading* ini dapat mencapai 30%.

B. Vacuum Preloading

1) Sistem Konsolidasi Vakum

Gambar skematis sistem konsolidasi vakum yang diteliti oleh Masse et al. (2001) diperlihatkan dalam **Gambar 1**.

Dalam kasus ini, sistem terdiri dari rangkaian drainase vertikal dan horisontal, di mana hubungan secara hidrolik terjadi melalui lapisan pasir, dan membran kedap air HDPE tebal sekitar 1 mm menutup sistem tersebut. Drainase horisontal berdiameter 50 mm, sedang drainase vertikal (*wick drain*) berdiameter 34 mm. Drainase vertikal maupun horisontal terhubung dengan tepi saluran keliling dan tertutup oleh sistem membran. Saluran keliling diisi air atau larutan bentonite untuk menjaga penutupan yang sempurna dari membran di bagian tepi zona yang akan di vakum. Pompa vakum terhubung dengan sistem peralatan yang akan membuang air ke saluran tepi. Dalam kondisi tertentu, untuk menjaga agar sistem membran tidak bocor dibutuhkan sistem dinding pemotong (*cut-off-wall*).



Gambar 1. Skema konsolidasi vakum dengan penutup membran di permukaan (Masse et al., 2001).

Pelaksanaan pekerjaan sistem vakum tersebut dimulai dengan menghamparkan lapisan pasir kasar, yang selain berfungsi sebagai landasan kerja (*platform*), juga sebagai lapisan drain (selimut pasir/*sand blanket*). Setelah itu, dipasang drainase vertikal (PVD) yang diikuti dengan pemasangan drainase horisontal serta alat-alat pelengkap yang lain. PVD dapat dipasang dengan pola susunan segitiga sama sisi atau bujur sangkar. Berbagai tipe drainase vertikal telah digunakan, seperti: drainase vertikal pracetak (*Prefabricated Vertical Drain, PVD*), pipa-pipa drainase dari pipa vakum Menard (*Menard vacuum transmission pipe, VIP*)

dan drainase pasir (*sand drain*). Untuk konsolidasi vakum, PVD lebih banyak digunakan pada waktu sekarang.

Hubungan antara *outlet* untuk drainase horisontal dengan beberapa peralatan harus dibuat terhubung dengan baik ke membran. Untuk melindungi membran dari gangguan luar, lapisan pasir halus diurugkan di atas membran tersebut. Membran digelar dan segala sesuatu yang bisa mengakibatkan bocoran pada membran ketika pompa vakum bekerja harus ditangani lebih dulu.

Pompa vakum dihidupkan dan sambungan-sambungan antar lembaran membran dicek terhadap bocoran. Isapan pompa vakum yang bekerja dalam lapisan pasir di bawah membran akan tersalur ke bawah melalui pipa vertikal. Pompa isap (vakum) menghasilkan tekanan negatif (relatif terhadap tekanan atmosfer) di dalam zona tanah yang lolos air di bawah membran penutup, dan di sepanjang kedalaman tanah yang dipasang drainase vertikal PVD.

Tekanan vakum yang diterapkan bisa sampai 90 kPa, walaupun dalam praktek tekanan vakum yang sering digunakan hanya sekitar 80 kPa (Chu et al., 2008). Setelah tekanan vakum bekerja sepenuhnya, di atas membran dihamparkan tanah urug, dengan sebelumnya diletakkan lapisan pasir halus lebih dulu guna melindungi membran dari tusukan-tusukan yang bisa membuat membran tersebut sobek atau berlubang. Setelah itu, urugan tanah untuk timbunan dihamparkan di atas lapisan pasir halus tersebut (Kelly dan Wong, 2009).

2) Sistem Drainase Permukaan

Sistem drainase permukaan terdiri dari lapisan pasir dan sistem pipa kolektor yang berlubang-lubang dengan/tanpa drainase horisontal yang saling berhubungan. Sistem drainase ini dipendam di dalam lapisan pasir. Drainase horisontal menghubungkan puncak drainase vertikal menuju ke pipa vakum utama. Bergantung pada faktor-faktor seperti: permeabilitas pasir, jarak PVD, dan beban lalu-lintas di atasnya, tebal lapisan pasir umumnya 0,50 sampai 80 cm. Lapisan pasir kadang-kadang dibuat lebih tebal bila sekaligus difungsikan sebagai landasan kerja dari alat-alat berat yang akan bekerja di atasnya. Tipe-tipe drainase horisontal dapat berupa pipa PVC atau PVD *board drain*.

3) Cara Mengisolasi Area Vakum

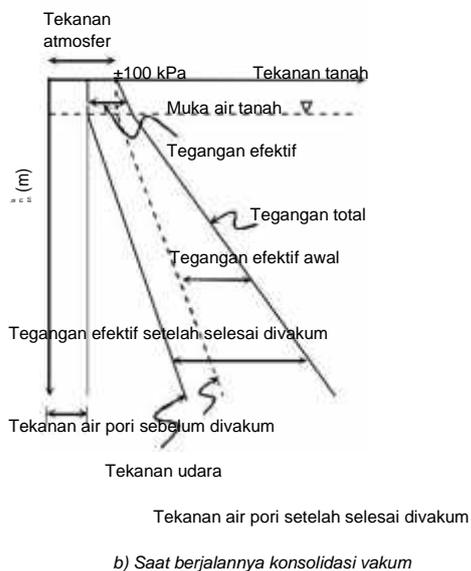
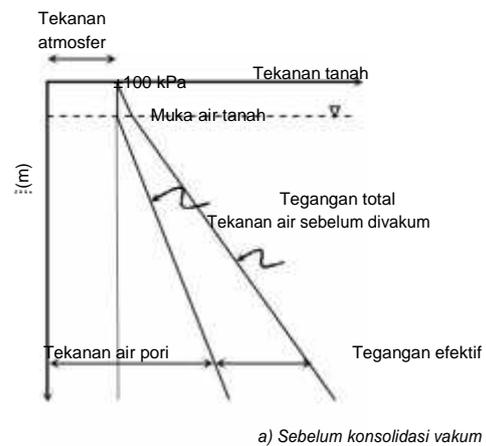
Kekedapan terhadap bocoran udara dari sistem vakum sangat berpengaruh pada aplikasi tekanan vakum dan efisiensi dari seluruh sistem. Cara yang sering dilakukan, yaitu dengan menggunakan membran PVC (2-3 lapisan) untuk menutup seluruh area yang ditangani dengan rapat. Di China, telah dikembangkan dengan hanya menggunakan satu lapis membran untuk area seluas 100.000 m² (Dam et al., 2006). Untuk menjaga kerusakan membran, geotekstil dihamparkan lebih dulu di permukaan tanah sebelum permukaannya ditutup membran. Untuk kesempurnaan penutupan, tepi membran dikunci dengan galian parit keliling yang kedalamannya 0,50 m lebih bawah dari muka air tanah dan diisi dengan larutan kedap air (larutan bentonite polyacrylate, larutan campuran lempung, atau galian tanah lempungan di tempat). Dalam praktek, banyak cara yang dilakukan untuk membuat agar area yang divakum menjadi sistem yang betul-betul tertutup. Bila didekat permukaan tanah terdapat lapisan tanah lolos air (tanah granuler), cara yang umum digunakan agar sistem vakum merupakan zona yang tertutup adalah dengan membangun dinding pemotong (*cut-off-wall*).

4) Sistem Pompa Vakum

Untuk pompa vakum, biasanya digunakan pompa yang mempunyai efisiensi tinggi. Pompa ini dilengkapi dengan pompa pembuang yang berguna untuk mengeluarkan air bercampur udara yang mengalir lewat sistem pipa-pipa dan drain (**Gambar 1**). Di China, umumnya pompa vakum digantikan dengan Jet Pump diameter 48 mm (7,5 kW), dengan pompa air sentrifugal 3HA-9. Alat ini mampu menghasilkan tekanan vakum sampai 90 kPa. Pada sistem Menard, sistem vakum terdiri dari pompa vakum yang dirancang khusus yang dapat menyedot udara dan air (Dam et al., 2006).

C. Mekanisme Vacuum Preloading

Diagram yang menunjukkan mekanisme selama proses *vacuum preloading* digambarkan oleh CUR (1996), seperti yang ditunjukkan dalam **Gambar 2**. **Gambar 2a** menjelaskan sebelum dikerjakan tekanan vakum, sedang **Gambar 2b** saat dikerjakan tekanan vakum. Ketika terjadi proses konsolidasi vakum, bekerja tekanan pori negatif yang diikuti oleh bertambahnya tegangan efektif, sedang tegangan total tetap konstan.



Gambar 2. Perkembangan tekanan tanah, air pori dan tekanan udara, sebelum dan selama proses konsolidasi vakum (CUR, 1996).

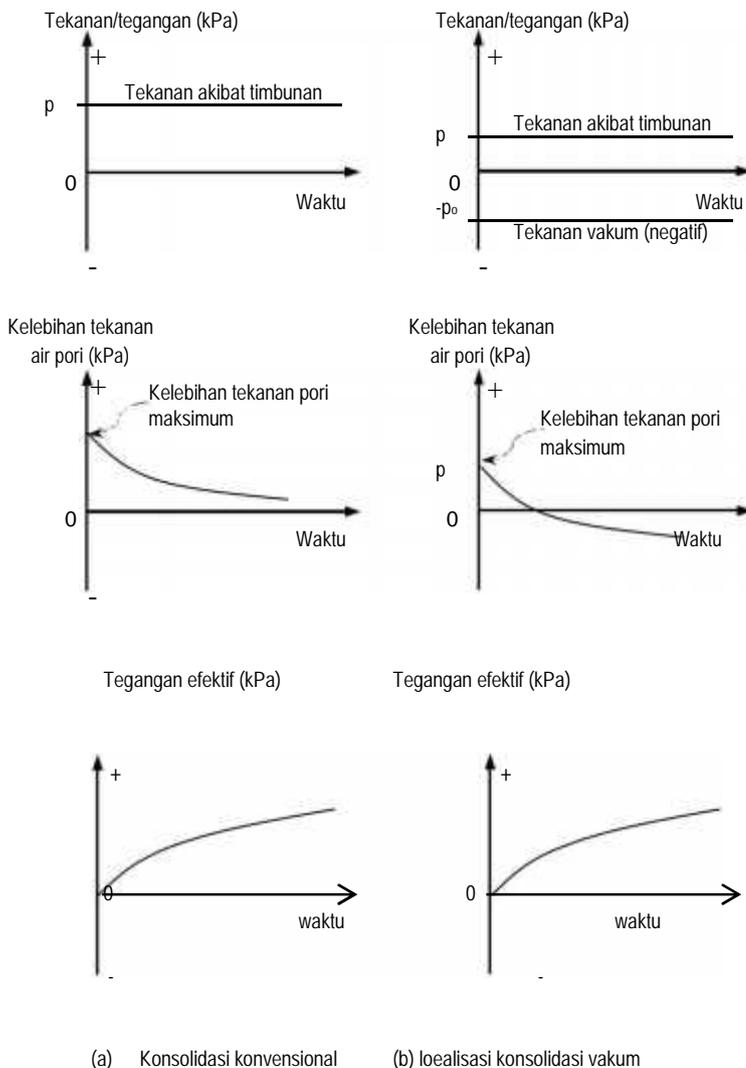
Dalam analisis geoteknik, tekanan atmosfer sering diabaikan atau dianggap nol dalam hitungan tegangannya. Akan tetapi, dalam teori konsolidasi vakum, tekanan atmosfer perlu dipertimbangkan. Saat tekanan vakum diaplikasikan, tegangan vertikal tetap sama, akan tetapi tekanan pori berkurang. Besarnya kenaikan 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 et al., 2008).

Pada *vacuum preloading* dikombinasikan dengan beban timbunan di atasnya, tekanan air pori yang timbul adalah kelebihan tekanan air pori akibat beban timbunan ditambah tekanan air pori negatif akibat tekanan isap dari pompa

vakum). Dengan demikian tekanan air pori yang timbul menjadi lebih kecil dibandingkan dengan tekanan air pori akibat beban timbunannya sendiri.

D. PERBANDINGAN METODE VAKUM DENGAN PVD KONVENSIONAL

Perbedaan proses konsolidasi konvensional dan konsolidasi vakum, yang dijelaskan dalam dalam **Gambar 3** (Indraratna et al., 2005c). **Gambar 3a** menunjukkan hubungan tegangan, kelebihan tekanan air pori, dan tegangan efektif pada konsolidasi konvensional (yaitu dengan menggunakan PVD dan timbunan saja), sedang **Gambar 3b** menunjukkan hal yang sama, namun pada timbunan plus PVD tersebut, ditambahkan tekanan vakum dengan tinggi timbunan yang dikurangi.



Gambar 3. Perbedaan proses konsolidasi konvensional dan konsolidasi vakum (Indraratna et al;2005c).

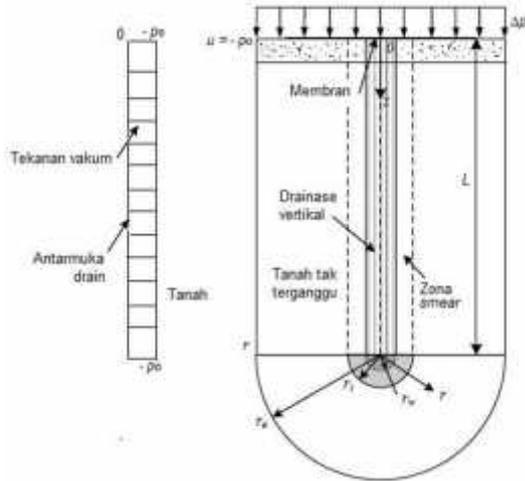
Perbandingan antara metode vakum yang dikombinasikan dengan timbunan dan PVD, dengan *preloading* konvensional (yaitu timbunan dengan PVD saja) adalah sebagai berikut (Indraratna at al., 2005):

1. Tekanan efektif pada saat bekerjanya tekanan vakum bertambah secara isotropik yang diikuti dengan gerakan lateral ke dalam (ke arah timbunan). Pengaruh dari hal ini risiko terhadap kegagalan geser tanah dapat diminimumkan (bahkan pada timbunan yang tinggi). Gerakan ke dalam dari tanah di bawah timbunan ini harus dipantau guna menghindari timbulnya tegangan tarik yang berlebihan. Jadi, metode *vacuum preloading* ini juga mengurangi resiko kegagalan stabilitas lereng.
2. Tinggi energi vakum dapat menyebar sampai kedalaman tanah yang dalam melalui sistem PVD. Isapan vakum menyebar melebihi ujung drain dan batas dari zona PVD.
3. Volume timbunan dapat dikurangi untuk mencapai derajat konsolidasi yang sama. Jadi, bila dibandingkan dengan *preloading* konvensional, *vaccum preloading* mengurangi biaya angkutan tanah urug sampai ke lokasi timbunan.
4. Karena tinggi timbunan dapat dikurangi (sehingga tekanan ke tanah berkurang), maka kelebihan tekanan pori maksimum yang timbul akan lebih kecil dibandingkan dengan *preloading* konvensional (lihat **Gambar 3b**).
5. Dengan tekanan vakum yang diterapkan, kondisi ketidak- jenuhan tanah di daerah antarmuka (*interface*) antara tanah dan drain dapat dikompensasikan.
6. Dengan konsolidasi vakum, tekanan kekang yang bekerja pada elemen tanah menjadi terdiri dari 2 bagian: (a) tekanan vakum dan (b) tekanan tanah lateral.

E. TEORI KONSOLIDASI VAKUM

Prinsip model analitik untuk dari sistem vakum ditunjukkan dalam **Gambar 4** (Indraratna, 2009). Dalam gambar ini ditunjukkan pula zona pengotoran (*smear zone*) dan pengaruh tahanan sumur (*well resistance*). Penyelesaian umum dalam memperlihatkan pengaruh kelebihan

tekanan air pori, penurunan, dan derajat konsolidasi dijabarkan dengan menggunakan persamaan transformasi Laplace.



Gambar 4. Skema sistem membran dalam 1 unit drainase vertikal (Indraratna, 2009).

Mengadopsi dari teori konsolidasi satu dimensi dari Terzaghi, Mohamedelhasan dan Shang (2002) mengembangkan teori konsolidasi vacuum. Mekanisme gabungan dari konsolidasi vakum dan beban terbagi rata dari timbunan (**Gambar 5a**), dianggap sebagai superposisi dari kondisi pada **Gambar 5b dan 5c**.

Derajat konsolidasi rata-rata pada kombinasi tekanan vakum dan beban *preloading* dinyatakan oleh persamaan:

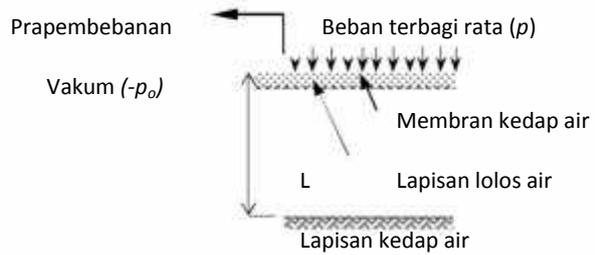
$$U_v = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} e^{-M^2 T_v} \quad (1)$$

$$T_v = \frac{C_v - \tau}{H^2} \quad (2)$$

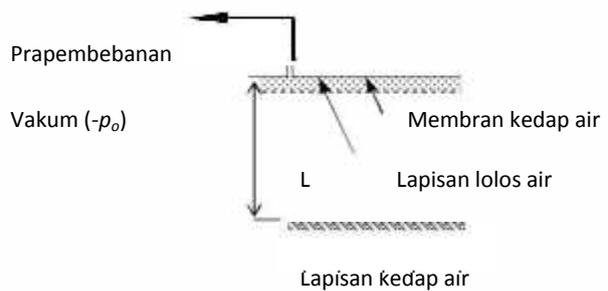
dengan,

T_{vc} = factor waktu gabungan dari vakum dan beban *preloading*

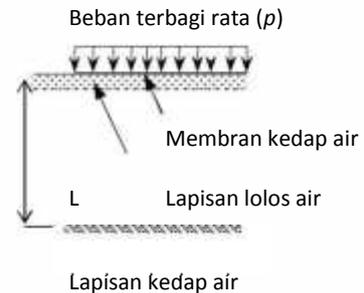
C_{vc} = koefisien konsolidasi gabungan dari vakum dan beban *preloading*



(a) Kombinasi beban terbagi rata dan vakum



(b) Tekanan vakum saja



(c) Beban terbagi rata saja

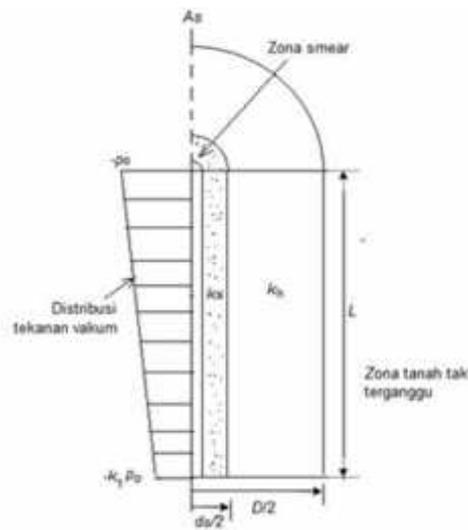
$$(a) = (b) + (c)$$

Gambar 5. Asumsi pembebanan yang digunakan dalam analisis *vacuum preloading* (Mohamedelhasan dan Shang, 2002).

Ketika tekanan vakum diaplikasikan di lapangan melalui PVD, tekanan vakum berkurang dengan bertambahnya kedalaman, karena itu efisiensinya menjadi berkurang (Indraratna et al., 2004). Selain itu, berkembangnya isapan vakum dalam PVD bergantung pada panjang dan tipe PVD (sifat inti dan filternya).

Indraratna et al. (2005a) mengusulkan persamaan konsolidasi radial yang didasarkan pada hasil uji laboratorium yang terkait dengan pola distribusi tekanan vakum, seperti yang

ditunjukkan dalam **Gambar 6**. Dari pengujian ini disimpulkan bahwa efisiensi PVD bergantung pada besar dan distribusi tekanan vakum. Dalam memperhitungkan kehilangan tekanan vakum, maka tekanannya dianggap berbentuk trapesium di sepanjang PVD. Dengan asumsi distribusi tekanan vakum berbentuk trapesium, rasio kelebihan tekanan pori rata-rata ($R_u = p / u_o$) dari silinder drainase radial dengan memperhatikan tekanan vakum dapat dinyatakan oleh persamaan:



Gambar 6. Distribusi tekanan vakum dalam arah vertikal dianggap berbentuk trapesium (Indraratna et al., 2005a).

$$R_u = \left(1 + \frac{r_w}{u_o} \frac{(1-k_1)}{z}\right) e^{-\left(\frac{H r_w}{\mu}\right) - \frac{r_w}{u_o} \frac{(1-k_1)}{z}} \quad (3)$$

$$\mu = \ln\left(\frac{N}{s}\right) + \frac{r_w}{k_h} \ln(s) - 0,75 + \frac{H r_w}{k_h} \left(1 - \frac{[k_h / k_s] - 1}{[k_h / k_s]^{(N/d)}}$$

Dengan :

- p_o = tekanan vakum di puncak drain
- k_1 = rasio antara vakum di puncak dan dasar drain
- u_o = kelebihan tekan pori awal
- z = kedalaman
- L = panjang ekivalen drain
- q_w = kapasitas debit drainase
- k_h = koefisien permeabilitas horizontal tanah dalam zona tak terganggu
- k_s = koefisien permeabilitas horizontal tanah dalam zona tak terganggu (*smear zone*)
- T_h = faktor waktu
- Z = kedalaman
- L = Panjang ekivalen drain
- $N = d_e / d_w$
- D = diameter ekivalen silinder tanah

- d_w = diameter drain = $2r_w$
- $s = d_s / d_w$
- d_s = diameter zona terganggu = $2r_s$

F. Perancangan PVD Dengan Vacuum Preloading

Prosedur untuk menentukan jarak drain (PVD) yang diusulkan Rujikiatkamjorn dan Indraratna (2008) adalah sebagai berikut:

- 1) Tentukan profil lapisan tanah dan sifat-sifatnya dan selanjutnya tentukan kedalaman PVD dan waktu konsolidasi yang diinginkan.
- 2) Asumsikan derajat konsolidasi (U_t) yang dibutuhkan untuk beban timbunan saja.
- 3) Untuk aplikasi tekanan vakum, tentukan tekanan vakum rata-rata (p_o), beban terbagi rata rancangan (*design surcharge*, Δp), dan tekanan beban terbagi rata timbunan (*surcharge fill pressure*, p). Kemudian tentukan derajat konsolidasi yang dibutuhkan dari persamaan:

$$U_{t,v} = \left(\frac{\Delta p}{(p_o + \Delta p)}\right) U_t \quad (5)$$

- 4) Dari data koefisien konsolidasi vertikal (C_v), waktu konsolidasi (t) dan panjang PVD (L), tentukan u^* dengan menggunakan **Gambar 7** atau menggunakan persamaan:

$$u^* = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{t}{(2m+1)^2 \pi^2} e^{-\left[\frac{2m^2 \pi^2}{z^2}\right] \pi^2 C_v t} \quad (6)$$

- 5) Tentukan ukuran PVD dan hitung diameter ekivalennya:

$$d_w = \frac{z(a+b)}{\pi} \quad (7)$$

- 6) Tentukan T_h' dari persamaan:

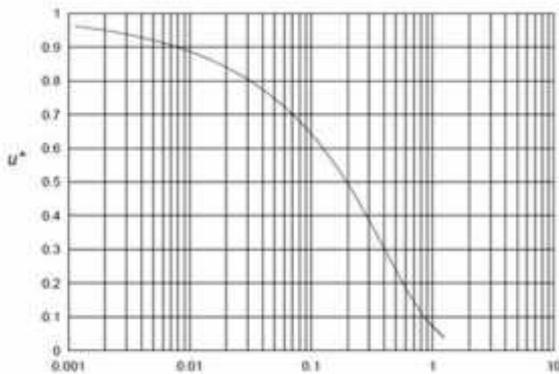
$$T_h' = \frac{c_h t}{d_w^2} \quad (8)$$

- 7) Hitunglah, untuk beban timbunan saja (tanpa vakum):

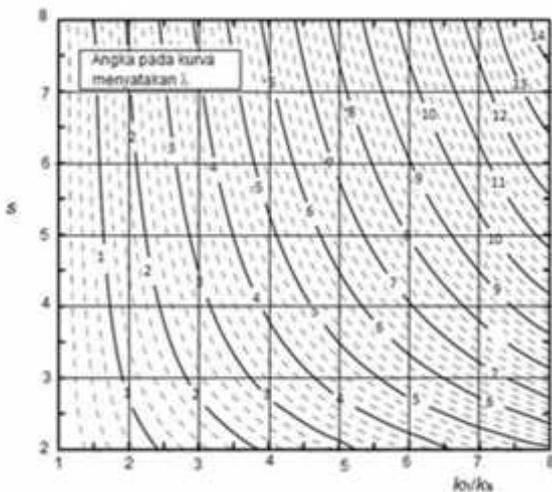
$$y = -\frac{8T_h' r}{k_h \frac{1-U_{t,v}}{u^*}} \quad (9a)$$

Atau, bila dengan tekanan vacuum dan beban timbunan:

$$y = -\frac{8T_h' r}{k_h \frac{1-U_{t,v}}{u^*}} \quad (9b)$$



Gambar 7. Hubungan antara T_v dan u^* (Rujikiatkomjorn dan Indraratna, 2007).



Gambar 8. Penentuan nilai n yang didasarkan pada Persamaan (10) (Rujikiatkomjorn dan Indraratna, 2007).

- 8) Tentukan diameter dan permeabilitas zona terganggu. Hitung dengan menggunakan Gambar 8 atau menggunakan persamaan:

$$\partial = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1 \right) \Pi (s) \quad (10)$$

- 9) Hitung n dengan menggunakan persamaan:

$$n = e^{(\alpha \Pi + \beta)} \quad (11)$$

dengan,

$$\alpha = 0,3938 - (9,505 \times 10^{-4}) \partial^{1,5} + 0,03714 \partial^{0,5} \quad (12a)$$

$$\beta = 0,4203 + (1,456 \times 10^{-4}) \partial^2 - 0,5233 \partial^{0,5} \quad (12b)$$

- 10) Hitung zona pengaruh drain, $D = nd_w$
 11) Pilihlah pola letak pemasangan drainase vertikal (PVD) dan tentukan jaraknya, dengan persamaan:
 $S = D/1,05$ (susunan segitiga sama sisi) atau
 $S = D/1,13$ (susunan bujursangkar).

Berikut ini disajikan contoh cara perancangan prapembebanan vakum dengan mengacu metode Rujikiatkomjorn dan Indraratna (2007).

Timbunan di bangun pada tanah lunak dengan $C_h = 2,45 \text{ m}^2/\text{tahun}$, $C_v = 1 \text{ m}^2/\text{tahun}$, $k_h/k_s = 4,5$, $s = d_s/d_w = 3$. Diinginkan $U_t = 90\%$, panjang PVD, $L = 25 \text{ m}$, $d_w = 35 \text{ mm}$. Beban rancangan maksimum (*maximum design surcharge*), = 120 kPa, tekanan akibat beban timbunan $p = 60 \text{ kPa}$, tekanan vakum $p_o = -60 \text{ kPa}$ (isapan). Hitung jarak PVD untuk waktu 12 bulan dan 18 bulan. Bila digunakan tekanan vakum yang lebih besar, yaitu 90 kPa selama 12 bulan, berapa jarak PVD-nya. Dalam hitungan, tahanan sumur diabaikan.

Penyelesaian dilakukan sebagai berikut:

Untuk waktu konsolidasi $t = 12 \text{ bulan} = 1 \text{ tahun}$ (drainase tunggal atau drainase ke atas saja dengan panjang lintasan drainase $H_t = H$, di mana $H =$ tebal lapisan lempung yang diperhitungkan, yaitu sama dengan panjang drainase vertikal (L). Faktor waktu untuk PVD saja:

$$T_v = \frac{C_v L^2}{H^2} + \frac{1 \times 1}{25^2} = 0,0016$$

Persamaan 5):

$$U_{t,v} = \left(\frac{\Delta \sigma}{p_c + \Delta p} \right) U_t = \left(\frac{1}{6 + 6} \right) \times 0,9 = 0,9$$

Hitung u^* dengan menggunakan Gambar 7 atau Persamaan (6), diperoleh $u^* = 0,91$.

Dari Persamaan (8), untuk $C_h = 2,45 \text{ m}^2/\text{tahun}$, $t = 1 \text{ tahun}$, dan $d_w = 35 \text{ mm} = 0,035 \text{ m}$:

$$T_h^r = \frac{C_h L^2}{d_w^2} = \frac{2,45 \times 1}{0,035^2} = 2000$$

Untuk kasus dengan tekanan vakum dan beban timbunan, maka digunakan Persamaan (9b) :

$$T_h^r = \frac{8 T_h^r}{\Pi \left(\frac{2U_{t,v}}{U^*} \right)} = - \frac{8 \times 2000}{\Pi \left(\frac{2 \times 0,9}{0,9} \right)} = 7245$$

Dari Gambar 8 atau dengan menggunakan Persamaan (10), untuk $s = 3$, $k_h/k_s = 4,5$, diperoleh :

$$\partial = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1 \right) \Pi (s) = (4,5 - 1) \Pi (3) = 3,85$$

Dengan menggunakan **Persamaan (12a)** dan **(12b)**

$$\alpha = 0,3938 - 9,505 \times 10^{-4} \times 3,85^{1,5} + 0,03714 \times 3,85^{1,5} = 0,4595$$

$$\beta = 0,4203 + 1,456 \times 10^{-3} \times 3,85^2 - 0,5233 \times 3,85^{1,5} = 0,5849$$

Dengan menggunakan **Persamaan (11)**:

$$H = e^{(\alpha t + \beta)} = e^{(0,4 \times 7 + (-0,5))} = 33,09$$

$$\text{Dihitung, } D = nd_w = 33,09 \times 0,035 = 1,16 \text{ m}$$

Untuk waktu konsolidasi timbunan $t = 1$ tahun dan derajat konsolidasi $U_t = 90\%$, diperoleh jarak drainase vertikal (PVD), $S = 1,16/1,05 = 1,1$ m (untuk susunan segitiga sama sisi) dan $S = 1,16/1,13 = 1,03$ m (untuk susunan bujursangkar).

b). Untuk waktu konsolidasi $t = 18$ bulan, = 1,5 tahun

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2} = \frac{1 \times 1,5}{2^2} = 0,0$$

Persamaan (5):

$$u_{1,5} = \left(\frac{\Delta \sigma}{\sigma_v + \Delta \sigma} \right) U_t = \left(\frac{120}{60 + 60} \right) \times 0,9 = 0,9 \quad \text{(a)}$$

Hitung u^* dengan menggunakan $T_v = 0,0024$. Dari **Gambar 7** atau **Persamaan (6)**, diperoleh $u^* = 0,94$.

Untuk $C_h = 2,45$ m²/tahun, $t = 1,5$ tahun, dan $d_w = 0,035$ m:

$$T_h^r = \frac{C_h t}{d_w^2} = \frac{2,45 \times 1,5}{0,00035^2} \times 3000$$

Dari **Persamaan (8)**, dengan derajat konsolidasi $U_t = 90\% = 0,90$:

$$y = - \frac{8T_h^r}{\ln \left(\frac{1-U_t}{u^*} \right)} = - \frac{8.3000}{\ln \left(\frac{1-0,9}{0,9} \right)} = 10710$$

Dari **Gambar 8** atau dengan menggunakan **persamaan (10)** :

$$\sigma = \left(\frac{k_1}{k_2} - 1 \right) \ln(s) = (4,5 - 1) \ln 3 = 3,85 \quad \text{(sama soal (a))}$$

Nilai α dan β sama dengan soal (a), yaitu:

$$\alpha = 0,4595$$

$$\beta = 0,5849$$

Dengan menggunakan **Persamaan (11)**:

$$H = e^{(\alpha t + \beta)} = e^{(0,4 \times 7 + (-0,5))} = 39,6$$

$$\text{Dihitung, } D = nd_w = 39,6 \times 0,035 = 1,39 \text{ m}$$

Untuk waktu konsolidasi timbunan $t = 1,5$ tahun dan derajat konsolidasi $U_t = 90\%$, jarak drainase vertikal (PVD), $S = 1,39/1,05 = 1,32$ m (untuk susunan segitiga sama sisi) dan $S = 0,986/1,13 = 1,23$ m (untuk susunan bujursangkar).

G. Kesimpulan

1. Untuk mencapai kecepatan penurunan yang sama, tekanan vakum dapat mereduksi tinggi timbunan yang dibutuhkan. Jadi, sistem vakum dapat mereduksi tinggi timbunan.
2. Gerakan lateral tanah di bawah timbunan dapat dikendalikan oleh PVD yang dikombinasikan dengan tekanan vakum.
3. Efektifitas dari sistem vakum bergantung pada :
 - (a) Kesempurnaan penutupan permukaan dengan membran penutup
 - (b) Kesempurnaan penutupan di bagian tepi dari membran dengan permukaan tanah
 - (c) Kondisi tanah dan lokasi kedalaman muka air tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Choa, V.(1989), *Drains and Vacuum Preloading Pilot Test*, Proceeding of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio dr Janeiro, Brazil, Taylor and Francis Group, UK, pp.1347-1350.
- Chu, J., Yan, S.W., and Yang, H. (2000), *Soil Improvement by The Vacuum Preloading Method for an Oil Storage Station*, Geotechnique, 50(6), pp.625-632.
- Chu, J. and Yan, S.W. (2005), *Application of Vacuum Preloading Method in Soil Improvement Project*. Case Histories Book, Edited by Indraratna, B. And Chu, J. Elsevier, London, Vol.3: 91-118.
- Chu, J., Yan, S.W. and Indraratna (2005), *Vacuum Preloading Techniques - Recent Development and Applications*, In Proceedings of ASCE GeoCongress: Geosustainability and Geohazard Mitigations, New Orleans, ASCE, Reston, VA, USA, pp.586-595.

- CUR, (1996), *Building in Soft Soils*, AA Balkema. Rotterdam, Brookfield.
- Dam, L.T.K., Sadanbata and Kimura, M. (2006), *Vacuum Consolidation Method* - Worldwide Practice and The Latest Improvement in Japan, www.ad-hzm.co.jp/trr/hazama/2006/pdf.
- Griffin, H. and O'Kelly, B.C. (2013), *Ground Improvement by Vacuum Consolidation - a Review*, Proceeding of Institution of Civil Engineer, ICE Publishing.
- Indraratna, B., Rujikiatkomjorn, C., Balasubramaniam, A.S. and Wijeyakulasuriya, V. (2005c), *Prediction and Observations of Soft Clay Foundations Stabilized with Geosynthetic Drain Vacuum Surcharge*. Ground Improvement - Case Histories Book, Edited by Indraratna, B. and Chu, J. Elsevier, London, Vol.3: 199-230.
- Indraratna, B. (2010), *Recent Advances The Application of Vertical Drains and Vacuum Preloading in Soft Soil Stabilization*, Australian Geomechanics Journal, 45(2), pp.1-43.
- Kelly, R.B. and Wong, P.K. (2009), *An Embankment Constructed Using Vacuum Consolidation*, Australian Geomechanics, Vol. 44, June 2009, pp.55-64.
- Kjellman, W. (1952), *Consolidation of Clay Soil by Mean of Atmospheric Pressure*, Proceeding of a Conf. Soil Stabilization, Massachusetts Institute of Technology, Boston, pp.258-263.
- Masse, F., Spaulding, C.A., Wong, I.C and Varaksin, S. (2001), *Vacuum Consolidation: A Review of 12 Years of Successful Development*, Proceeding of 2001: A Geo-Odyssey (Brandon, T.L. (ed.). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA, pp.1-23.
- Mesri, G. and Khan, A.Q. (2012), *Ground Improvement Using Vacuum Loading together with Vertical Drain*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(6), pp.680-689.
- Mohamedelhassan, E. and Shang, J.Q. (2002), *Vacuum and Surcharge Combined One Dimensional Consolidation of Clay Soils*, Canadian Geotechnical Journal, 39(5); pp.1126-1138.
- Robinson, R.G., Indraratna, B., and Rujikiatkomjorn, C. (2012), *Final State of Soil Under Vacuum Preloading*, Canadian Geotechnical Journal, 49(6), pp.729-739
- Rujikiatkomjorn, C. and Indraratna, B., (2007), *Analytical Solutions and Design Curves for vacuum-assisted Consolidation with both and Horizontal Drainage*, Canadian Geotechnical Journal, 44(2), pp.188-200
- Saowapakpiboon, J., Bergado, D.T., Voottipruex, P., Lam, L.G. and Nakakuma, K. (2011), *PVD Improvement Combined with Surcharge and Vacuum Preloading including simulation*, Geotextiles and Geomembranes, 29(1), pp.74-82