

## Evaluasi Shear Strength dan Stress History Tanah Lunak pada Pekerjaan Vacuum Preloading Menggunakan Uji CPTu

Fenny Septiastuti\*

Universitas Katolik Parahyangan, Jl. Ciumbuleuit 94, Bandung, Jawa Barat  
E-mail: fennyseptiastuti@gmail.com

Paulus Pramono Rahardjo

Universitas Katolik Parahyangan, Jl. Ciumbuleuit 94, Bandung, Jawa Barat  
E-mail: paulus.rahardjo@unpar.ac.id

Rinda Karlinasari Indrayana

Universitas Katolik Parahyangan, Jl. Ciumbuleuit 94, Bandung, Jawa Barat  
E-mail: rkarlinasari@gmail.com

### Abstrak

Makalah berikut menyajikan evaluasi nilai shear strength dan stress history tanah lunak menggunakan CPTu. Lokasi penelitian berada di Kosambi Tangerang, pada tanah Jakarta marine clay. Pada area penelitian dilakukan pematangan lahan menggunakan prefabricated vertical drain (PVD) yang dikombinasikan dengan vacuum preloading sebesar 80 kPa. Dalam penelitian ini disebut metode konsolidasi vakum. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur efektifitas pekerjaan konsolidasi pada metode vacuum preloading. Metode pengukuran efektivitas konsolidasi vakum menggunakan evaluasi nilai shear strength dan stress history dari CPTu. Hasil analisis dapat menunjukkan beban vacuum preloading yang diterima di setiap lapisan tanah. Besar derajat konsolidasi menggunakan analisis settlement plate tidak selalu mencerminkan besar peningkatan nilai kuat geser tanah. Besar derajat konsolidasi tanah pada pekerjaan vacuum preloading lebih mendekati kondisi aktual jika menggunakan acuan peningkatan kuat geser tanah daripada hasil analisis settlement plate. Nilai  $m_v$  berkorelasi dengan  $q_c$  dimana  $m_v = 1/(\alpha q_c)$ . Pada tanah Jakarta marine clay nilai  $\alpha$  berkisar 2.6 - 4.2 dan  $Ch$  sebesar 1.29 kali nilai  $C_v$ .

**Kata-kata Kunci:** CPTu, evaluasi shear strength dan stress history, Jakarta marine clay, vacuum preloading

### Abstract

The following paper shows an evaluation of the shear strength and stress history values of soft soils using CPTu. The research location is in Kosambi, Tangerang, on Jakarta marine clay soil. In the research area, ground preparation was carried out using a prefabricated vertical drain (PVD) combined with a vacuum preloading of 80 kPa. In this study it is called vacuum consolidation method. This study aims to measure the effectiveness of consolidation using vacuum consolidation method by using the evaluation of shear strength values and stress history of CPTu. The results of the analysis can show the vacuum preloading load received in each soil layer. The result of consolidation degree using analysis of settlement plate does not always indicate the increase of shear strength in the soil. The value of degree consolidation on the vacuum preloading is closer to the actual condition when using the increasing shear strength compared to the result analysis from the settlement plate. Jakarta marine clay soil has  $m_v$  value that correlates with the  $q_c$  of CPTu results where  $m_v = 1/(\alpha q_c)$  with  $\alpha$  ranged from 3 - 4.2 and the  $Ch$  value is 1.29 times  $C_v$ .

**Keywords:** CPTu, evaluation of shear strength and stress history, Jakarta marine clay, vacuum preloading

## 1. Pendahuluan

Salah satu metode yang umum digunakan untuk memperbaiki karakteristik tanah lempung lunak adalah membuat tanah berkonsolidasi lebih awal. Konsolidasi tanah diikuti dengan naiknya kuat geser tanah. Lokasi penelitian merupakan area reklamasi yang berada di teluk Jakarta dengan jenis tanah lempung (*marine clay*). Pematangan lahan menggunakan metode konsolidasi vakum yaitu menggunakan *prefabricated vertical drain* (PVD) yang dikombinasikan dengan

*vacuum preloading*. Tekanan vakum yang dipergunakan sebesar 80 kPa.

Setelah pekerjaan konsolidasi vakum selesai, dilakukan pengujian *Piezcone* (CPTu). Dari interpretasi nilai *cone resistance* ( $q_c$ ) disimpulkan nilai derajat konsolidasi belum mencapai 90% pada beban *preloading* 80 kPa. Sehingga peningkatan kuat geser tanah lebih rendah dari nilai acuan. Ada kemungkinan stress history tanah yang dihasilkan belum mencerminkan penambahan beban vakum 80

\*Penulis Korespondensi: fennyseptiastuti@gmail.com

kPa. Dijumpai ketidaksesuaian saat membandingkan hasil derajat konsolidasi antara pembacaan *settlement plate* dengan hasil peningkatan kuat geser tanah. Konsekuensi dari kondisi ini, tanah masih berpotensi mengalami penurunan ketika diberikan beban konstruksi walaupun proses konsolidasi sudah dinyatakan selesai berdasarkan *settlement plate*. Kondisi ini dapat terjadi bilamana pekerjaan konsolidasi vakum dihentikan saat *settlement* belum selesai atau tekanan vakum yang diterima oleh tanah tidak mencapai 80 kPa.

Penelitian yang dilakukan oleh N.P. López-Acosta (2019) pada pekerjaan konsolidasi vakum terdapat potensi kehilangan tekanan vakum sekitar 30%. Kehilangan tekanan ini membuat tanah pada elevasi yang lebih dalam kurang cukup memperoleh tekan prakonsolidasi yang diharapkan.

Interpretasi derajat konsolidasi menggunakan bacaan *settlement plate* belum tentu tercermin dalam peningkatan kuat geser tanah. Derajat konsolidasi dapat dihitung berdasarkan peningkatan kuat geser tanah. Nilai yang dihasilkan dapat lebih mendekati kondisi aktual dibandingkan analisis dari *settlement plate*.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah melakukan evaluasi besar peningkatan nilai shear strength dan mendapatkan nilai stress history yang dihasilkan pada akhir pekerjaan konsolidasi. Mendapatkan perbandingan derajat konsolidasi pada akhir pekerjaan berdasarkan bacaan *settlement plate* dengan berdasarkan peningkatan kuat geser tanah. Memperoleh metode untuk mengukur efektifitas pekerjaan konsolidasi berdasarkan uji CPTu. Mendapatkan nilai  $\alpha$  untuk koefisien perubahan volume ( $m_v$ ) dan nilai koefisien konsolidasi radial ( $Ch$ ) untuk tanah Jakarta marine clay.

## 2. Metode Penelitian

Lokasi pengambilan data terbatas pada pekerjaan konsolidasi vakum di pulau reklamasi Kosambi, Tangerang yang akan dibangun menjadi area permukiman. Data yang dipergunakan dalam analisis berupa hasil pengujian sebelum konsolidasi, data monitoring saat konsolidasi dan data setelah pekerjaan konsolidasi vakum selesai.

### 2.1 Interpretasi data sebelum pekerjaan konsolidasi vakum

Data yang dipergunakan dalam analisis berupa data Cone Penetration Test (CPT), Standard Penetration Test (SPT), Vane Shear Test (VST) dan hasil uji laboratorium. Interpretasi yang dilakukan berupa uji konsistensi data dan korelasi antar parameter tanah.

Uji konsistensi untuk mendapatkan pola perilaku tanah. Data yang memiliki penyimpangan pola dapat diketahui dari analisis ini. Tanah dengan zona yang sama memiliki sifat-sifat yang sama dan memungkinkan untuk dikelompokkan atau digolongkan menjadi sebuah area atau lapisan yang tunggal dengan sifat-sifat tertentu.

Korelasi data untuk mengetahui hubungan antar parameter tanah. Pola yang terbentuk dapat dijadikan acuan untuk memperkirakan besar suatu parameter tanah pada lokasi atau jenis tanah yang sama dengan data Jakarta marine clay.

Sensitifitas tanah didapatkan dari pengujian VST. Sensitifitas adalah rasio perbandingan antara kekuatan tanah yang masih asli dengan kekuatan tanah setelah terkena kerusakan (*remoulded*). Analisis kuat geser tanah didekati dengan nilai sleeve resistance ( $f_s$ ). Pada clay, kuat geser residual ( $Su_r$ ) tanah akan mendekati nilai  $f_s$ . Untuk menghitung nilai kuat geser ultimate ( $Su_p$ ) tanah menggunakan persamaan:

$$Su_p = Su_r \times sensitivity \quad (1)$$

Dari data CPT dilakukan korelasi antara nilai  $f_s$  dengan cone resistance ( $qc$ ) untuk tanah dengan perilaku clay.

### 2.2 Interpretasi data saat pekerjaan konsolidasi vakum

Data yang dipergunakan dalam analisis berupa data bacaan *vacuum gauge*, *piezometer* dan *settlement plate*.

*Vacuum gauge* dipergunakan untuk memantau kinerja alat vakum. Rentang pengukuran adalah 0 MPa ~ 0,1 MPa dengan ketelitian 0,002 MPa. Besar tekanan vakum yang terukur pada beberapa titik kedalaman tanah diperoleh dari *piezometer*.

Hasil interpretasi dari *settlement plate* digunakan untuk memprediksi besar penurunan akhir (*final settlement*) di lapangan. Berdasarkan analisis grafis dapat diketahui besar derajat konsolidasi tanah. Adapun metode grafis yang digunakan adalah metode Asaoka, metode Hiperbolik dan metode  $1/t$ .

### 2.3 Interpretasi uji CPTu setelah pekerjaan konsolidasi vakum

Pada tanah dengan perilaku clay dilakukan korelasi antara nilai  $f_s$  dengan tahanan ujung konus ( $qc$ ) yang dikoreksi akibat efek air ( $qt$ ). Nilai rasio cone area ( $a$ ) dalam koreksi  $qc$  biasanya diambil 0,8

$$qt = qc + u2 (1 - a) \quad (2)$$

Rahardjo (2015) mengajukan parameter baru, yaitu  $Bq^*$  yang diperoleh dari hasil uji CPTu. Parameter  $Bq^*$  adalah rasio dari tekanan air pori total ( $u2$ ) dan  $qt$ .

$$Bq^* = \frac{u2}{qt} \quad (3)$$

Untuk mendapatkan nilai Overconsolidation Ratio (OCR) pada tanah lempung dipergunakan nilai  $Bq^*$ . Hubungan antara OCR dengan  $Bq^*$  menggunakan hasil penelitian Setiawan tahun 2017.

$$OCR = 10^{(1.002 - 1.57Bq^*)} \quad (4)$$

Nilai stress history ( $p_c$ ) tanah merupakan OCR dikalikan tegangan efektif tanah ( $\sigma_v'$ ) yang saat ini bekerja

Pada soil investigasi yang dilakukan di proyek reklamasi Jakarta tahun 1996 diperoleh rasio shear

strength ( $S_u$ ) vs *effective overburden pressure* ( $\sigma_v'$ ) sebesar 0,22 (Rahardjo, 1996). Secara teori, setelah selesai konsolidasi, nilai kuat geser tanah akan meningkat sebesar 0,22  $\Delta\sigma$ . Menggunakan **Persamaan (1)** diperoleh nilai  $S_{up}$  setelah konsolidasi dari uji CPTu. Besar peningkatan kuat geser tanah ( $\Delta S_u$ ) dapat digunakan sebagai petunjuk pertambahan tegangan tanah ( $\Delta\sigma$ ). Besar tekanan vakum yang diterima oleh tanah merupakan nilai  $\Delta\sigma$ .

Evaluasi keberhasilan pekerjaan konsolidasi dapat ditentukan dari peningkatan nilai  $q_t$ . Menentukan besar  $q_t$  target untuk nilai derajat konsolidasi 100% (NC) dengan kondisi peningkatan kuat geser tanah terhadap peningkatan tegangan efektif tanah memenuhi persamaan:

$$S_u = 0.22 (\sigma_v' + \Delta\sigma) \quad (5)$$

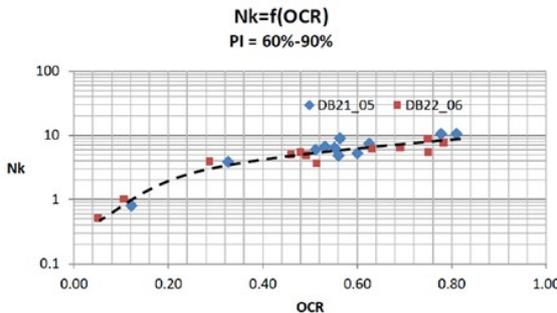
Hubungan nilai  $q_t$  dengan nilai  $S_u$  terlihat dari persamaan:

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_v}{Nk} \quad (6)$$

sehingga:

$$q_{t\text{target}} = (S_u \times Nk) + \sigma_v \quad (7)$$

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Nurindahsih pada tahun 2013 diperoleh hubungan antara OCR dengan  $Nk$ . Pada lokasi penelitian di Kosambi, nilai  $Nk = 13$  terlihat pada **Gambar 1**.



**Gambar 1.** Grafik hubungan  $Nk$  terhadap OCR (Nurindahsih, 2013)

Berdasarkan persamaan tersebut, dihitung nilai  $q_t$  target dengan menambahkan tegangan vertikal total dengan beban akibat vacuum ( $\Delta\sigma$ ) sebesar 80 kPa. Maka persamaan yang digunakan menjadi:

$$q_{t\text{target}} = [0.22 (\sigma_v' + \Delta\sigma)] Nk + \sigma_v \quad (8)$$

### 2.4 Penentuan nilai $\alpha$ dan $Ch$

Menggunakan besar konsolidasi final hasil interpretasi dari settlement plate, dilakukan *back analisis* untuk mendapatkan nilai  $\alpha$ . Data yang dipergunakan adalah data CPT sebelum konsolidasi dibandingkan besar settlement dari bacaan *settlement plate* terdekat. Persamaan untuk memperoleh nilai konsolidasi adalah:

$$S = \sum_{i=1}^{i=n} m_{vi} \Delta\sigma_i \Delta H_i \quad (9)$$

dimana:

$m_v$  = koefisien perubahan volume =  $1 / \alpha q_c$

$\Delta\sigma$  = penambahan beban akibat *vacuum preloading*

$\Delta H$  = tebal lapisan tanah

Konsolidasi yang terjadi pada sistem vertikal drain adalah kombinasi antara konsolidasi vertikal dengan konsolidasi radial. Proses konsolidasi dimana terjadi drainase horisontal dalam arah radial dipengaruhi oleh nilai koefisien konsolidasi arah radial ( $Ch$ ). Metode grafik untuk memperkirakan parameter konsolidasi dari uji oedometer dikembangkan oleh Shogaki dan Asaoka (1989). Untuk kondisi konsolidasi dengan vertical drain dapat digunakan formula sebagai berikut :

$$Ch = \frac{r_e^2 F(n) \ln\beta}{8 \Delta t} \quad (10)$$

dimana:

$\beta$  = kemiringan garis (radians)

$r_e$  = radius pengaruh drainase yang nilainya bergantung pada pola PVD

= 1.13 x spasi untuk pola segiempat

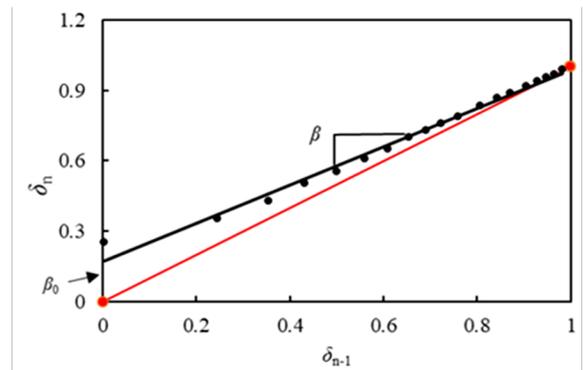
= 1.05 x spasi untuk pola segitiga

$r_w$  = radius drainase yang besarnya bergantung pada lebar PVD (a) dan tebal PVD (b)

$$= \frac{2(a+b)}{\pi}$$

$$n = \frac{r_e}{r_w}$$

$$F(n) = \left( \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln\left(\frac{n}{n-1}\right) \right) - \left( \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \right)$$



**Gambar 2.** Pola grafik pada metode Asaoka

### 3. Hasil Analisis Data dan Pembahasan

Lokasi penelitian seluas 8.8 km<sup>2</sup> dekat dengan Laut Jawa, terdapat banyak kolam ikan di seluruh area, yang kemudian dirug dengan tanah setebal 3 m sebagai lantai kerja.

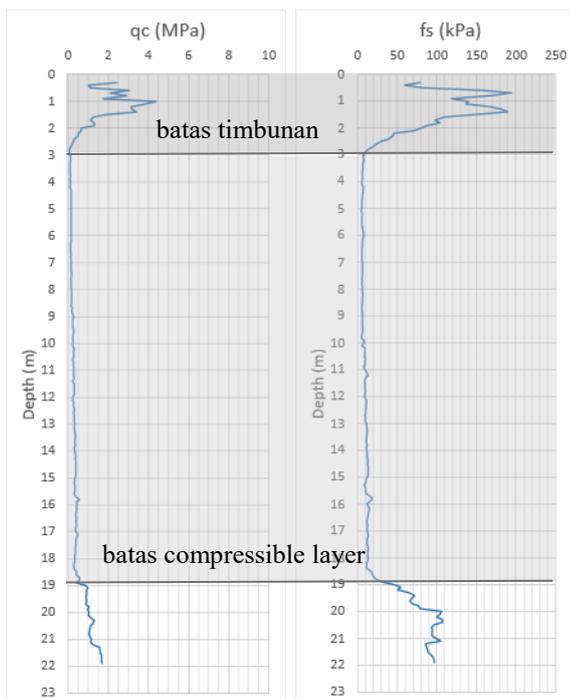
Dibawah urugan tanah setebal 3 m ditemukan lapisan tanah asli yang dapat mengalami konsolidasi. *Compressible layer* ini setebal 11 – 16 m. Pelapisan tanah sebelum dilakukan konsolidasi dengan *vacuum preloading* tergambar dari hasil uji CPT pada **Gambar 4**.



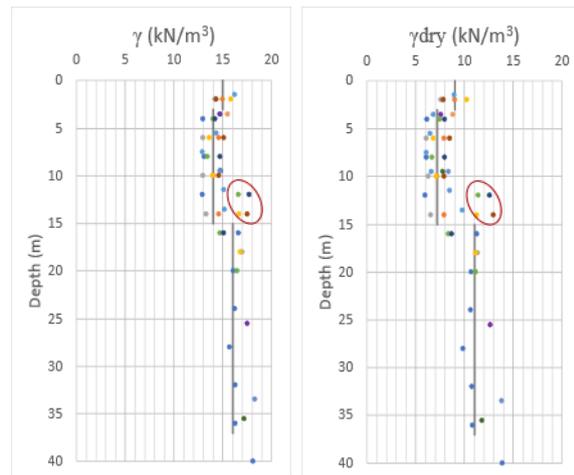
**Gambar 3. Lokasi pengambilan data**  
(sumber: Google Earth™)

Kondisi geologi pada lokasi penelitian termasuk dalam endapan aluvium kuartar ( $Q_a$ ) yang didominasi oleh material lempung, lanau, pasir, endapan pematang pantai ( $Q_{br}$ ) berupa material pasir halus hingga kasar dengan gradasi baik (*well graded*) dan cangkang (*shell*). Material endapan alluvium dan endapan pematang pantai ini secara umum memiliki konsistensi sangat lunak untuk material butir halus dan densitas lepas untuk material pasiran.

Lapis teratas dengan ketebalan 3m yang merupakan timbunan tanah dengan  $g = 15 \text{ kN/m}^3$  dan  $g_{dry} = 9 \text{ kN/m}^3$ . Pada bagian compressible layer memiliki nilai  $g = 14.3 \text{ kN/m}^3$  dan  $g_{dry} = 7.2 \text{ kN/m}^3$ . Lapisan dibawahnya setidaknya memiliki konsistensi stiff dengan nilai  $g = 16.3 \text{ kN/m}^3$  dan  $g_{dry} = 11 \text{ kN/m}^3$



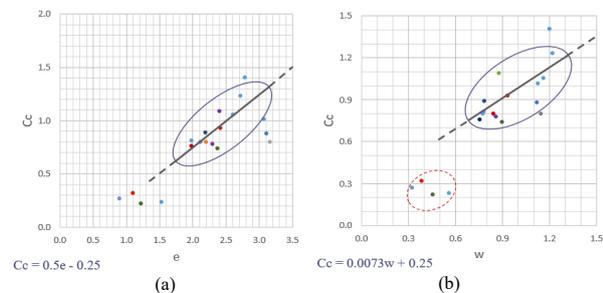
**Gambar 4. Lapisan tanah berdasarkan CPT 9-3**



**Gambar 5. Lapisan tanah berdasarkan CPT 9-3**

Area kompresi memiliki nilai angka pori ( $e$ ) yang besar. Nilai  $e$  berkisar 2 – 3. Angka pori yang besar menunjukkan tanah lunak dengan tingkat settlement yang tinggi. Tanah memiliki rentang nilai indeks kompresi ( $C_c$ ) bernilai 0.8 – 1.1. Semakin tinggi natural water content ( $w$ ) maka  $C_c$  akan semakin besar. **Gambar 6 (a)** menunjukkan hubungan nilai  $e$  dengan  $c_c$  dan **Gambar 6 (b)** menunjukkan hubungan nilai  $w$  dengan  $c_c$

Penelitian yang dilakukan oleh Schmertmann (1953), menunjukkan bahwa Indeks recompression ( $C_r$ ) adalah kemiringan dari kurva pelepasan beban dan pembebanan kembali pada grafik  $e$  vs  $\log p'$ . Kisaran  $C_r$  kira-kira dari seperlima sampai sepersepuluh dari  $C_c$ . Pada Jakarta marine clay nilainya sekitar  $1/6.75 C_c$



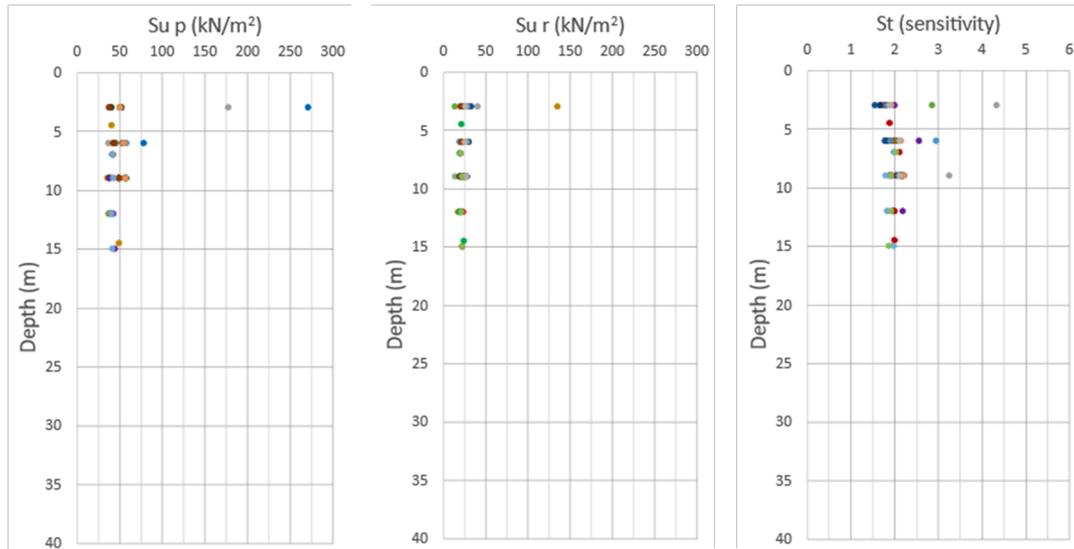
**Gambar 6. (a) Nilai pori vs Compression Index (b) Natural water content vs Compression Index pada tanah Jakarta marine clay**

### 3.1 Kuat geser tanah sebelum konsolidasi vakum

Jenis uji kuat geser tanah lapangan pada tanah lempung jenuh (undrained strength) menggunakan VST. Kapasitas VST dapat mencapai kekuatan geser hingga 200kPa pada tanah lunak. Metode penggunaan alat ini tidak dapat diterapkan pada jenis tanah pasir, kerikil dan tanah yang memiliki permeabilitas tinggi.

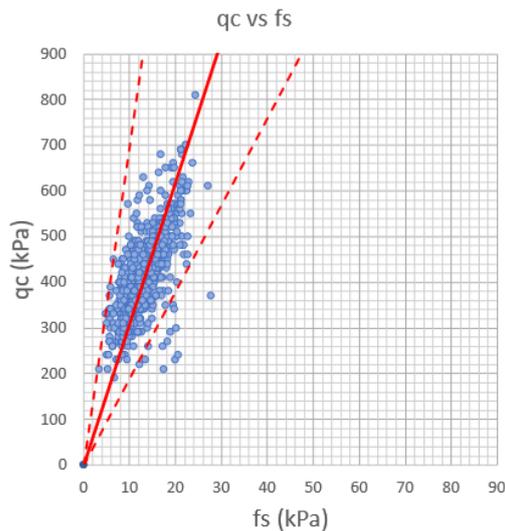
Berdasarkan hasil uji vane shear di lokasi penelitian, diperoleh rata-rata nilai sensitivitas tanah sebesar 2.1.

Untuk melakukan analisis kuat geser tanah  $S_{up}$  berdasarkan uji CPT dihitung dari *sleeve resistance*



Gambar 7. Nilai kuat geser dan sensitivitas tanah dari Vane Shear Test

(fs). Dimana nilai  $Su_r$  = kuat geser residual  $\approx fs$ . Dari data nilai CPT dibuat perbandingan nilai fs dengan tahanan ujung konus ( $q_c$ ). Nilai perbandingan yang dipergunakan hanya pada lapisan tanah clay, atau pada compressible layer. Hasil yang diperoleh, nilai perbandingan  $q_c/fs$  mendekati 31, terlihat pada Gambar 8. Dengan menggunakan perbandingan  $q_c/fs = 31$ , maka dari nilai  $q_c$  juga dapat diperoleh besar nilai  $Su_r$ . Nilainya pada tanah clay mendekati nilai fs. Gambar 9 adalah perbandingan nilai fs dengan  $Su_r$  yang diperoleh dari nilai  $q_c$  pada lapisan clay.



Gambar 8. perbandingan nilai fs dengan tahanan ujung konus ( $q_c$ ) pada uji CPT

Berdasarkan Persamaan (1), nilai  $Su_p$  dapat diperoleh dari hasil  $Su_r$  dikali dengan nilai sensitivitas sebesar 2.1

### 3.2 Analisis hasil pencatatan alat instrumentasi

Bacaan tekanan vakum dicatat pada permukaan tanah (kedalaman 0), kedalaman 5m dan 10m. Untuk membuat

grafik tekanan vakuum dari permukaan tanah hingga ujung PVD dipergunakan persamaan polinomial. Persamaan polinomial order 1, untuk memperkirakan secara linear besar tekanan vakuum dari kedalaman 0 – 5m. Persamaan polinomial order 2, untuk memperkirakan secara hiperbolik besar tekanan vakuum dari kedalaman 5m sampai ujung PVD.

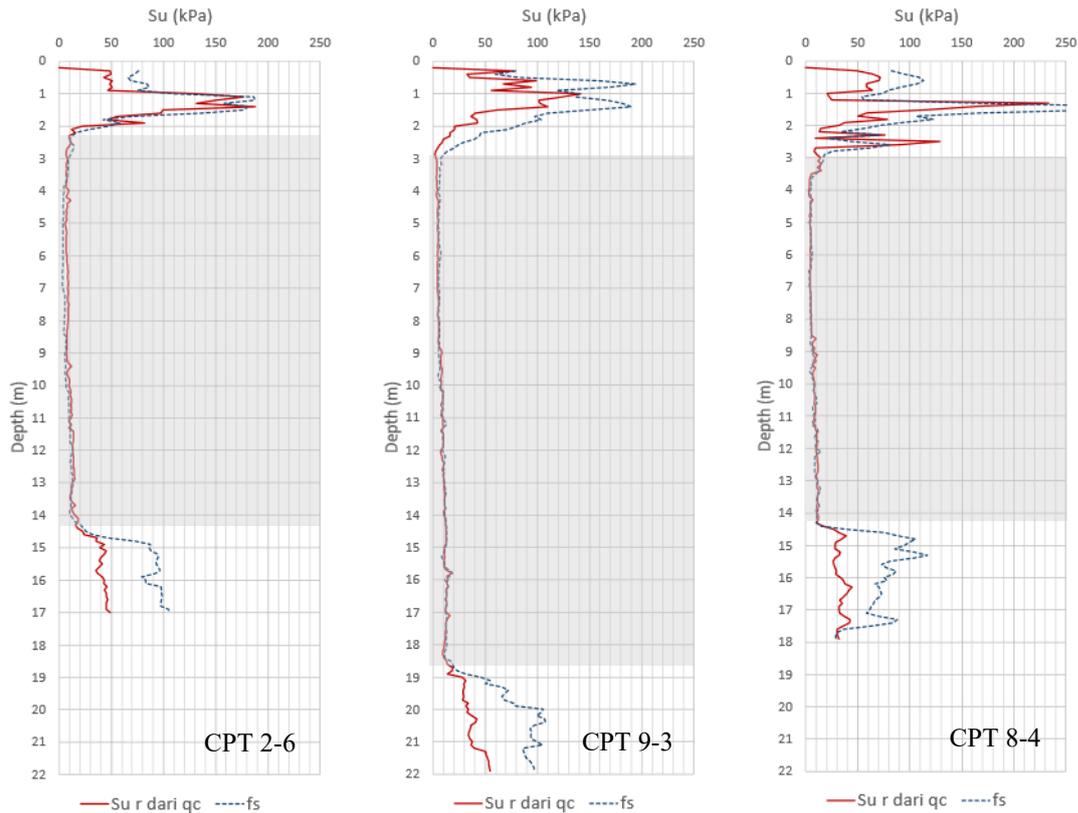
Pada analisis besar konsolidasi Persamaan (9) nilai  $\Delta\sigma$  merupakan besar tekanan vakuum yang diterima pada tiap lapisan tanah (Gambar 10).

Settlement plate dipasang berdampingan vacuum gauge. Data pengukuran settlement plate merupakan hasil pengamatan dalam rentang waktu 130 -190 hari setelah tekanan vakuum diberikan. Walaupun besar penurunan pada masing-masing settlement plate memberikan hasil yang berbeda, namun kecepatan (rate) konsolidasi yang dihasilkan sama (Gambar 11). Rate konsolidasi yang sama mengindikasikan bahwa tanah di lokasi penelitian memiliki nilai  $Ch$  yang hampir seragam.

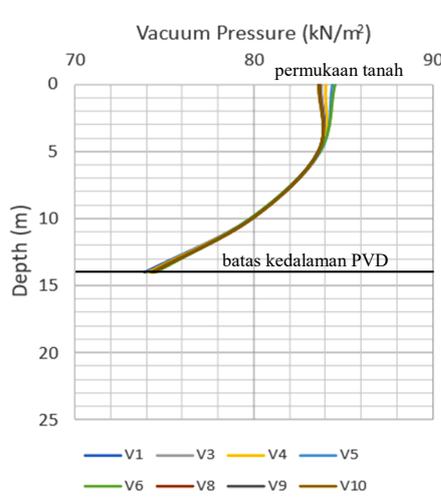
Dari data settlement plate dapat diperkirakan besarnya konsolidasi final yang dapat terjadi dengan melakukan

Tabel 1. Interpretasi derajat konsolidasi dari pembacaan settlement plate

No	Metode Analisis				
	Primer	Asaoka Sekunder	Total	Hiperbolik	1/t
S1	100 %	56.7 %	80.1 %	83.6 %	88.2 %
S2	100 %	51.9 %	74.5 %	79.4 %	86.2 %
S3	100 %	40.0 %	65.9 %	79.8 %	86.4 %
S4	100 %	68.5 %	85.3 %	80.0 %	87.3 %
S5	100 %	72.8 %	87.2 %	80.5 %	86.8 %
S6	100 %	73.7 %	87.0 %	79.1 %	86.4 %
S7	100 %	60.2 %	81.0 %	81.4 %	87.5 %
S8	100 %	75.7 %	88.2 %	80.4 %	86.5 %
S9	100 %	76.8 %	88.0 %	79.1 %	86.1 %
S10	100 %	68.4 %	86.6 %	82.7 %	88.5 %
S11	100 %	59.6 %	79.0 %	80.1 %	86.4 %
		<b>Rata-rata</b>	82.1 %	80.6 %	86.9 %



Gambar 9. Perbandingan nilai Su, yang diperoleh dari fs dan qc (uji CPT)

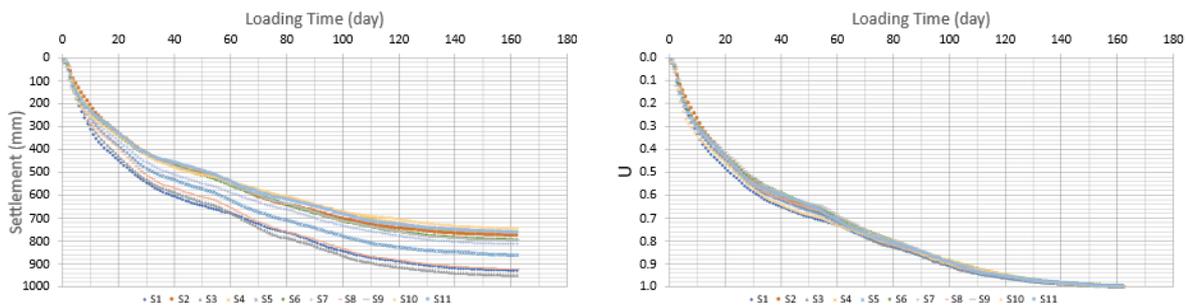


Gambar 10. Besar tekanan vakuum hasil pembacaan vacuum gauge dan piezometer

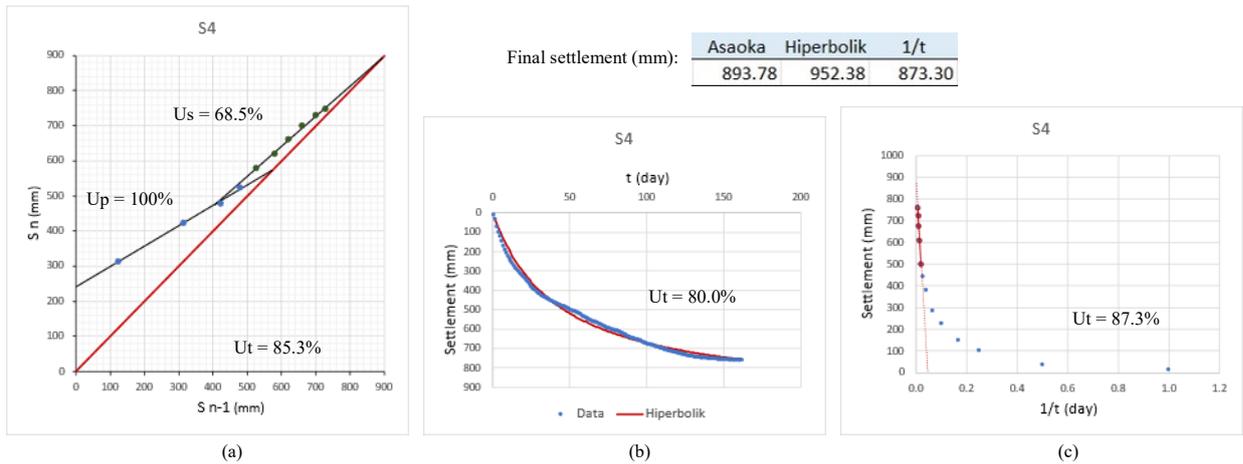
extrapolasi menggunakan persamaan metode Asaoka, hiperbola dan juga extrapolasi linier dari kurva  $1/t$  vs settlement. Sehingga dapat diperkirakan besarnya nilai derajat konsolidasi pada akhir pengamatan *settlement plate*. Interpretasi dari metode Asaoka dapat memberikan gambaran derajat konsolidasi primer dan sekunder sedangkan pada metode  $1/t$  dan hiperbolik derajat konsolidasi yang ditampilkan merupakan total dari keduanya (Gambar 12).

### 3.3 Nilai $\alpha$ dan $Ch$ pada tanah Jakarta Marine Clay

Dari pengujian CPT, dapat dihitung besar konsolidasi yang akan dicapai. Menggunakan nilai  $\alpha$  dan  $qc_c$  dapat diketahui koefisien perubahan volume ( $mv$ ) pada *compressible layer*. Nilai  $\alpha$  pada Persamaan (9) diperoleh dari *back analysis* berdasarkan besar konsolidasi final hasil analisis *settlement plate*. *Settlement plate* yang dijadikan acuan, adalah pada posisi



Gambar 11. Hasil pembacaan settlement plate



Gambar 12. Analisis *settlement plate* menggunakan metode Asaoka (a), Hiperbola (b) dan 1/t (c)

yang paling dekat dengan titik pengujian CPT. Nilai  $\alpha$  dianggap seragam pada setiap kedalaman tanah. Masing-masing titik pengujian CPT akan menghasilkan satu buah nilai  $\alpha$ . Nilai  $\alpha$  yang didapatkan diplotkan dalam grafik dengan absis (sumbu x) adalah kedalaman PVD.

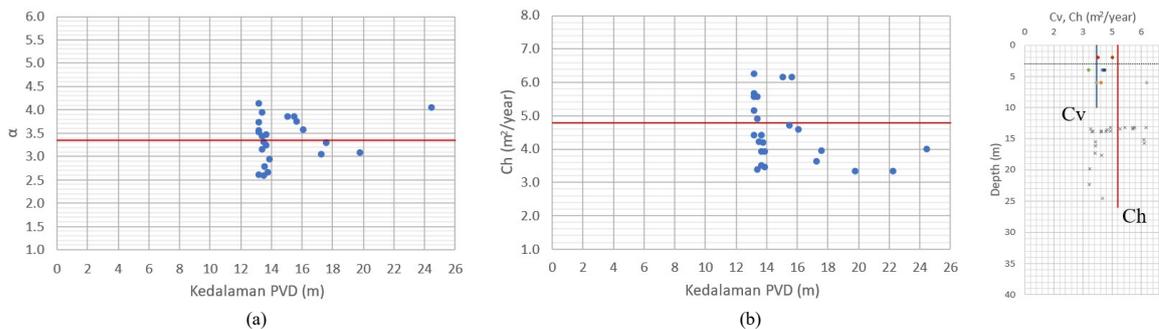
Diperoleh nilai  $\alpha$  dengan range dari 2.6 – 4.2. Jika ditarik nilai tengah berkisar 3.4. Sehingga nilai  $\alpha$  untuk koefisien perubahan volume pada tanah Jakarta marine clay sebesar 3.4 (Gambar 11 a).

Menggunakan metode Asaoka, diperoleh nilai  $C_h$  dengan range 3.31 – 6.24  $m^2/year$ . Jika ditarik garis tengah nilainya berkisar 4.78  $m^2/year$ . Dari hasil pengujian laboratorium, nilai  $C_v$  pada *compressible layer* bernilai 3.30 – 4.1  $m^2/year$ . Berdasarkan hasil tersebut, tanah Jakarta marine clay memiliki nilai  $C_h$  yang mendekati 1.29 kali nilai  $C_v$  (Gambar 11 b)

Setelah nilai  $C_h$  didapatkan, dibuat grafik *rate* konsolidasi. Berdasarkan teori konsolidasi radial dari Barron (1948), analisis derajat konsolidasi arah horizontal ( $U_h$ ) menggunakan Persamaan (11). Perhitungan untuk mendapatkan nilai faktor waktu horizontal ( $T_h$ ) menggunakan Persamaan (12).

$$U_h = 1 - e^{-\frac{8T_h}{F(n)}} \quad (11)$$

$$T_h = \frac{C_h \times t}{r e^2} \quad (12)$$



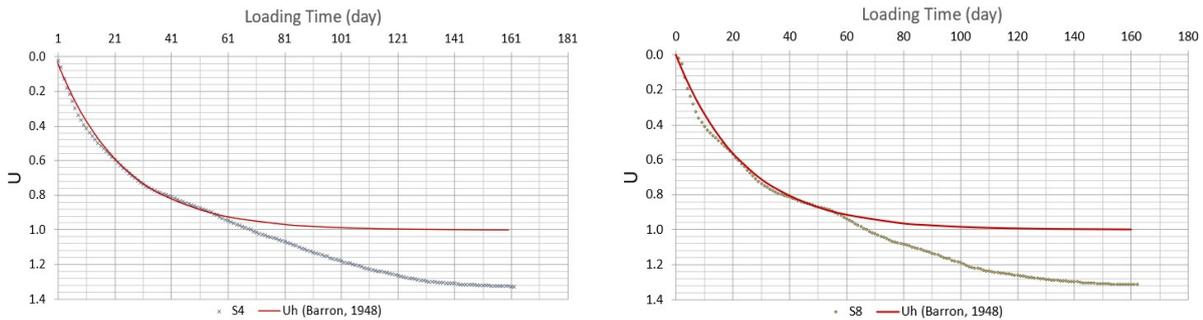
Gambar 13. (a) Nilai  $\alpha$  (b) Nilai  $C_h$  pada tanah Jakarta marine clay

Grafik *rate* konsolidasi berdasarkan teori Barron dibandingkan dengan *rate* hasil pengukuran *settlement plate*. Perbandingan menunjukkan *rate* konsolidasi dari teori Barron pada kondisi konsolidasi primer mendekati *rate* hasil pengukuran *settlement plate*, terlihat pada Gambar 14. Kurva yang terus turun melebihi *rate* konsolidasi primer menunjukkan *rate* konsolidasi sekunder.

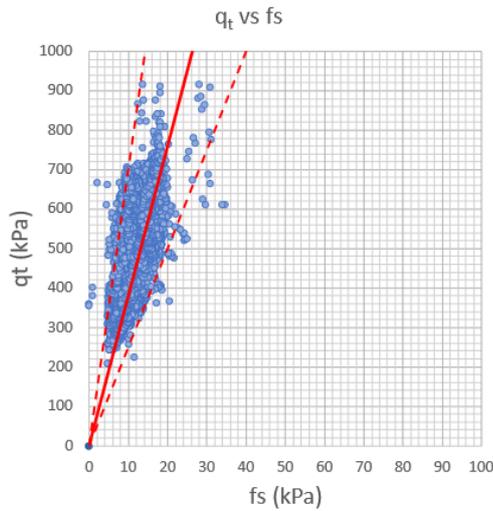
### 3.4 Kuat geser tanah setelah konsolidasi vakum

Seperti analisis CPT sebelum konsolidasi vakum, data nilai  $CPT_u$  setelah konsolidasi vakum juga dibuat perbandingan nilai  $f_s$  dengan tahanan ujung konus terkoreksi ( $q_t$ ). Perbandingan yang dilakukan hanya pada lapisan tanah clay, atau pada *compressible layer*. Hasil yang diperoleh, nilai perbandingan  $q_t/f_s$  mendekati 38, terlihat pada Gambar 15. Dengan menggunakan perbandingan  $q_t/f_s = 38$ , maka dari nilai  $q_t$  juga dapat diperoleh besar nilai  $S_u_r$ . Nilai  $S_u_r$  pada tanah clay mendekati nilai  $f_s$ . Gambar 16 adalah perbandingan nilai  $f_s$  dengan  $S_u_r$  yang diperoleh dari nilai  $q_t$  pada lapisan clay. Nilai  $S_u_p$  dapat diperoleh dari hasil  $S_u_r$  dikali dengan nilai sensitivitas sebesar 2.1

Nilai  $S_u_p$  yang diperoleh sebelum dan setelah konsolidasi vakum dibandingkan dalam bentuk grafik. Terdapat peningkatan nilai kuat geser tanah akibat pekerjaan konsolidasi vakum yang disajikan pada Gambar 17.



Gambar 14. Hasil pembacaan settlement plate



Gambar 15. Perbandingan nilai fs dengan tahanan ujung konus terkoreksi ( $q_t$ ) pada uji CPTu

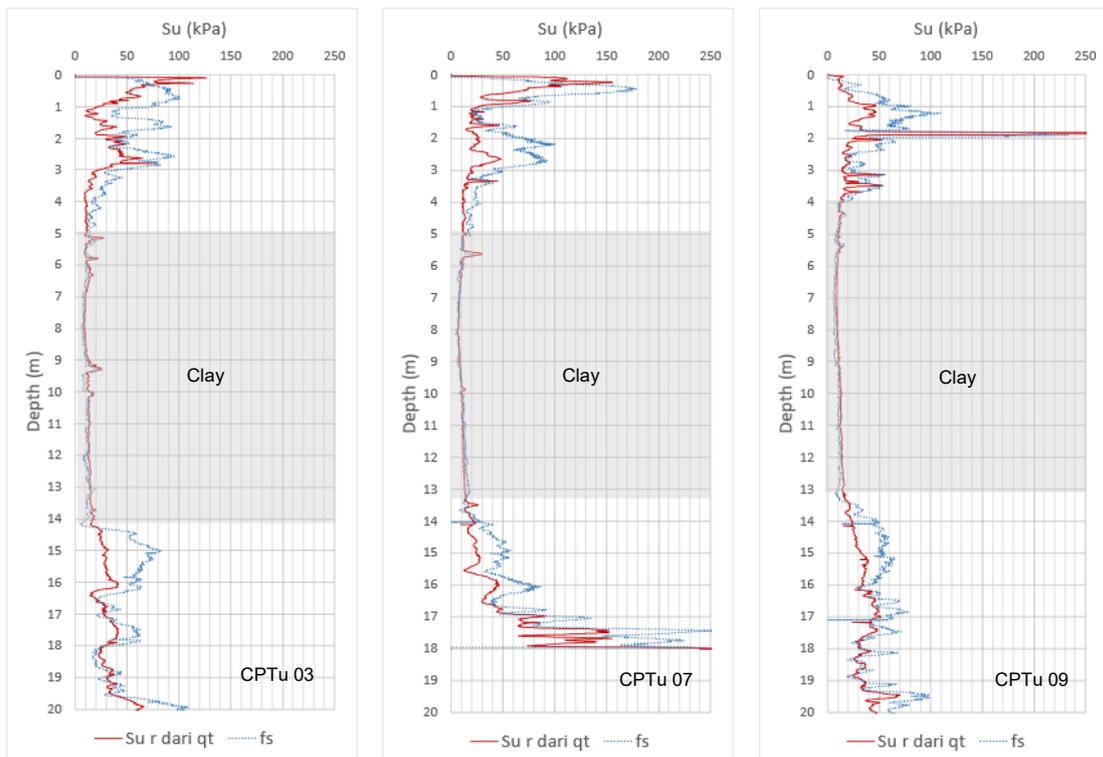
### 3.5 Nilai $q_t$ target

Tegangan efektif tanah dihitung dari berat isi efektif tanah yang diperoleh dari pengujian laboratorium dikalikan dengan ketebalan lapisan. Ditambahkan tegangan vertikal total berupa beban vacuum ( $\Delta\sigma$ ) sebesar 80 kPa, Maka menggunakan **Persamaan (1)** dapat diperoleh besar nilai  $q_t$  target.

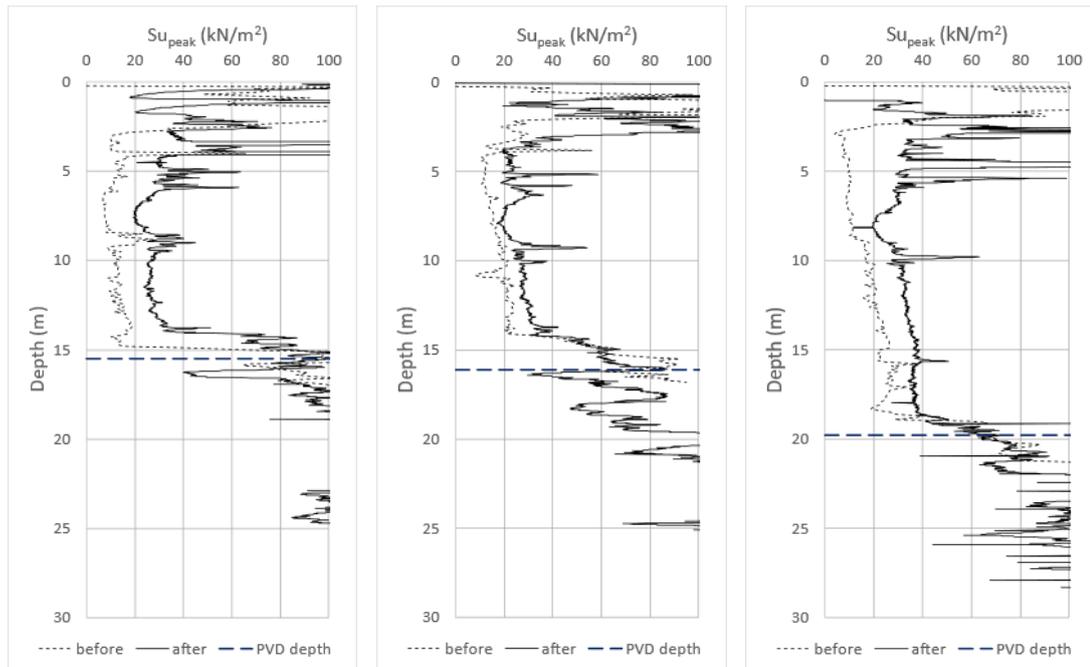
### 3.6 Beban vacuum preloading yang diterima tanah

Dari besar peningkatan kuat geser aktual tanah, dapat diperoleh juga besar derajat konsolidasi (U) dari pemberian beban 80 kPa. Pada beban vacuum ( $\Delta\sigma$ ) sebesar 80 kPa, peningkatan kuat geser pada akhir pekerjaan konsolidasi sebesar 17.6 kPa. Artinya saat derajat konsolidasi mencapai 100%, maka peningkatan kuat geser tanah adalah 17.6 kPa.

Dari besar peningkatan kuat geser tanah pada setiap



Gambar 16. Perbandingan nilai  $S_u$ , yang diperoleh dari fs dan  $q_c$  hasil uji CPT



Gambar 17. Perbandingan nilai nilai  $S_u$  kondisi sebelum dan setelah konsolidasi vakum

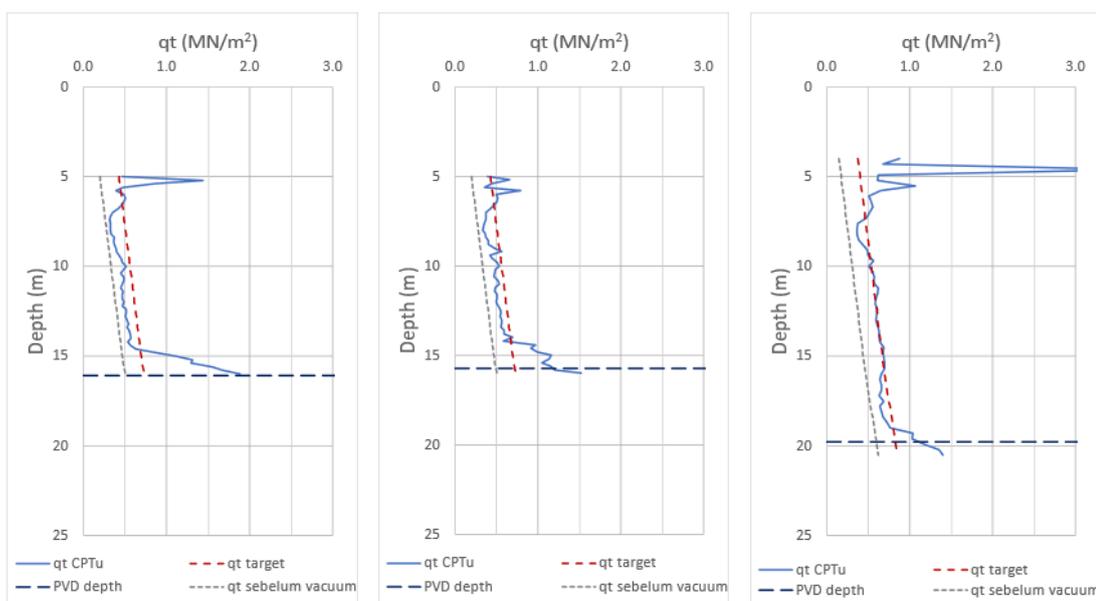
lapisan, dapat diperoleh besar tekanan vakum yang diterima oleh tanah ( $\Delta\sigma$ ). Pada lokasi penelitian, terdapat tekanan vakum yang tidak merata sebesar 80 kPa pada setiap kedalaman (Gambar 19 a). Kondisi ini mengurangi performa dari *vacuum preloading*.

### 3.7 Stress history tanah berdasarkan uji CPTu

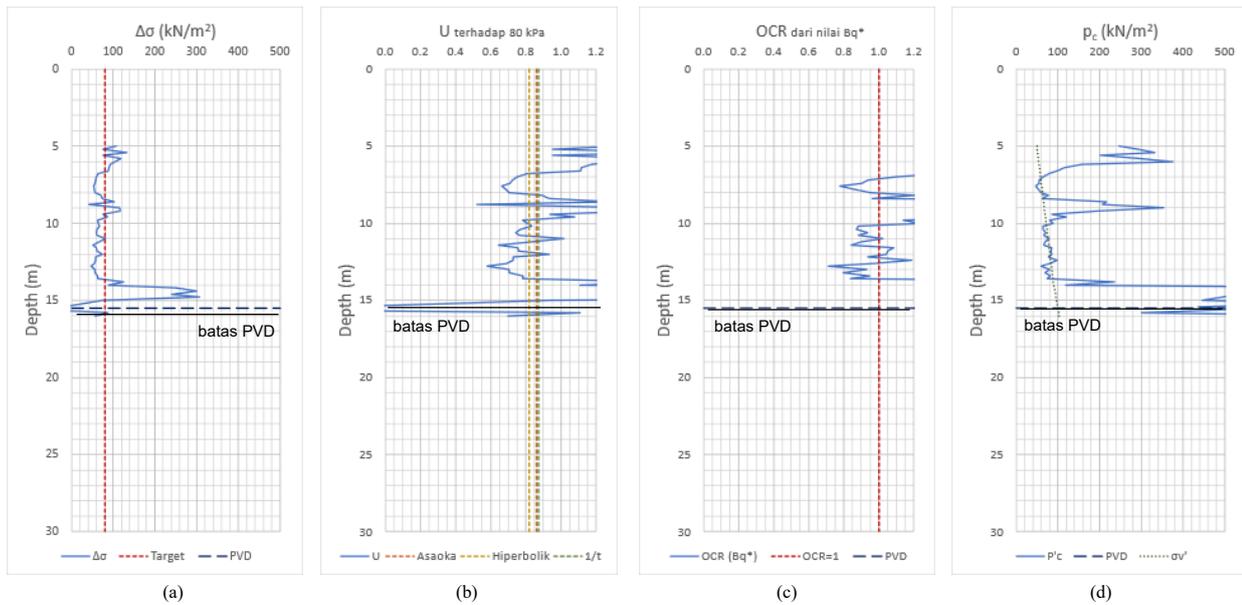
Dari uji CPTu setelah konsolidasi vakum, diperoleh parameter  $Bq^*$ . Dengan menggunakan Persamaan (4) diperoleh nilai OCR tanah. Berdasarkan nilai OCR, tegangan prakonsolidasi ( $p_c'$ ) dapat dihitung. Nilai  $p_c'$  yang lebih kecil dari tegangan efektif tanah ( $\sigma_v'$ )

menunjukkan kondisi tanah masih berkonsolidasi. Nilai  $p_c'$  yang sama dengan  $\sigma_v'$  menunjukkan kondisi tanah dalam kondisi *normally consolidated* (NC). Sedangkan nilai  $p_c'$  yang lebih besar dari  $\sigma_v'$  menunjukkan kondisi tanah dalam kondisi *over consolidated* (OC) terhadap tegangan efektifnya. Lapisan tanah dalam kondisi NC akan mengalami konsolidasi saat diberikan beban melebihi tegangan efektifnya.

Pada lokasi penelitian, terdapat lapisan tanah dalam kondisi *under consolidating* atau NC (Gambar 19 d) sehingga tanah akan mengalami penurunan saat diberikan beban konstruksi.



Gambar 18. Perbandingan nilai qt target dengan qt hasil pengukuran CPTu setelah konsolidasi



Gambar 19. (a) Grafik tekanan vakum yang diterima tanah (b) Derajat konsolidasi terhadap beban 80 kPa (c) Nilai OCR berdasarkan  $Bq^*$  (d) Nilai stress history tanah

#### 4. Metode Pengukuran Efektifitas Konsolidasi Vacuum Menggunakan CPTu

Pada pekerjaan konsolidasi vakum, besar derajat konsolidasi tanah dari bacaan *settlement plate* belum tentu mencerminkan peningkatan nilai kuat geser tanah. Sehingga untuk mendapatkan besar derajat konsolidasi tanah tidak dilakukan menggunakan analisis *settlement plate* namun menggunakan peningkatan kuat geser tanah dari uji CPTu. Derajat konsolidasi tanah yang diperoleh akan mendekati kondisi aktual.

Adapun metode evaluasi efektifitas konsolidasi vakum berdasarkan uji CPTu memiliki langkah sebagai berikut:

1. Melakukan analisis  $q_t$  target
2. Melakukan analisis peningkatan kuat geser tanah setelah beban vacuum di hentikan. Berdasarkan peningkatan kuat geser tanah, dilakukan analisis  $\Delta\sigma$  untuk mengetahui besar tekanan vakum aktual yang diterima oleh setiap lapisan tanah.
3. Melakukan analisis *stress history* untuk mengetahui status konsolidasi tanah.

Dari ketiga langkah analisis diatas dapat diketahui efektifitas pekerjaan konsolidasi menggunakan *vacuum preloading*. Pekerjaan konsolidasi dengan *vacuum preloading* dinilai efektif jika setiap lapisan tanah menerima tekanan vakum sebesar 80 kPa sehingga nilai  $p_c'$  bertambah sebesar 80 kPa dari tegangan efektifnya.

#### 5. Kesimpulan

Dari analisis data pekerjaan konsolidasi vakum, kesimpulan yang diperoleh dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Evaluasi nilai *shear strength* dan *stress history* tanah pada pekerjaan konsolidasi dengan metode *vacuum preloading* dapat menggunakan uji CPTu. Hasil analisis yang diperoleh dapat menunjukkan efektifitas konsolidasi vakum.
2. Pada lokasi penelitian, tekanan vakum sebesar 80 kPa tidak diterima secara merata pada setiap kedalaman tanah, sehingga *stress history* dan kuat geser tanah yang diharapkan tidak tercapai.
3. Pada pekerjaan konsolidasi vakum, besar derajat konsolidasi tanah menggunakan pembacaan *settlement plate* belum tentu mencerminkan peningkatan nilai kuat geser tanah. Pengukuran nilai derajat konsolidasi akan mendekati kondisi aktual jika analisis dilakukan berdasarkan peningkatan kuat geser tanah.
4. Untuk mendapatkan koefisien perubahan volume ( $m_v$ ) digunakan koefisien nilai  $\alpha$ . Tanah Jakarta marine clay memiliki rentang nilai  $\alpha$  sebesar 2.5 – 4.2 dan nilai  $Ch$  berdasarkan *back analysis* diperoleh 1.29 kali nilai  $C_v$ . Memiliki sensitivity 1.5 – 4 dengan rata-rata nilai 2.1
5. Untuk tanah clay, nilai kuat geser residual ( $Su_r$ ) tanah merupakan nilai *sleeve resistance* ( $f_s$ ). Pada uji CPT tanah marine clay di teluk Jakarta perbandingan  $qc/f_s$  mendekati 31. Maka nilai  $Su_r = qc/31$ . Pada uji CPTu tanah marine clay di teluk Jakarta, perbandingan  $qt/f_s$  mendekati 38. Maka nilai  $Su_r = qt/38$ .
6. Korelasi nilai  $qc/f_s$  dan  $qt/f_s$  dalam penelitian ini menggunakan data tanah Jakarta marine clay. Diperlukan penelitian lebih banyak sehingga diperoleh korelasi nilai parameter  $qc/f_s$  dan  $qt/f_s$  untuk jenis tanah yang berbeda.

## Daftar Pustaka

- Asaoka, A, 1978, *Observational procedure of settlement prediction*, Soils and Foundations, Vol. 18, No. 4, 87-10
- Barron, R.A, 1948, *Consolidation of Fine Grained Soils by Drain Wells*, Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 113: 718-724
- CUR, 1996, *Building in Soft Soils*, AA Balkema. Rotterdam, Brookfield
- Chu, J. and Yan, S.W, 2005, *Application of the Vacuum Preloading Method in Soil Improvement Projects*. Ground Improvement Case Histories, Elsevier Geo-Engineering Book Series
- Desiani, A, 2017, *Karakteristik Tanah Lunak Cekungan Bandung Berdasarkan Uji In Situ*, Disertasi, Universitas Katolik Parahyangan Bandung
- Jie Han, 1964, *Principles and Practices of Ground Improvement*, Wiley
- Karlsrud, K., Lunne, T. & Brattlieu, K, 1996, *Improved CPTu correlations based on block samples*, Nordisk Geoteknikermote, Reykjavik
- Márcio de Souza S. Almeida, 2013, *Design and Performance of Embankments on Very Soft Soils*, CRC Press
- Mesri, G., 1989, *A Reevaluation of  $S_u(mob) = 0.22 \sigma'_p$  Using Laboratory Shear Tests*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 26, No. 1, pp. 162-164, 1989
- Mitchell, J.K. and Gardner; W.S, 1975, *In Situ Measurement of Volume Change Characteristics*, Proceedings of the Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties, Specialty Conf. of the Geotechnical Div., North Carolina State University, Raleigh, Vol. II, pp. 279-345
- N.P. López-Acosta, 2019, *Performance of a test embankment on very soft clayey soil improved with drain-to-drain vacuum preloading technology*, Geotextiles and Geomembranes
- Rahardjo, P. P, 1997, *Pemodelan Konsolidasi dengan Vertikal Drain pada Lempung Lunak*, Universitas Katolik Parahyangan
- Rahardjo, P.P, 2016, *CPTu in Consolidating Soils*, Proceeding International Conference for Site Characterization" ISC 5th, Gold coast Australia.
- Rahardjo, P. P, 2008, *Penyelidikan Geoteknik dengan Uji-Insitu*, Universitas Katolik Parahyangan
- Rahardjo, P. P, 1996, *Review of Soil Investigation for Jakarta Reclamation Project*, Intern Report, Unpublished
- Rahardjo, P. P, 1998, *Site Characterization for Reclamation Project in North Jakarta*, Geotechnical Site Characterization ISBN 90 5410 939 4
- Robertson, P.K, Cabal, K.L, 2014, *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering 6th Edition*, Gregg Drilling & Testing, Inc. Signal hill, California
- Rongsadi, Kirana, 2017, *Evaluasi Performa/Perilaku Tanah Lunak Setelah Vacuum Preloading dengan Menggunakan CPTu*, Thesis, Universitas Katolik Parahyangan Bandung
- Schmertmann, 1978, *Cone Penetration Test*, US Department
- Setiawan, Ricky, 2017, *Interpretasi Uji CPTu pada Tanah Dasar dan Endapan Erupsi Lumpur di Sidoarjo, Jawa Timur*, Thesis, Universitas Katolik Parahyangan Bandung
- Setionegoro, Nurindahsih, 2013, *Studi Karakterisasi Lapangan Lapisan Tanah Lempung Lunak Under-Consolidating Menggunakan Hasil Uji Piezocone*, Disertasi, Universitas Katolik Parahyangan Bandung
- Shuangxi Feng, 2021, *Analysis of Ground Deformation Development and Settlement Prediction By Air-Boosted Vacuum Preloading*, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering
- Yulianto, D, 2018, *Kajian Performance Vacuum Preloading pada Tanah Lunak Endapan Danau (Lacustrine) di Bandung*, Thesis, Universitas Katolik Parahyangan Bandung

