

ANALISIS PENGGUNAAN *PREFABRICATED VERTICAL DRAINS (PVD)* PADA TANAH LEMPUNG LUNAK YANG TERDAPAT LAPISAN LENSA

Andreyan Prasetyo¹ dan Aniek Prihatiningsih²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
andreyan.325150125@stu.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
aniekp@ft.untar.ac.id

Masuk: 17-01-2020, revisi: 16-02-2020, diterima untuk diterbitkan: 18-02-2020

ABSTRACT

Problem that often occurs in soft cohesive soils is settlement caused by consolidation process. If construction activities doing when the soils has not been consolidated, settlement can occur. To accelerate the consolidation process, soil improvement are usually do, one method of soil improvement to accelarate the consolidation process is vertical drain using prefabricated vertical drains (PVD). The soft soil layers in the field are not always continuous, sometimes found soft soil layers that have a lens layer. In this study, will discuss about the settlement and consolidation time of soft soil layers that have a lens layer which has been improved by PVD with 1 meter distance. Infrastructure that stand on a location that is installed by PVD is taxiway and loading by Airbus A380 aircraft of 18,22ton/m². Analysis using the 1 dimensional consolidation theory of Terzaghi. For PVD installation to a depth of 50 meters, preloading settlement of 234,80 cm with a consolidation time of 2260 days for the square pattern PVD and 1918 days for triangle pattern PVD. Post loading settlement for PVD installation depth of 50 meters by 2,50 cm.

Keywords : cohesive soils, consolidation, time factor, prefabricated vertical drain (PVD), lens layer.

ABSTRAK

Masalah yang sering terjadi pada tanah kohesif dan lunak adalah penurunan yang disebabkan proses konsolidasi. Penurunan dapat menyebabkan keretakan pada struktur konstruksi yang berada di atasnya. Jika suatu kegiatan konstruksi dilakukan saat tanah belum terkonsolidasi, maka konstruksi tersebut dapat mengalami penurunan.. Untuk mempercepat proses konsolidasi biasanya dilakukan perbaikan tanah, salah satu metode perbaikan tanah untuk mempercepat proses konsolidasi yaitu vertical drain dengan menggunakan *prefabricated vertical drains (PVD)*. Lapisan tanah lunak yang terdapat di lapangan tidak selalu kontinu, terkadang ditemukan lapisan tanah lunak yang terdapat lapisan lensa. Pada penelitian ini, penulis akan membahas mengenai waktu konsolidasi yang dibutuhkan oleh lapisan tanah kohesif dan lunak yang terdapat lapisan lensa yang telah diperbaiki dengan menggunakan PVD berjarak 1 meter. Infrastruktur yang berdiri di atas lokasi yang dipasang PVD berupa taxiway dengan beban berupa pesawat Airbus A380 sebesar 18,22 ton/m². Analisis dilakukan menggunakan teori konsolidasi 1 dimensi Terzaghi. Untuk pemasangan PVD hingga kedalaman 50 meter diperoleh penurunan pra pembebanan sebesar 234,80 cm dengan waktu konsolidasi selama 2260 hari untuk pemasangan PVD pola persegi dan selama 1918 hari untuk pola segitiga . Penurunan pasca pembebanan untuk pemasangan PVD hingga kedalaman 50 meter sebesar 2,5 cm.

Kata kunci : tanah kohesif, konsolidasi, faktor waktu, prefabricated vertical drain (PVD), lapisan lensa.

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur sedang giat dilakukan oleh pemerintah, salah satunya adalah bandar udara. Indonesia terdiri dari banyak pulau, oleh karena itu pembangunan bandar udara dilakukan untuk meningkatkan aksesibilitas penduduk dan juga melancarkan kegiatan distribusi barang. Pada pembangunan bandar udara terutama landasan pacu, hal yang harus diperhatikan adalah beban konstruksi yang berat mencapai 18,22 ton/m² harus dapat ditahan oleh daya dukung tanah pada lokasi konstruksi tersebut.

Hal yang menjadi pertimbangan pada suatu kegiatan konstruksi pada tanah kohesif lunak adalah masalah penurunan konsolidasi. Jika kegiatan konstruksi tetap dilakukan pada saat tanah belum terkonsolidasi sempurna, maka

konstruksi yang berada di atas tanah tersebut akan mengalami penurunan dan terjadi retak. Apabila kegiatan konstruksi baru dimulai saat tanah telah terkonsolidasi, maka akan memerlukan waktu yang sangat lama yaitu bisa mencapai lebih dari 1200 hari. Untuk mempercepat proses konsolidasi dan memperkecil kemungkinan penurunan di masa mendatang, biasanya dilakukan perbaikan tanah terutama pada tanah lempung lunak dan jenuh air yaitu dengan metode *prefabricated vertical drains* (PVD) yang berupa material yang berbentuk pipih terdiri dari saluran inti drainase yang diselimuti oleh geotekstil yang berfungsi sebagai filter (ptgsi.com) bertujuan untuk mempercepat pengeluaran air pori sehingga konsolidasi terjadi lebih cepat. Penggunaan PVD biasanya digabungkan dengan *pre-loading* berupa timbunan tanah dengan tinggi tertentu. PVD umumnya dipasang pada lapisan tanah lunak, namun tidak selamanya kondisi yang ditemukan di lapangan lapisan tanah lunak bersifat kontinu, terkadang ditemukan kondisi dimana terdapat lapisan lensa yaitu lapisan tanah keras yang relatif tipis diantara lapisan tanah lunak.

Perhitungan penurunan pada penelitian ini menggunakan teori konsolidasi 1 dimensi Terzaghi. Untuk membantu proses perhitungan besar dan waktu penurunan yang terjadi digunakan *spreadsheet*. Pada penelitian ini digunakan jarak antar PVD sebesar 1 meter dengan menggunakan pola kotak. Infrastruktur yang berdiri di atas lokasi yang dipasang PVD berupa *taxiway*. Derajat konsolidasi horizontal yang digunakan sebesar 60% dengan hasil penelitian berupa waktu konsolidasi yang dibutuhkan dan besar penurunan yang terjadi.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan kinerja antara PVD pola persegi dengan pola segitiga untuk mempercepat waktu penurunan. Selain itu juga untuk mengetahui waktu konsolidasi yang dibutuhkan oleh lapisan tanah kohesif dan lunak yang terdapat lapisan lensa untuk masing-masing pola PVD yang digunakan serta mengetahui besar penurunan yang terjadi setelah dipasang PVD.

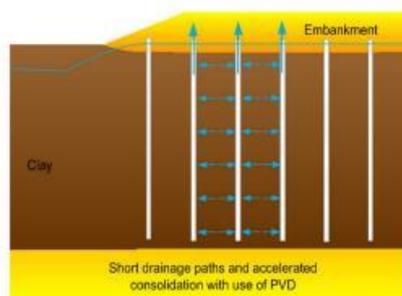
Prefabricated vertical drains (PVD)

Prefabricated vertical drains (PVD) adalah lembaran plastik untuk drainase vertikal yang panjang dan berkantung yang merupakan kombinasi bahan inti (*core*) polypropilene berkekuatan mekanik tinggi dan dibungkus oleh bahan geotekstil seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. *Prefabricated vertical drain* (Sumber: ptgsi.com)

Tujuan dari penggunaan drainase vertikal adalah untuk mempercepat proses penurunan konsolidasi dengan cara mempercepat aliran keluar air pori. (Hausmann, 1990). Pada konsolidasi normal, aliran air pori yang keluar dari tanah sangat lambat dikarenakan permeabilitas yang bekerja hanya pada arah vertikal. Pada penggunaan drainase vertikal, selain permeabilitas arah vertikal juga bekerja permeabilitas arah horizontal yang menuju ke arah drainase vertikal seperti pada Gambar 2.

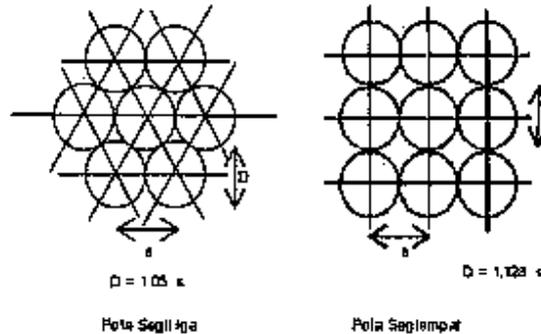


Gambar 2. Skema aliran air pada penggunaan drainase vertikal (Sumber: cofra.com)

Pada Gambar 3. menunjukkan skema dari diameter pengaruh PVD yang merupakan fungsi dari jarak antar yang juga dipengaruhi oleh pola pemasangan PVD dinyatakan dalam persamaan berikut (Aspar dan Fitriani, 2016):

$$D_e = 1,05 S \quad (\text{pola segitiga}) \quad (1)$$

$$D_e = 1,128 S \quad (\text{pola kotak}) \quad (2)$$



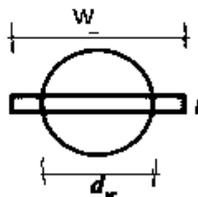
Gambar 3. Pola pemasangan *prefabricated vertical drains* (Sumber: pandu-equator.com)

Parameter faktor jarak drainase (μ) dapat ditunjukkan oleh persamaan dari (Hansbo, 1981):

$$\mu = \ln \frac{n}{s} + \frac{k_h}{k_s} \ln (s) - \frac{3}{4} + \pi \frac{2 l^2 k_h}{3 q_w} \quad (3)$$

$$s = \frac{d_s}{d_w} \quad (4)$$

$$n = \frac{D_e}{d_w} \quad (5)$$



Gambar 4. Diameter ekivalen *vertical drain* (Sumber: Saputro et al.)

Skema dari diameter ekivalen *vertical drain* ditunjukkan pada Gambar 4. yang mengasumsikan ukuran PVD yang berbentuk pipih menjadi lingkaran dengan diameter tertentu. Diameter ekivalen *vertical drain* (d_w) ditentukan dari persamaan berikut:

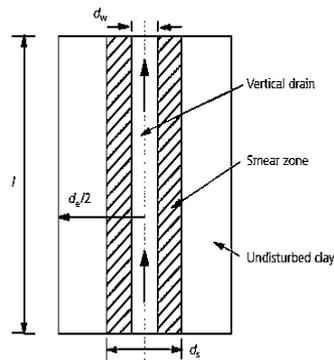
$$d_w = 0,5w + 0,7t \quad (\text{Long dan Covo, 1994}) \quad (6)$$

Smear Zone

Ketika *prefabricated vertical drains* (PVD) dipasang pada tanah lempung lunak menggunakan mandrel, zona yang dirusak disekitar mandrel disebut *smear effect*. Diameter ekivalen *smear zone* dapat ditentukan dari diameter ekivalen PVD dengan koefisien pengali yang ditentukan dari persamaan berikut:

$$d_s = (1,5 \text{ sampai } 3) d_w \quad (\text{Hansbo, 1979}) \quad (7)$$

d_s = diameter ekivalen *smear zone*, d_w = diameter *prefabricated vertical drains* (m)



Gambar 5. Vertical drain dengan smear zone (Sumber: Chu et al., 2014)

Pada Gambar 5., daerah yang diarsir adalah *smear zone* yang timbul akibat tanah lempung yang dirusak oleh mandrel yang menyebabkan permeabilitas pada *smear zone* berkurang secara signifikan (Shen et al., 2005).

Kapasitas pengaliran

Merupakan kemampuan dari *prefabricated vertical drains* (PVD) untuk mengalirkan air dalam satu tahun. Kapasitas pengaliran di lapangan jauh lebih kecil dari yang diberikan oleh pabrikan. Nilai kapasitas pengaliran berkisar antara 100 – 500 m³/tahun. Berdasarkan hasil pengujian, nilai kapasitas pengaliran beberapa produk PVD dapat lebih rendah berkisar antara 5 – 100 m³/tahun di bawah tekanan batas dan gradien hidrolik rendah (Holtz et al., 1991).

Preloading

Preloading menambah daya dukung dan mengurangi kompresibilitas dari tanah lunak. *Preloading* membuat tanah pasiran lepas menjadi padat, ataupun membuat tanah lempung dan lanau terkonsolidasi (Hausmann, 1990). Cara melakukan *preloading* adalah dengan membuat timbunan tanah sementara pada lokasi konstruksi yang direncanakan. Meskipun dapat dilakukan pada semua jenis tanah, *preloading* lebih efektif diterapkan pada tanah kohesif lunak.

Beban total *preloading* berupa timbunan tanah yang diaplikasikan ke tanah asli harus lebih besar atau sama dengan 1,3 kali beban yang direncanakan pada kondisi layan bila efek gaya angkat (*bouyancy effect*) yang diterima beban timbunan pada saat proses *preloading* berlangsung tidak diperhitungkan. Sedangkan jika efek gaya angkat (*bouyancy effect*) yang diterima beban timbunan pada saat proses *preloading* diperhitungkan, maka beban total *preloading* berupa timbunan tanah yang diaplikasikan ke tanah asli harus lebih besar atau sama dengan 1,2 kali beban yang direncanakan pada kondisi layan (SNI 8460:2017).

Permeabilitas

Suatu bahan dikatakan permeabel jika mengandung pori-pori yang menerus. Permeabilitas tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain viskositas cairan, distribusi ukuran pori, distribusi ukuran butir, angka pori, dan derajat kejenuhan dari tanah (Das, 1995). Pada tabel berikut dapat dilihat beberapa jenis tanah dan koefisien permeabilitasnya.

Tabel 1. Koefisien permeabilitas tiap jenis tanah (Das, 1995)

Jenis Tanah	Koefisien Permeabilitas (cm/detik)
Kerikil bersih	1,0 - 100
Pasir kasar	1,0 - 0,01
Pasir halus	0,01 - 0,001
Lanau	0,001 - 0,00001
Lempung	kurang dari 0,000001

(Sumber: Das, 1995)

Penurunan konsolidasi

Penurunan konsolidasi merupakan hasil dari perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat dari keluarnya air yang menempati pori-pori tanah. Pada saat tanah diberi penambahan beban maka tekanan air pori akan meningkat secara mendadak, pada tanah berpasir yang permeabilitas tinggi air pori akan keluar dengan cepat dan penurunan

terjadi dengan segera. Namun pada tanah lempung, nilai permeabilitas rendah dan dibutuhkan waktu yang lama untuk mengalirkan air pori keluar sehingga penurunan yang terjadi lebih lambat karena koefisien permeabilitas lempung sangat kecil yang bernilai hanya sekitar 1×10^{-6} cm/detik dibandingkan dengan koefisien permeabilitas pasir yang mencapai 1 cm/detik. Untuk tanah lempung lunak perubahan volume yang disebabkan oleh keluarnya air pori (konsolidasi) akan terjadi setelah penurunan segera terjadi. Pada umumnya, penurunan konsolidasi lebih besar dan dibutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan penurunan segera (Das, 1995).

Berdasarkan teori konsolidasi satu dimensi oleh Terzaghi, penurunan yang terjadi ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$S_c = H \left[R_R \cdot \log \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{vo}} + C_R \cdot \log \frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_{vm}} \right] \quad (8)$$

Rasio kompresi dapat ditentukan dari indeks pemampatan dan angka pori awal menggunakan persamaan berikut:

$$C_R = \frac{C_c}{1 + e_0} \quad (9)$$

Dari rasio kompresi yang diperoleh dari persamaan (9) dapat dihitung rasio rekompresi dengan menggunakan persamaan berikut:

$$R_R = \frac{C_R}{1 + e_0} \quad (10)$$

S_c = penurunan primer, H = tebal lapisan terkonsolidasi, C_R = rasio kompresi, R_R = rasio rekompresi, σ'_{vm} = tekanan prakompresi, σ'_{vo} = tekanan efektif overburden, $\Delta\sigma_v$ = penambahan beban

Indeks pemampatan

Indeks pemampatan digunakan untuk menghitung besarnya penurunan yang terjadi di lapangan sebagai akibat dari konsolidasi. Persamaan empiris untuk menghitung indeks pemampatan dari parameter batas cair (*liquid limit*) disarankan oleh Terzaghi dan Peck (1967):

Untuk lempung yang struktur tanahnya tidak terganggu (*undisturbed*):

$$C_c = 0,009 (LL - 10) \quad (11)$$

Untuk lempung yang dibentuk kembali (*remolded*):

$$C_c = 0,007 (LL - 10) \quad (12)$$

Perumusan lain untuk menghitung indeks pemampatan untuk macam-macam jenis lempung tersedia pada Tabel 2.

Tabel 2. Persamaan indeks pemampatan

Persamaan	Acuan	Kondisi Pemakaian
$C_c = 0,007 (LL-7)$	Skempton	Lempung yang terbentuk kembali (<i>remolded</i>)
$C_c = 0,01 W_N$		Lempung Chicago
$C_c = 1,15 (e_0-0,27)$	Nishida	Semua Lempung
$C_c = 0,30 (e_0 - 0,27)$	Hough	Tanah kohesif anorganik, lanau, lempung berlanau
$C_c = 0,0115 W_N$		Tanah organik, gambut, lanau organik, dan lempung
$C_c = 0,0046 (LL-9)$		Lempung Brazilia
$C_c = 0,75 (e_0-0,5)$		Tanah dengan plastisitas rendah
$C_c = 0,208 e_0 + 0,0083$		Lempung Chicago
$C_c = 0,156 e_0 + 0,0107$		Semua Lempung

C_c = indeks pemampatan, LL = batas cair, e_0 = angka pori awal, W_N = kadar air tanah di lapangan
 (Sumber: Das, 1995)

Indeks pemuai

Indeks pemuai bernilai lebih kecil daripada indeks pemampatan. Indeks pemuai dapat ditentukan dari hasil laboratorium atau dapat ditentukan dari persamaan berikut (Terzaghi dan Peck, 1967):

$$C_s = \frac{1}{5} \text{ sampai } \frac{1}{10} C_c \quad (13)$$

C_s = indeks pemuai

Derajat konsolidasi

Persamaan yang diberikan oleh Baron (1948) yang berhubungan dengan konsolidasi arah horizontal yang terdiri dari derajat konsolidasi horizontal, faktor waktu konsolidasi horizontal, dan koefisien konsolidasi horizontal sebagai berikut:

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8 T_h}{F}\right) \quad (14)$$

$$T_h = \frac{C_h \cdot T}{D e^2} \quad (15)$$

$$C_h = \frac{-D e^2 \cdot \mu \cdot \ln(1 - U_h)}{8 T} \quad (16)$$

Sedangkan untuk menghitung derajat konsolidasi vertikal dan faktor waktu konsolidasi vertikal dapat diketahui dari persamaan berikut:

$$U_v = \sqrt{\frac{4 T_v}{\pi}} \quad (17)$$

$$T_v = \frac{C_v}{d^2} T \quad (18)$$

$$T_v = -0,933 \log(1 - U_v) - 0,085 \quad (19)$$

$$d = H \quad \text{untuk drainase 1 arah} \quad (20)$$

$$d = \frac{1}{2} H \quad \text{untuk drainase 2 arah} \quad (21)$$

Derajat konsolidasi rata-rata kombinasi dari konsolidasi vertikal dan horizontal dapat diperoleh dari persamaan berikut (Walker dan Indrarnatna, 2006):

$$U = 1 - (1 - U_h)(1 - U_v) \quad (22)$$

Batas penurunan timbunan (konsolidasi) pada penggunaan *prefabricated vertical drains* (PVD) minimum mencapai derajat konsolidasi 90% atau sesuai persyaratan perancangan (SNI 8460:2017).

Koefisien konsolidasi

Koefisien konsolidasi berbanding terbalik dengan batas cair dari tanah. Semakin besar batas cair maka nilai koefisien konsolidasi akan semakin kecil. Nilai koefisien konsolidasi dapat ditentukan dengan dua metode, yaitu metode logaritma waktu yang diperkenalkan oleh Casagrande dan Fandum (1940) dan metode akar waktu yang diperkenalkan oleh Taylor (1942) yang dikutip dari Das (1995).

Untuk menghitung nilai koefisien konsolidasi dengan menggunakan metode logaritma waktu dapat digunakan persamaan berikut (Casagrande dan Fandum, 1940):

$$C_v = \frac{0,197 H_{dr}^2}{t_{50}} \quad (23)$$

Metode akar waktu yang diperkenalkan oleh Taylor (1942) menyarankan persamaan berikut untuk menghitung koefisien konsolidasi:

$$C_v = \frac{0,848 H_{dr}^2}{t_{50}} \quad (24)$$

Data teknis pesawat terbang Airbus A380

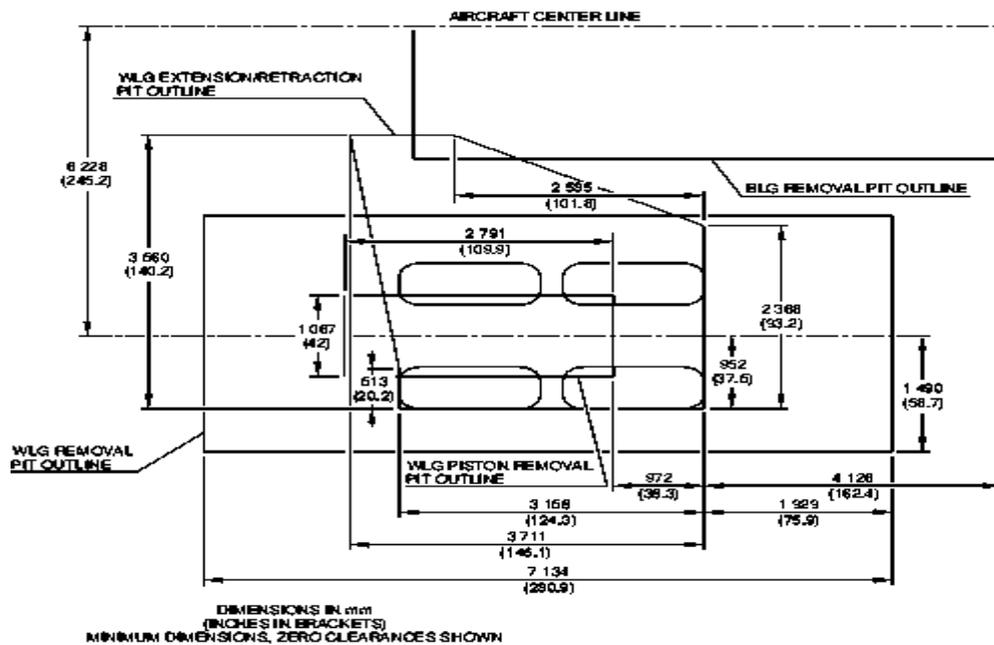
Pada penelitian ini digunakan infrastruktur berupa *taxiway* dengan beban berupa pesawat Airbus A380. Berat pesawat dibutuhkan untuk keperluan perencanaan tebal lapisan perkerasan lapangan terbang. Untuk merencanakan tebal lapis perkerasan pada bagian *taxiway* digunakan *Maximum Taxi Weight* (MTW). Data berat pesawat Airbus A380 dapat dilihat pada Tabel 3. dengan varian pesawat Airbus A380 yang digunakan yaitu WV011.

Tabel 3. Berat pesawat Airbus A380-800 varian WV010 sampai dengan WV014

Aircraft Characteristics					
	WV010	WV011	WV012	WV013	WV014
Maximum Ramp Weight (MRW)	482000 kg	577000 kg	571000 kg	494000 kg	574000 kg
Maximum Taxi Weight (MTW)	(1052628 lb)	(1272067 lb)	(1258839 lb)	(1089083 lb)	(1265453 lb)
Maximum Take-Off Weight (MTOW)	480000 kg	575000 kg	569000 kg	492000 kg	572000 kg
	(1058219 lb)	(1128658 lb)	(1254430 lb)	(1084674 lb)	(1261044 lb)
Maximum Landing Weight (MLW)	388000 kg	395000 kg	395000 kg	386000 kg	391000 kg
	(850984 lb)	(870826 lb)	(870826 lb)	(850984 lb)	(862007 lb)
Maximum Zero Fuel Weight (MZFW)	361000 kg	369000 kg	366000 kg	361000 kg	366000 kg
	(795869 lb)	(813506 lb)	(806892 lb)	(795869 lb)	(806892 lb)

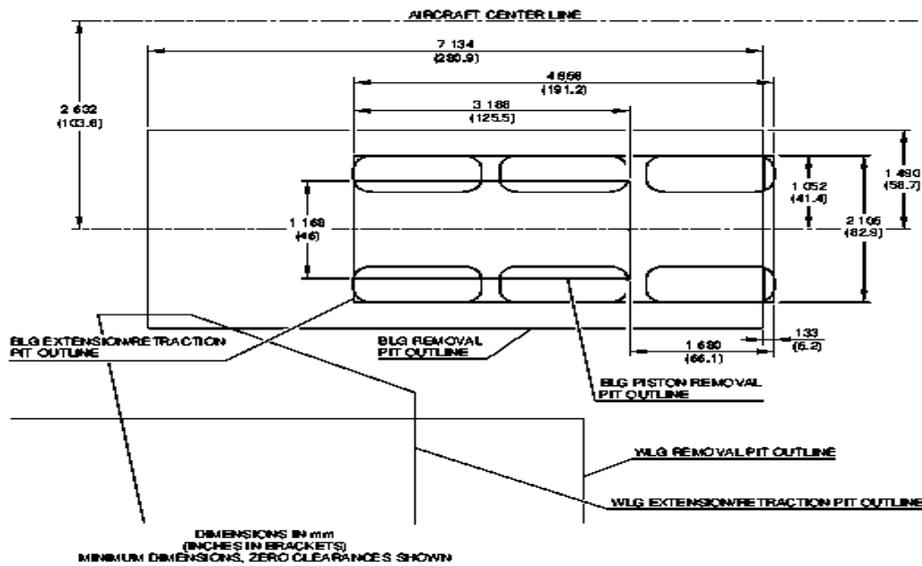
(Sumber: Airbus S. A. S, 2005)

Untuk memperoleh beban yang diberikan oleh pesawat ke lapisan perkerasan, maka berat pesawat harus dibagi dengan luasan roda pesawat. Pesawat Airbus A380 memiliki tiga tipe roda yang terdiri dari *noise gear*, *body gear*, dan *wing gear*. *Body gear* dan *wing gear* yang digunakan untuk analisis karena distribusi beban kedua tipe roda tersebut lebih besar dari pada distribusi beban ke *noise gear*.



Gambar 6. Dimensi *wing gears* pesawat Airbus A380-800 (Sumber: Airbus S. A. S, 2005)

Pada Gambar 6. menunjukkan dimensi dari *wing gear* pesawat Airbus A380-800, *wing gears* terletak pada sayap pesawat. Dimensi dari *body gear* pesawat Airbus A380-800 pada Gambar 7., letak dari *body gears* yaitu pada bagian badan pesawat.



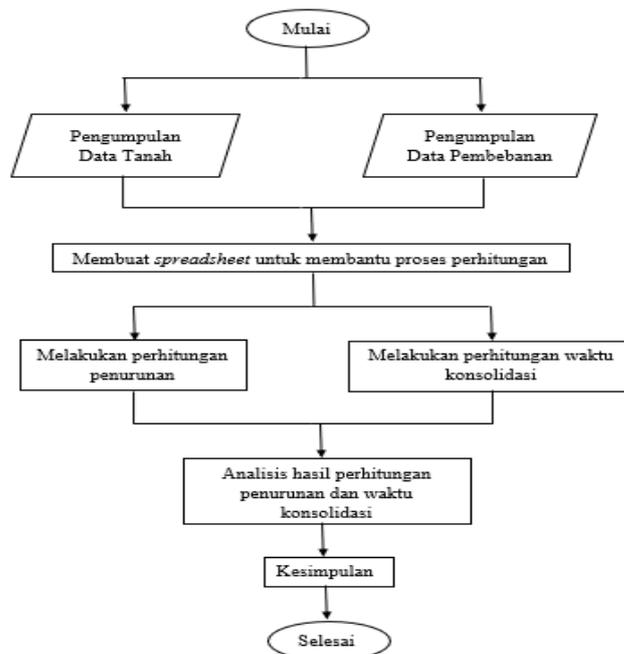
Gambar 7. Dimensi *body gears* pesawat Airbus A380-800 (Sumber: Airbus S. A. S, 2005)

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan cara mengumpulkan data tanah yang memiliki kondisi tanah kohesif lunak jenuh air dengan lapisan lensa. Selain data tanah, penulis juga mengumpulkan data pembebanan berupa data berat pesawat dan dimensi roda pesawat Airbus A380 serta memperoleh gambar potongan melintang *taxiway* Bandara Internasional Soekarno-Hatta untuk dilakukan analisis. Kemudian penulis membuat *spreadsheet* untuk membantu proses perhitungan. Setelah itu dilakukan perhitungan waktu dan besar penurunan konsolidasi yang terjadi dengan menggunakan *spreadsheet* yang telah dibuat. Setelah diperoleh hasil perhitungan, penulis menganalisis hasil perhitungan untuk diambil kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

Diagram alir penelitian

Gambar 8 adalah diagram alir dari penelitian yang dilakukan yang menjelaskan tahap-tahap penelitian mulai dari pengumpulan data, analisis, hingga pengambilan kesimpulan.



Gambar 8. Diagram alir penelitian

3. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Spesifikasi *prefabricated vertical drains (PVD)* yang digunakan

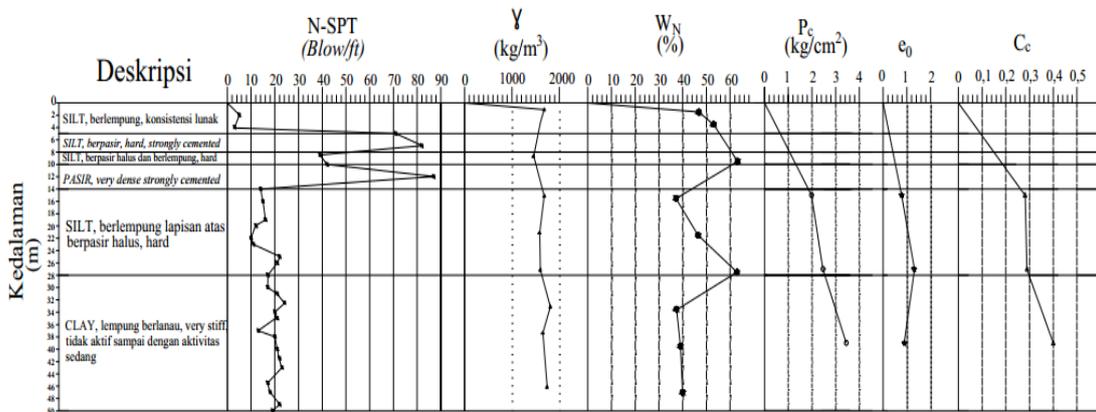
Berikut ini merupakan spesifikasi PVD yang digunakan dalam penulisan skripsi ini. Spesifikasi teknis diambil dari suatu produk PVD.

Tabel 4. Data spesifikasi PVD

Kapasitas pengaliran	$\geq 100 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{detik}$
Lebar	100 mm
Tebal	3 mm
Jarak antar PVD	1 m

Data tanah

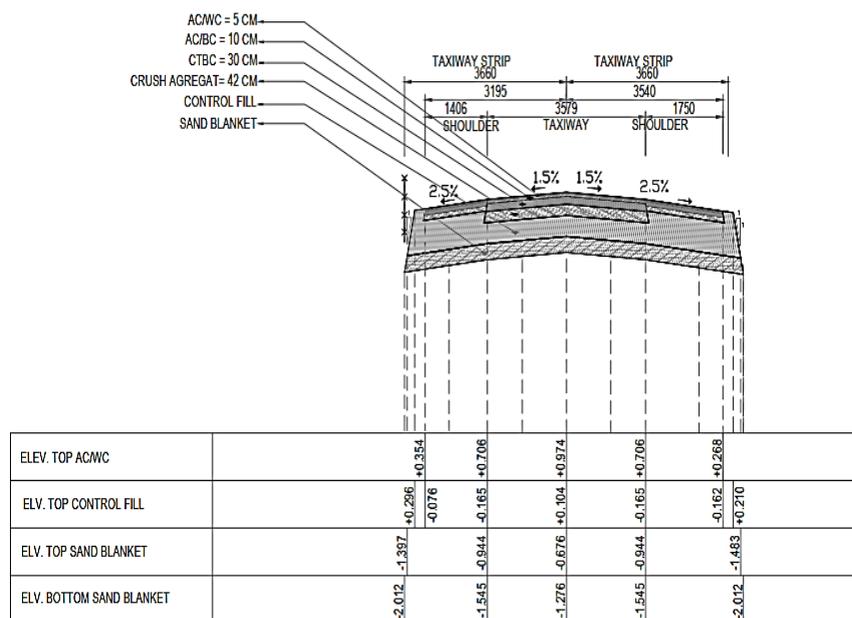
Pada penulisan skripsi ini digunakan data tanah di wilayah Kembangan, Jakarta Barat yang ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Data tanah

Potongan melintang *taxiway*

Untuk pembebanan digunakan infrastruktur berupa *taxiway* Bandara Internasional Soekarno-Hatta. Potongan melintang dari *taxiway* dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Potongan melintang *taxiway*

Menentukan derajat konsolidasi

Digunakan derajat konsolidasi horizontal sebesar 60% dengan derajat konsolidasi rata-rata yang direncanakan sebesar 90% sesuai dengan persyaratan yang diberikan pada SNI 8460:2017 tentang konsolidasi minimum penggunaan *prefabricated vertical drains* (PVD). Derajat konsolidasi horizontal rencana dan derajat konsolidasi rata-rata rencana diinput ke dalam *spreadsheet* seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Input parameter derajat konsolidasi di *spreadsheet*

Derajat konsolidasi rata-rata rencana (U)	90	%
Derajat konsolidasi horizontal rencana (U_h)	60	%

Menentukan parameter *prefabricated vertical drains* (PVD)

Tabel 6. Input parameter PVD di *spreadsheet*

Lebar PVD (w)	100	mm
Tebal PVD (t)	3	mm
Jarak PVD (S)	1	m
<i>Discharge capacity</i> (q_w)	0,0001	m ³ /detik

Input data parameter PVD di *spreadsheet* ditunjukkan seperti pada Tabel 6. Parameter yang diinput terdiri dari lebar dan tebal PVD, memilih pola PVD yang digunakan, jarak antar PVD, dan kapasitas pengaliran.

Input data tanah

Tanah dibagi menjadi beberapa lapisan, dalam menentukan lapisan tanah menggunakan acuan berdasarkan lapisan tanah di *boring log*, lapisan lensa, dan juga berdasarkan kedalaman muka air tanah untuk memudahkan input berat jenis efektif tanah dan parameter lainnya. Untuk berat jenis tanah yang diinput adalah berat jenis efektif tanah, data parameter tanah yang diinput ke dalam *spreadsheet* terdiri dari koefisien permeabilitas, angka pori awal, koefisien pemadatan tanah asli, koefisien pemadatan tanah yang telah dipadatkan, koefisien konsolidasi, berat jenis efektif, kadar air, dan tekanan pra konsolidasi.

Tabel 7. Input data tanah di *spreadsheet*

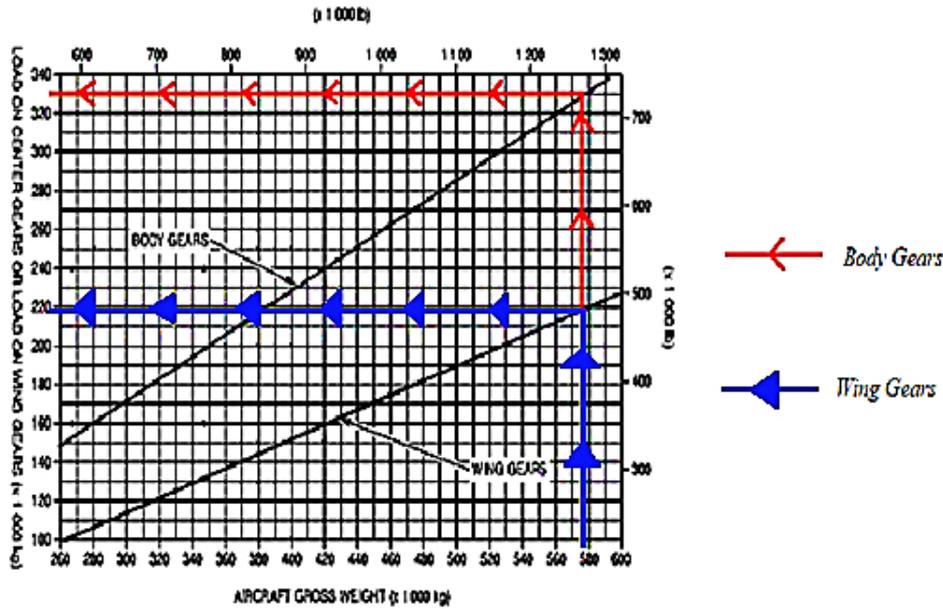
Lapisan Tanah	Koefisien Permeabilitas (cm/detik)	e_0	C_c Tanah Asli	C_v (cm ² /menit)	γ' (kg/m ³)	W_N (%)	P_c (kg/cm ²)	C_c Tanah Dipadatkan
Lapisan ke-1	0,00001	0,782	0,281	0,0175	1681	53,05	1,98	0,19
Lapisan ke-2	0,00001	0,782	0,281	0,0175	606	53,05	1,98	0,19
Lapisan ke-3	0,00001	0,782	0,281	0,0175	461	63,16	1,98	0,19
Lapisan ke-4	0,001	0,782	0,281	0,0175	461	37,21	1,98	0,19
Lapisan ke-5	0,00001	1,305	0,289	0,015	682	46,52	2,46	0,19
Lapisan ke-6	0,00001	1,305	0,289	0,015	584	62,89	2,46	0,19
Lapisan ke-7	0,00001	1,305	0,289	0,015	600	62,89	2,46	0,19
Lapisan ke-8	0,000001	0,899	0,4	0,0175	811	39,11	3,44	0,19
Lapisan ke-9	0,000001	0,899	0,4	0,0175	653	39,55	3,44	0,19
Lapisan ke-10	0,000001	0,899	0,4	0,0175	742	39,55	3,44	0,19

Menentukan dimensi dan berat timbunan

Digunakan timbunan setinggi 3 m dengan lebar bagian bawah timbunan 12,5 m dan lebar bagian atas timbunan 6,5 m. Timbunan berupa campuran lempung dengan pasir dengan komposisi 60% lempung dan 40% pasir, maka diperoleh berat jenis timbunan sebesar 1520 kg/m³ dengan berat timbunan sebesar 43320 kg/m.

Beban pesawat Airbus A380

Digunakan pesawat Airbus A380 dengan karakteristik pesawat WV011 yang memiliki *maximum taxi weight* (MTW) sebesar 577000 kg. Dari *maximum taxi weight* (MTW) yang telah diperoleh diplot pada grafik distribusi berat pesawat ke *body gears* dan *wing gears* seperti pada Gambar 14.



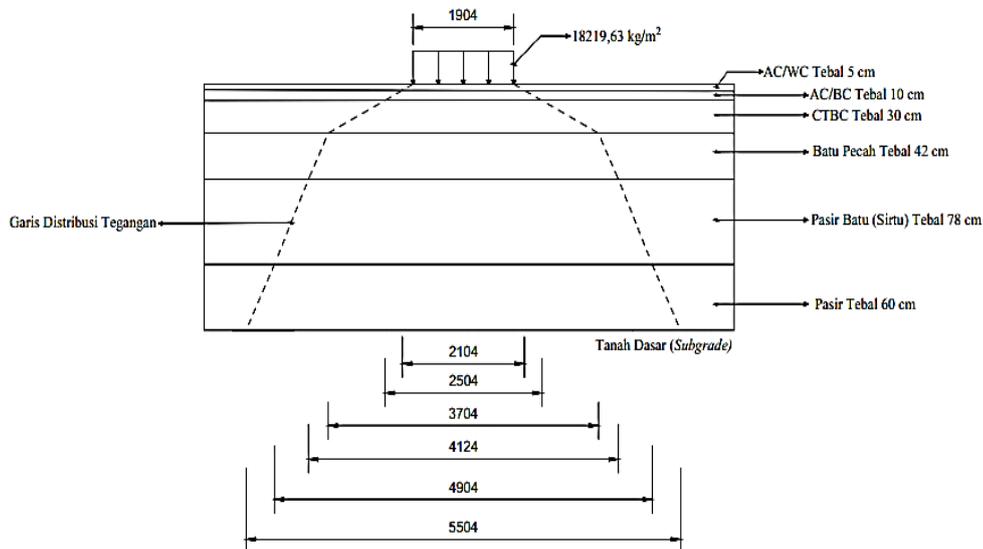
Gambar 11. Mencari distribusi berat pesawat ke *wing gears* dan *body gears*

Dari grafik diperoleh distribusi berat pesawat ke *wing gears* sebesar 219000 kg dan 330000 kg ke *body gears*. Berat tersebut merupakan berat yang diterima sepasang *wing gears* ataupun *body gears*. Oleh karena itu, berat pesawat yang diperoleh dari grafik harus dibagi 2 untuk mendapat berat yang diterima oleh satu *wing gear* ataupun *body gear*. Maka berat pesawat yang diterima oleh *wing gear* adalah 109500 kg dan berat pesawat yang diterima oleh *body gear* adalah 165000 kg. Untuk mendapatkan tekanan yang diberikan roda pesawat ke lapisan perkerasan, berat pesawat yang diterima *wing gear* dan *body gear* harus dibagi luas area masing-masing.

Dari ukuran area *wing gear* dan *body gear* yang terdapat pada Gambar 6 dan Gambar 7 diperoleh luas area *wing gear* sebesar 6,01 m² dan luas area *body gear* sebesar 10,25 m². Diperoleh tekanan yang diberikan roda pesawat ke lapisan perkerasan sebesar 18219,63 kg/m² untuk *wing gear* dan 16144,81 kg/m² untuk *body gear*. Tekanan dari *wing gear* yang digunakan untuk analisis, karena tekanan dari *wing gear* lebih besar dari tekanan *body gear*.

Distribusi tegangan pada lapisan perkerasan

Tegangan dari roda pesawat disalurkan ke lapisan tanah dasar mengikuti pola garis penyebaran tegangan seperti pada Gambar 12. Kemiringan garis penyebaran tegangan lapisan AC/WC, AC/BC, dan CTBC sebesar 1:2. Sedangkan kemiringan garis penyebaran tegangan untuk lapisan batu pecah, pasir batu (sirtu), dan pasir sebesar 2:1.



Gambar 12. Distribusi tegangan dari roda pesawat hingga tanah dasar

Dari hasil perhitungan distribusi tegangan diperoleh tegangan yang berkerja pada tanah dasar (*subgrade*) sebesar 4732,97 kg/m². Data-data timbunan dan pembebanan seperti dimensi timbunan, berat jenis tanah timbunan, tegangan yang bekerja pada tanah dasar diinput ke dalam *spreadsheet* seperti pada Tabel 8.

Tabel 8. Input data timbunan dan pembebanan di *spreadsheet*

Tinggi timbunan (h)	3	m
Lebar bagian bawah timbunan (B)	12,5	m
Lebar bagian atas timbunan (b)	6,5	m
γ timbunan	1520	kg/m ³
Beban yang berkerja	7104,5	kg/m ²

Diameter pengaruh *prefabricated vertical drains* (PVD)

Diameter pengaruh PVD dipengaruhi oleh jarak antar PVD dan pola pemasangan PVD. Pada penulisan skripsi ini digunakan jarak antar PVD sebesar 1 m diperoleh diameter pengaruh PVD sebesar 1,128 m untuk pemasangan PVD pola persegi dan sebesar 1,05 m untuk pola segitiga.

Diameter ekivalen *prefabricated vertical drains* (PVD)

Digunakan persamaan dari Long dan Covo (1994) untuk menghitung diameter ekivalen PVD. Diameter ekivalen dipengaruhi oleh tebal dan lebar penampang PVD yang digunakan. Penampang PVD yang digunakan memiliki tebal 3 mm dengan lebar 100 mm. Dengan ukuran penampang tersebut diperoleh diameter ekivalen PVD sebesar 52,1 mm.

Diameter *smear zone*

Menurut persamaan yang diberikan Hansbo (1997), nilai diameter *smear zone* berkisar antara 1,5 sampai 3 kali dari diameter ekivalen PVD. Pada penulisan skripsi ini digunakan diameter *smear zone* sebesar 2 kali diameter ekivalen PVD. Dari hasil perhitungan diperoleh diameter *smear zone* sebesar 104,2 mm.

Rasio diameter pengaruh dengan diameter ekivalen *prefabricated vertical drains* (PVD)

Rasio diameter pengaruh dengan diameter ekivalen PVD sebesar 21,65 untuk pola persegi dan sebesar 20,15 untuk pola segitiga yang diperoleh dari perbandingan antara diameter pengaruh sebesar 112,80 cm untuk pola persegi dan 105 cm untuk pola segitiga dengan diameter ekivalen PVD sebesar 5,21 cm.

Rasio diameter ekivalen *smear zone* dengan diameter ekivalen *prefabricated vertical drains* (PVD)

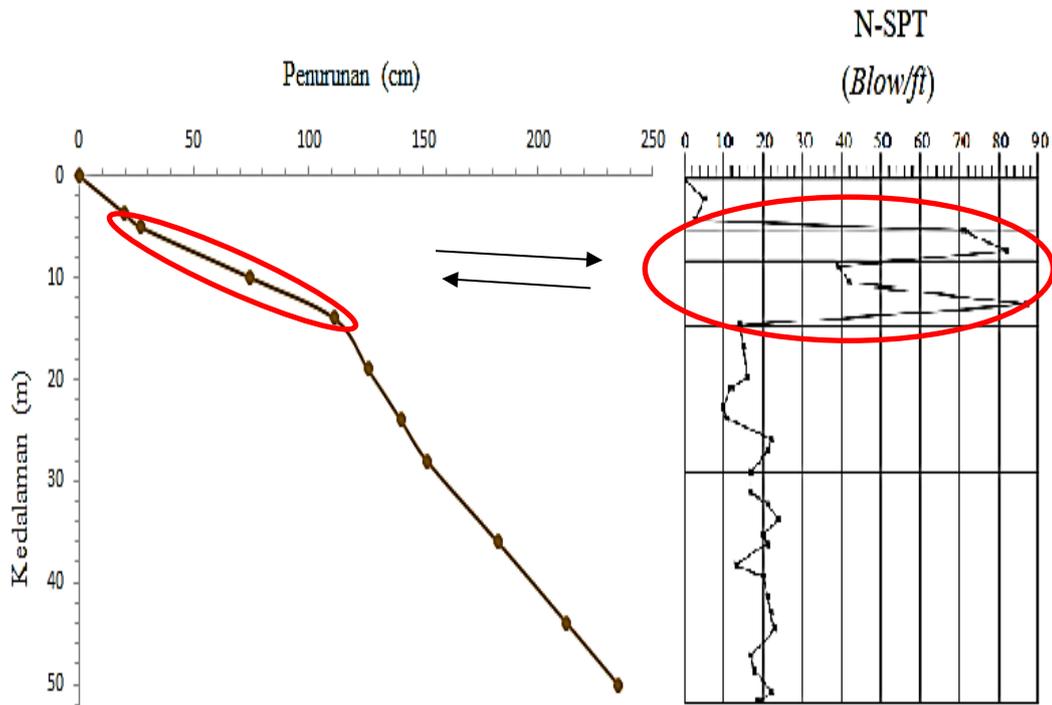
Rasio diameter ekivalen *smear zone* dengan diameter ekivalen PVD sebesar 2 yang diperoleh dari perbandingan antara diameter ekivalen *smear zone* sebesar 104,2 cm dengan diameter ekivalen PVD sebesar 5,21 cm.

Hasil perhitungan waktu dan besar penurunan

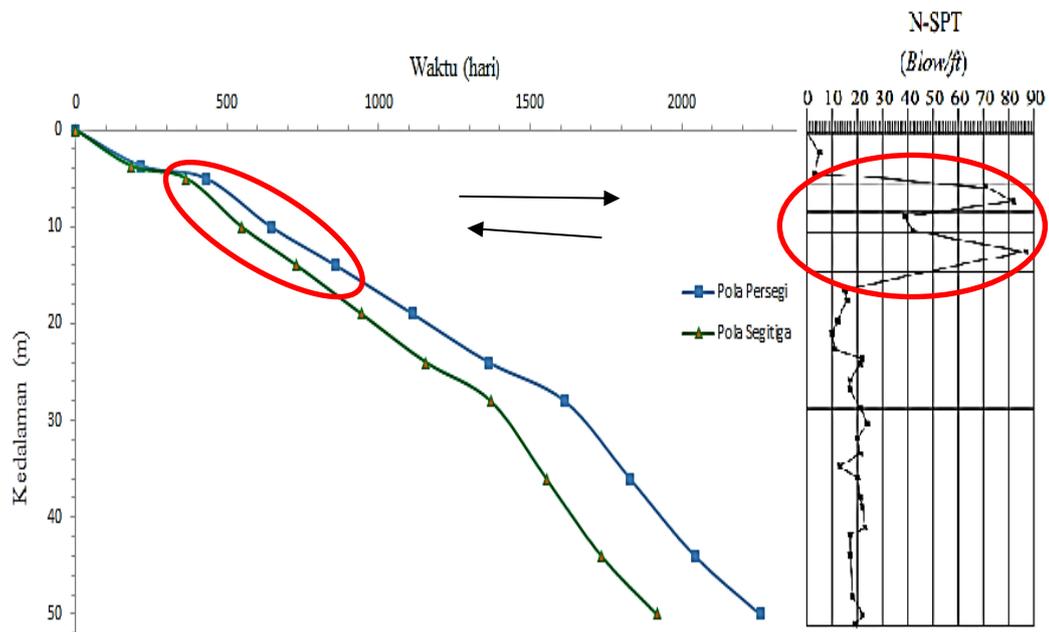
Berikut ini merupakan hasil perhitungan waktu dan besar penurunan yang disajikan pada Tabel 9. Dari tabel tersebut dapat dilihat besar penurunan pra-pembebanan maksimum sebesar 234,80 cm dengan waktu penurunan selama 2260 hari untuk pola persegi dan selama 1918 hari untuk pola segitiga serta penurunan pasca pembebanan sebesar 2,5 cm pada pemasangan *prefabricated vertical drains* (PVD) untuk kedalaman 50 m.

Tabel 9. Hasil perhitungan waktu dan besar penurunan

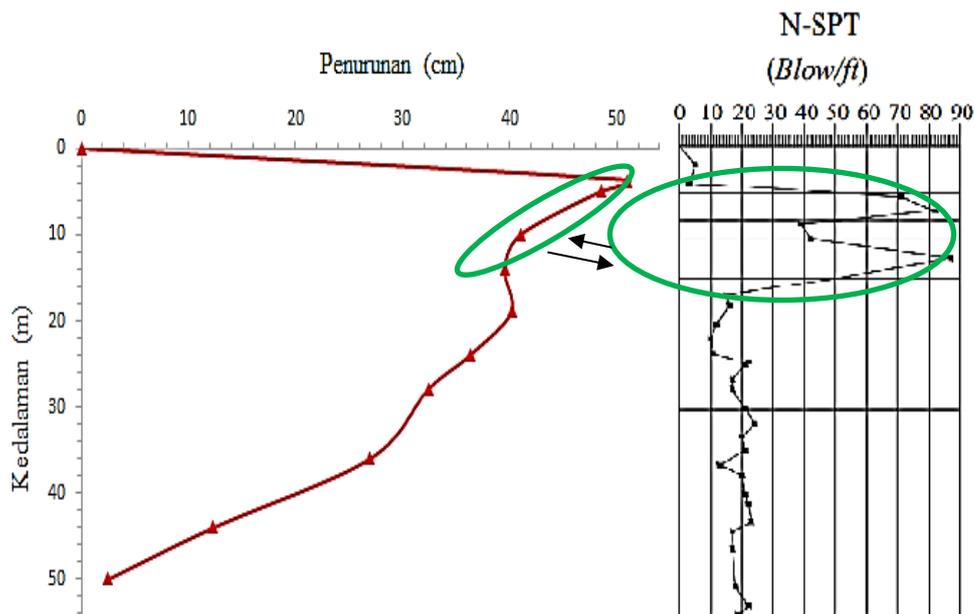
Panjang PVD (m)	Waktu (hari)		Penurunan (cm)	
	Pola Persegi	Pola Segitiga	Pra Pembebanan	Pasca Pembebanan
3,7	215	183	19,9	51,3
5	430	365	26,6	49,0
10	644	548	74,6	42,7
14	859	730	111,1	42,0
19	1113	944	125,9	42,5
24	1364	1157	140,2	38,5
28	1615	1370	151,5	34,4
36	1830	1553	182,4	28,4
44	2045	1735	212,5	13,1
50	2260	1918	234,8	2,5



Gambar 13. Grafik penurunan pada tahap pra-pembebanan terhadap kedalaman pemasangan PVD



Gambar 14. Grafik waktu penurunan terhadap kedalaman pemasangan PVD



Gambar 15. Grafik penurunan pasca pembebanan terhadap kedalaman pemasangan PVD

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kedalaman efektif pemasangan *prefabricated vertical drains* (PVD) adalah 50 m. Pada kedalaman tersebut dapat dicapai penurunan pasca pembebanan sebesar 2,5 cm seperti pada Gambar 15.
2. Untuk pemasangan PVD pada kedalaman 50 m dibutuhkan waktu penurunan selama 2260 hari untuk pola persegi dan selama 1918 hari untuk pola segitiga yang diperoleh dari grafik hubungan waktu penurunan terhadap kedalaman pemasangan PVD pada Gambar 14.
3. Waktu penurunan pada pemasangan PVD pola segitiga hanya membutuhkan 80% dari waktu penurunan pada pola persegi seperti pada Tabel 9. Hal ini membuktikan pemasangan PVD pola segitiga lebih efektif dibandingkan pola persegi.
4. Laju penurunan pra pembebanan rata-rata pada lapisan lensa sekitar 0,19 cm/hari untuk pola persegi dan sekitar 0,23 cm/hari untuk pola segitiga. Sedangkan untuk laju penurunan pra pembebanan rata-rata pada lapisan tanah yang berada di atas lapisan lensa sekitar 0,06 cm/hari untuk pola persegi dan sekitar 0,07 cm/hari untuk pola segitiga, serta laju penurunan pra pembebanan rata-rata pada lapisan tanah yang berada di bawah lapisan lensa sekitar 0,10 cm/hari untuk pola persegi dan sekitar 0,11 cm/hari untuk pola segitiga. Angka laju penurunan diperoleh dari hasil perbandingan antara selisih penurunan dengan selisih waktu penurunan pada Tabel 9.
5. Penurunan pasca pembebanan pada lapisan lensa berkurang hingga 42 cm kemudian kembali meningkat hingga mencapai 42,5 cm pada kedalaman 19 m dan kembali berkurang hingga mencapai 2,5 cm pada kedalaman 50 m seperti pada grafik hubungan kedalaman pemasangan PVD terhadap penurunan pasca pembebanan yang terdapat pada Gambar 15.
6. Pemasangan PVD pada lapisan lensa dibutuhkan waktu konsolidasi rata-rata 52 hari untuk setiap 1 meter kedalaman PVD sedangkan untuk pemasangan PVD pada lapisan tanah yang berada di bawah lapisan lensa dibutuhkan waktu konsolidasi rata-rata 30 hari untuk setiap 1 meter kedalaman PVD.

Dengan penggunaan PVD sedalam 50 m, maka tanah dengan kondisi seperti pada penelitian ini dapat dibangun landasan terbang dengan pesawat rencana Airbus A380 ataupun sejenisnya. Hal ini dapat diaplikasikan di Indonesia sehingga dapat meningkatkan aksesibilitas terutama bagi wisatawan asing, karena mayoritas pesawat terbang yang melayani rute antar negara menggunakan pesawat berbadan lebar seperti Airbus A380 dan sejenisnya.

Saran

Untuk penelitian yang lebih lanjut, penulis memberikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Untuk memperoleh waktu penurunan yang lebih cepat, pada penelitian selanjutnya disarankan menggunakan jarak antar PVD kurang dari 1 m.
2. Pada penelitian ini penulis menggunakan tinggi timbunan sebesar 3 m dan memperoleh besar penurunan pra pembebanan sebesar 234,80 cm. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan timbunan lebih tinggi dari 3 m agar diperoleh penurunan pra pembebanan yang lebih besar.
3. Menggunakan metode lain yang dapat mempercepat waktu penurunan seperti metode *vacuum preloading*, dikombinasikan dengan metode *dynamic compaction* pada timbunan atau tanah timbunan digiling menggunakan *sheep foot roller*.

DAFTAR PUSTAKA

- Airbus S.A.S. Customer Service Technical Data Support and Services, *A380 Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning*. Airbus S.A.S., 2005.
- Aspar, Wimpie, A. N., dan Eka N. Fitriani, "Pengaruh Jarak dan Pola *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) Pada Perbaikan Tanah Lempung Lunak". *Makalah Ilmiah Pengkajian Industri*, vol. 10, no. 1, 2016, pp. 41-50.
- Baron., R. A. "Consolidation of Fined-grained Soils by Drain Wells". *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, vol. 113, no. 1, 1948, pp. 718-742.
- Cai, A. S. Balasubramaniam H., Zhu, D., Surarak, C., dan Oh, E. Y. N. "Settlements of Embankments In Soft Soils". *Geotechnical Engineering Journal of SEAGS & AGSSEA*, vol. 41, no. 2, 2010, pp. 1-19.
- Vertical Drains*. 25 Agustus 2019: cofra.com/solutions/consolidation/vertical-drains.html.
- Das, Braja M. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*. ed 2, Jakarta: Erlangga, 1995.
- Hansbo, S. "Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricated Drains". *Ground Engineering*, vol. 12, no. 5, 1979, pp. 16-27.
- Hansbo, S. "Consolidation of Fine-grained Soils by Prefabricated Drains", *Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm*, vol. 3, 1981, pp. 677-682.
- Hausmann, Manfred R., *Engineering Principles of Ground Modification*. McGraw-Hill, 1990.
- Holtz, R. D., et al, *Laboratory Testing of Prefabricated "Wick" Drains*. Butterworth Heinemann, 1991
- Long, Richard. P., dan Alvaro Covo. "Equivalent Diameter of Vertical Drains with an Oblong Cross Section." *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 120, no. 9, 1994, pp. 1625–1630.
- Shen, Shui-Long., et al. "Analysis of Field Performance of Embankments on Soft Clay Deposit with and without PVD-Improvement". *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 23, no. 6, 2005, pp. 463–485.
- Badan Standardisasi Nasional. *SNI 8460:2017, Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2017.
- Terzaghi, Karl. dan Peck, Ralph B. *Mekanika Tanah Dalam Praktek Rekayasa*. Ed 2, Jakarta: Erlangga, 1967.
- Walker, Rohan., dan Buddhima Indraratna. "Vertical Drain Consolidation with Parabolic Distribution of Permeability in Smear Zone". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 132, no. 7, 2006, pp. 937–941.

