

## BACK ANALYSIS PARAMETER KONSOLIDASI PADA PEMBEBANAN VAKUM DENGAN PVD

oleh :

**Ronald Yohanson**

Teknik Sipil Universitas Indonesia  
Email : ronald.yohanson@gmail.com

**Tommy Ilyas**

Teknik Sipil Universitas Indonesia  
Email : tilyas10@gmail.com

**Abstrak :** *Back Analysis* parameter-parameter konsolidasi dilakukan pada proses penurunan tanah secara konsolidasi dengan pembebanan vakum pada metode perbaikan tanah dengan PVD pada jalan tol Palembang – Indralaya. Parameter konsolidasi yang dianalisis adalah koefisien konsolidasi, tekanan pra-konsolidasi, indeks kompresi dan kompresi, dan permeabilitas tanah horizontal. Evaluasi derajat konsolidasi pertama kali dilakukan untuk menilai kemajuan konsolidasi dengan menggunakan data lapangan penurunan tanah dan tekanan air pori. Perilaku penurunan tanah terhadap waktu hasil monitoring lapangan dapat dianalisis dengan menggunakan metode Asaoka tidak hanya untuk mengestimasi derajat konsolidasi dan penurunan tanah akhir, tetapi juga koefisien konsolidasi dan permeabilitas tanah. Karena tekanan air pori juga memainkan peran penting dalam konsolidasi vakum, menjadi hal yang penting untuk melakukan back analysis menggunakan perilaku tekanan air pori selama proses konsolidasi.

**Kata kunci :** Penurunan tanah konsolidasi, PVD, Pembebanan vakum, Back Analysis

**Abstract :** *A back analysis of important consolidation parameters was conducted on vacuum preloading consolidation settlement of PVD improved ground of Palembang – Indralaya toll road. Consolidation parameters analysed are the coefficient of consolidation, pre-consolidation stress, recompression and compression index, and horizontal soil permeability. Degree of consolidation evaluation was first carried out to assess the consolidation progress by using both field settlement and pore water pressure data. Field time-settlement behavior can be analysed using Asaoka method not only to predict the degree of consolidation and ultimate settlement, but also coefficient of consolidation and soil permeability. Since pore water pressure also plays an important role in vacuum consolidation, it is important to back analysed using pore water pressure behavior during the consolidation process. Consolidation parameters obtained from the back analysis then compared with parameters obtained from laboratory results.*

**Keywords :** *Consolidation settlement, PVD, vacuum preloading, Back analysis*

### Pendahuluan

Proyek infrastruktur prioritas pemerintah hingga 2019 salah satunya adalah pembangunan Jalan Tol Trans Sumatra. Rencana pembangunan jalan tol ini masuk ke dalam Peraturan Presiden Nomor 100

Tahun 2014 tentang Percepatan Pembangunan Jalan Tol di Pulau Sumatera, dalam rangka pelaksanaan Masterplan Percepatan Pembangunan dan Perluasan Ekonomi Indonesia 2010-2015. Salah satu jalur lintas penghubung dalam

pembangunan Jalan Tol Trans Sumatera ini adalah ruas Jalan Tol Palembang – Indralaya dengan panjang 21,93 km.

Berdasarkan struktur geologisnya, sebagian area ini merupakan area endapan rawa berjenis lempung lanauan dengan konsistensi sangat lunak hingga lunak. Struktur endapan rawa ini dapat dijumpai dari Sta 1+000 hingga kurang lebih Sta 9+625. Tanah jenis ini memiliki daya dukung yang rendah dan mengalami penurunan yang tinggi pada saat pembebanan. Untuk itu, perlunya dilakukan perbaikan tanah sebelum kegiatan konstruksi untuk mencegah terjadinya penurunan berlebih maupun perbedaan penurunan setelah fase konstruksi dan berpotensi merusak struktur jalan tersebut. Salah satu metode perbaikan tanah lunak yang murah dan cepat adalah metode konsolidasi vakum dengan PVD (*prefabricated vertical drain*). Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh Kjellmann pada tahun 1952. Biaya penggunaan metode ini lebih murah sekitar 30% dibandingkan dengan metode pembebanan dengan pengisian tanah dengan beban yang sama (Shang et al, 1998; Chu et al, 2000). Metode ini telah banyak dilakukan di berbagai negara seperti Cina, Jepang, Thailand, Vietnam, Singapura, akan tetapi sedikit terbatas penggunaannya di Indonesia sendiri.

Pekerjaan yang diusulkan dalam penelitian ini adalah untuk melakukan *back analysis* terhadap hasil pengukuran penurunan tanah dan tekanan air pori pada area perbaikan tanah dengan metode pembebanan vakum pada jalan tol yang dibangun di atas lempung sangat lunak dan untuk menyelidiki perilaku tanah berdasarkan data yang tersedia. Koefisien konsolidasi horizontal, indeks kompresi dan rekompresi, permeabilitas tanah

merupakan parameter-parameter penting yang didapatkan dari hasil *back analysis*. Validasi dilakukan menggunakan bantuan pemodelan elemen hingga dalam 3 dimensi dengan geometri jalan yang aktual dengan membandingkan hasil penurunan tanah dengan hasil pengukuran aktual.

### **Metode *Back Analysis* Parameter Konsolidasi**

#### **Derajat Konsolidasi dan Akhir dari Penurunan Tanah Primer**

Secara umum, jika seorang analis ingin memeriksa kembali validitas hasil analisisnya, maka analis tersebut dapat melakukan perhitungan kembali menggunakan data grafik penurunan terhadap waktu yang asli dari hasil monitoring, proses ini disebut sebagai *back analysis*. Derajat konsolidasi umumnya digunakan sebagai salah satu kriteria untuk menilai keefektifan pekerjaan perbaikan tanah baik menggunakan metode pembebanan permukaan maupun metode pembebanan vakum.

Terdapat berbagai metode yang tersedia untuk memperkirakan penurunan akhir dan derajat konsolidasi suatu lapisan tanah. Salah satu metode yang paling populer ada metode Asaoka (1978). Keuntungan dari metode ini adalah kesederhanaan dalam penggunaan grafiknya. Analisa dengan metode Asaoka menggunakan hasil monitoring penurunan tanah untuk konsolidasi 1 dimensi untuk melakukan pemeriksaan kembali hasil perhitungan desain dengan data hasil monitoring. Koefisien konsolidasi horizontal in situ juga dapat dihitung kembali menggunakan analisis ini.

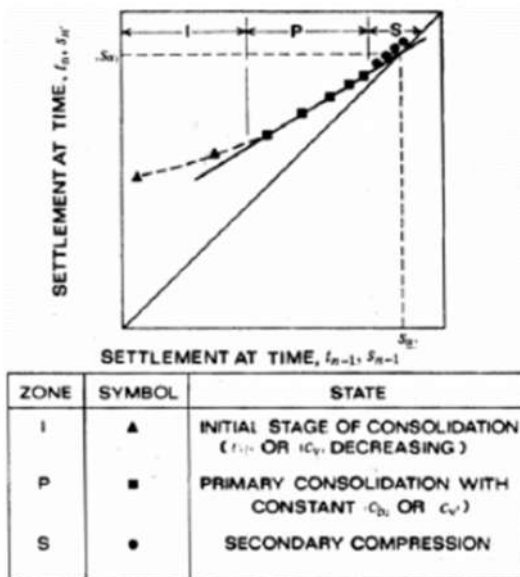
Penurunan tanah satu dimensi pada interval waktu tertentu dapat di hitung menggunakan persamaan berikut:

$$S_n = \beta_0 + \beta_1 \cdot S_{n-1} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , adalah hasil monitoring penurunan tanah pada satuan waktu  $t_n$ . Penurunan akhir pada konsolidasi primer berdasarkan metode Asaoka didapatkan apabila garis  $S_n$  vs  $S_{n-1}$  memotong garis 45° atau yang berarti  $S_n = S_{n-1}$ .

$$S_{ult} = \frac{\beta_0}{1-\beta_1} \dots \dots \dots (2)$$

Selain asumsi konsolidasi 1 dimensi, metode Asaoka juga mengasumsikan bahwa beban tanah konstan dan tanah bersifat homogen. Jika ketiga asumsi tersebut tidak terpenuhi, maka data hasil monitoring mungkin memiliki lengkungan ke atas pada bagian awal dan akhir penurunan tanah (Holtz et al, 1991), seperti yang terlihat pada Gambar 1.



**Gambar 1. Grafik Asaoka pada Beban Tidak Konstan (Holtz et al, 1991).**

Untuk melakukan estimasi nilai koefisien konsolidasi in situ ( $C_h$ ), Magnan dan Deroy (1980) melakukan perhitungan hanya pada konsolidasi radial dengan persamaan berikut:

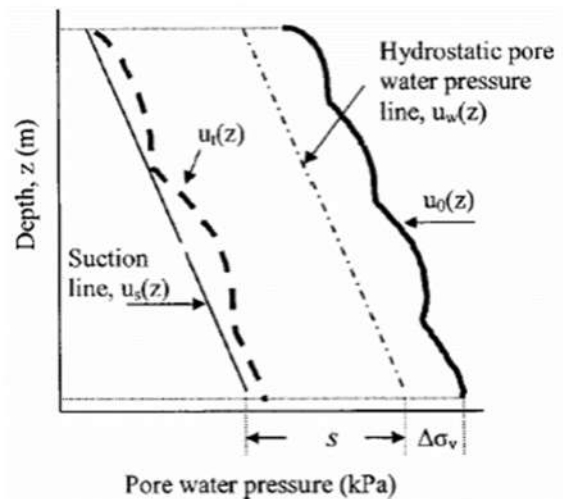
$$\frac{\ln \beta_1}{\Delta t} = \frac{8C_h}{\mu d_e^2} \dots \dots \dots (3)$$

Dimana,  $d_e$  adalah diameter ekuivalen silinder tanah,  $\mu$  adalah faktor efek dari jarak saluran (PVD),  $\Delta t$  adalah perbedaan waktu.

$$\mu = \frac{n^2}{n^2-1} \ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2} \dots \dots \dots (4)$$

Dimana,  $n$  adalah rasio jarak antar saluran (PVD),  $n=d_e/d_w$  ( $d_w$  = diameter saluran ekuivalen).

Derajat konsolidasi dapat dinilai menggunakan hasil monitoring tekanan air pori (Chu dan Yan, 2005). Untuk dapat memperkirakan derajat konsolidasi rata-rata, distribusi tekanan air pori harus dibangun sebelumnya. Ilustrasi distribusi tekanan air pori pada konsolidasi dengan gabungan antara beban permukaan dan pembebanan vakum dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2. Distribusi Tekanan Air Pori pada Gabungan Pembebanan Permukaan dan Pembebanan Vakum (Chu dan Yan, 2005).**

Berdasarkan gambar di atas, derajat konsolidasi rata-rata dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\bar{U} = 1 - \frac{\int [u_t(z) - u_s(z)] dz}{\int [u_0(z) - u_s(z)] dz} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana,  $u_s(z) = \gamma_w z - s = suction\ line$ ,  $u_0(z) =$  tekanan air pori awal pada kedalaman  $z$ ,  $u_t(z) =$  tekanan air pori pada kedalaman  $z$  pada suatu waktu  $t$ ,  $s =$  tekanan vakum.

Persamaan yang diajukan oleh Barron (1948) pada kondisi pengaliran yang sempurna (tanpa memperhitungkan efek smear dan tahanan saluran) adalah sebagai berikut:

$$U_h = 1 - exp\left(\frac{-8T_h}{\mu}\right) \dots\dots\dots (6)$$

Dimana,  $U_h$  adalah derajat konsolidasi horizontal,  $T_h$  adalah faktor waktu.

Aboshi dan Monden (1963) mempresentasikan metode pencocokan kurva menggunakan kurva log  $U$  dan  $t$  linear. Metode ini dihasilkan dengan menghilangkan "log" dari kedua sisi pada persamaan Barron yang menghasilkan persamaan berikut:

$$T_h = \frac{-\mu(\ln(1-U_h))}{8} \dots\dots\dots (7)$$

Dimana,  $T_h$  adalah faktor waktu yang dapat dihitung menggunakan:

$$T_h = \frac{C_h t}{d_e^2} \dots\dots\dots (8)$$

Dari substitusi kedua persamaan di atas, nilai koefisien konsolidasi horizontal  $C_h$  dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$C_h = \frac{d_e^2 \mu \ln(1-U_h)}{8t} \dots\dots\dots (9)$$

**Back Analysis Parameter Kompresibilitas Tanah ( $\sigma'_p$ ,  $C_c$  dan  $C_r$ )**

Hasil monitoring lapangan dapat digunakan untuk memverifikasi hasil pengujian laboratorium. Berdasarkan pengukuran penurunan tanah selama proses konsolidasi, besaran penurunan  $\Delta S$  dari dua waktu

pengukuran dapat dihitung. Angka pori rata-rata tanah ( $e$ ) selama proses konsolidasi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut di bawah ini.

$$e = e_0 - \frac{1+e_0}{H_0} \Delta s \dots\dots\dots (10)$$

Dimana  $H_0$  adalah ketebalan awal lapisan tanah diantara dua titik monitoring (piezometer dan extensometer), dan  $e_0$  adalah angka pori awal. Sedangkan nilai tegangan vertikal efektif lapisan tanah diantara dua titik pengamatan selama proses konsolidasi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\sigma'_v = \sigma'_{v1} - \frac{r_e^2 \Delta u \mu}{r_e^2 \ln\left(\frac{r}{r_w}\right) - \frac{r^2 - r_w^2}{2}} \dots\dots\dots (11)$$

Dimana,  $\sigma'_{v1} =$  Tegangan vertikal efektif akhir.

Dari kedua persamaan di atas, grafik  $e$  terhadap  $\sigma'_v$  dapat dibangun untuk tiap-tiap lapisan tanah yang mengalami konsolidasi. Dari grafik hasil perhitungan *back analysis* tersebut, nilai tegangan pra-konsolidasi ( $\sigma'_p$ ) dapat ditentukan dengan metode Casagrande atau metode penentuan pra-konsolidasi lain yang menggunakan grafik yang sama.

Indeks rekompresi ( $C_r$ ) dan indeks kompresi ( $C_c$ ) dapat dihitung setelah tegangan pra-konsolidasi didapatkan, perhitungan *back analysis* parameter kompresibilitas tanah tersebut dilakukan menggunakan beban timbunan, beban vakum dan hasil monitoring penurunan tanah dari persamaan-persamaan berikut.

$$S_r = \sum_{i=1}^m \frac{C_{ri}}{1+e_0} \Delta h_i \log\left(\frac{\sigma'_{pi}}{\sigma'_{voi}}\right) \dots\dots\dots (12)$$

$$S_c = \sum_{i=1}^m \frac{C_{ci}}{1+e_0} \Delta h_i \log\left(\frac{\sigma'_{voi} + \Delta \sigma_i}{\sigma'_{pi}}\right) \dots\dots\dots (13)$$

**Back Analysis Parameter Koefisien Permeabilitas Tanah**

Koefisien permeabilitas tanah pada kondisi ideal dapat dihitung dengan menggunakan data monitoring berdasarkan hasil *back analysis* nilai koefisien konsolidasi horizontal tanah yang telah dibahas pada sub-bab 2.1, perhitungan dilakukan menggunakan persamaan di bawah ini.

$$k_h = \gamma_w m_v C_h \approx \frac{\gamma_w (RR) C_h}{2.3 \sigma'_{v0}} \dots\dots\dots (14)$$

Dimana,  $m_v$  = koefisien kompresibilitas volume,  $RR$  = rasio rekompresi.

**Area Penelitian**

Area penelitian merupakan jalan tol ruas Palembang – Indralaya dari sta 0+050 m hingga sta 1+100 m. Jalan tol ini terbagi menjadi 3 seksi dengan panjang total 21,93 km.

Berdasarkan peta geologi lembar Lahat (Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, 1989), area penelitian merupakan endapan rawa (Qs) yang terdiri dari lempung dan lanau yang tersebar secara dominan di permukaan. Untuk dapat mengetahui kondisi geoteknik area penelitian, beberapa jenis penyelidikan tanah telah dilakukan seperti, pengeboran dalam, pengeboran dangkal, CPT, dan pengujian laboratorium.

Hasil penyelidikan tanah menguraikan bahwa lapisan tanah di area penelitian hingga kedalaman 40 m terdiri dari 4 lapis. Lapisan tanah pertama merupakan lempung lanauan dengan ketebalan 7 m hingga 14 m dengan konsistensi sangat lunak hingga lunak, lapisan tanah kedua merupakan lempung lanauan dengan ketebalan 4 hingga 10 m dengan konsistensi kekakuan sedang, lapisan tanah ketiga merupakan pasir lempungan dengan ketebalan 13 m hingga 14 m dengan kepadatan sedang hingga padat, dan lapisan tanah terakhir adalah

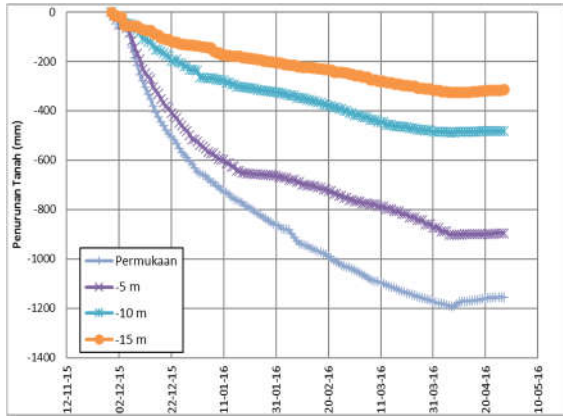
lapisan lempung dengan konsistensi sangat kaku. Kedalaman muka air tanah berkisar antara 0,5 m hingga 1 m.

Sifat fisik dan sifat mekanik dari lapisan tanah di tabulasikan pada Tabel 1 di bawah ini.

**Tabel 1. Sifat Fisik dan Mekanik Tanah pada titik BH-1 (sta 1+000)**

No	Sifat Tanah	BH-1			
		1,00-1,50	4,00-4,50	10,00-10,50	14,00-14,50
1	Y (gr/c m <sup>3</sup> )	1.307	1.450	1.809	1.721
2	Gs (gr/c m <sup>3</sup> )	2.5576	2.5546	2.5807	2.5773
3	LL (%)	100.21	99.05	54.21	50.00
4	PL (%)	37.26	38.10	24.61	27.53
5	PI (%)	62.95	60.95	29.60	22.47
6	e <sub>o</sub>	2.5962	2.7775	1.0059	1.0965
7	C <sub>c</sub>	0.88	1.22	0.33	0.25
8	C <sub>v</sub> (cm <sup>2</sup> /dt)	0.0157	0.0263	0.0290	0.0271
9	k	3.12E-6	7.08E-6	3.59E-6	2.22E-6

Hasil monitoring penurunan tanah selama proses vakum yang didapatkan dari *settlement plate* (permukaan) dan extensometer (-5 m, -10 m, -15 m) dapat dilihat pada Gambar 3.



**Gambar 3. Hasil Monitoring Penurunan Tanah Selama Pembebanan Vakum pada Sta 1+100**

**Perilaku Konsolidasi pada Proses Vakum**

Perhitungan dengan metode Asaoka dilakukan pada 7 lokasi di zona 2 (Sta 0+750 – 1+150). Metode Asaoka menggunakan grafik  $S_n$  vs  $S_{n-1}$  dalam menentukan akhir dari konsolidasi primer ( $S_{ult}$ ). Data penurunan tanah dengan interval waktu yang konstan di plot ke dalam grafik dengan nilai  $S_n$  pada sumbu y dan nilai  $S_{n-1}$  pada sumbu x yang kemudian dihubungkan hingga membentuk garis lurus. Konstanta  $\beta_0$  didapatkan dengan cara melakukan ekstrapolasi garis yang sudah dibuat ke arah sumbu y ( $S_{n-1} = 0$ ). Penurunan akhir ( $S_{ult}$ ) adalah titik pertemuan antara garis yang telah dibuat di atas dengan garis 45°, karena  $S_{ult}$  adalah titik pada saat  $S_n=S_{n-1}$  (Asaoka, 1978). Konstanta  $\beta_1$  kemudian dapat dihitung menggunakan persamaan 2. Hasil perhitungan nilai  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $S_{ult}$  dan derajat konsolidasi dapat dilihat pada Tabel 2.

Dari tabel 2 terlihat bahwa derajat konsolidasi di semua titik pengamatan yang dihitung dengan menggunakan metode Asaoka berkisar antara 72.95% - 85.04% dimana derajat konsolidasi belum mencapai minimum persyaratan dari spesifikasi yang diinginkan yaitu minimum 90%.

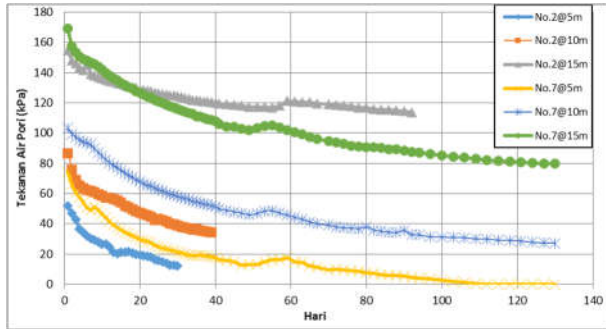
Perhitungan derajat konsolidasi dengan menggunakan data tekanan air pori

dilakukan hanya pada Zona 2 point 7 (sta 1+100 m). Pembacaan tekanan air pori dilakukan pada 3 kedalaman yang berbeda pada setiap titik pengamatan, yaitu pada kedalaman 5 m, 10 m dan 15 m, hal yang disayangkan adalah tidak adanya piezometer yang terpasang pada permukaan tanah atau kedalaman yang mendekati permukaan tanah. Hasil pengamatan tekanan air pori dapat dilihat pada gambar 4 di bawah.

**Tabel 2. Derajat Konsolidasi dan Akhir dari Konsolidasi Primer Menggunakan Metode Asaoka**

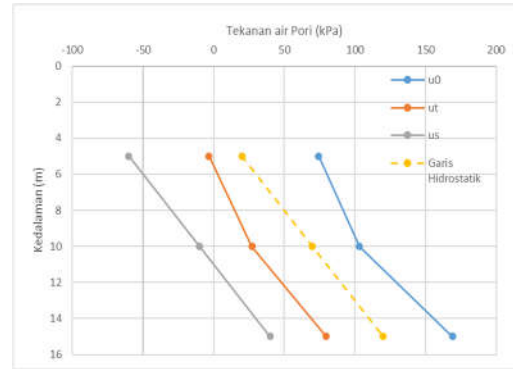
Titik Pengamatan	$\beta_0$	$\beta_1$	$S_{ult}$ (mm)	$S_n$ (Penu-run aktual) (mm)	Derajat Konsolidasi (%)
Point 1 (sta 0+775)	24.1	0.986	1727.4	1469	85.04
Point 2 (sta 0+850)	14.34	0.987	1266.1	1020	80.56
Point 3 (sta 0+900)	10.58	0.991	1216	887	72.95
Point 4 (sta 0+900)	12.96	0.988	1047.9	874	83.40
Point 5 (sta 1+000)	14.82	0.987	1166	989	84.82
Point 6 (sta 1+100)	11.19	0.992	1359.2	1024	75.34

1+000					
)					
Point 7					
(sta	17.	0.9	144		
1+100	61	88	5.5	1188	82.19
)					



**Gambar 4. Grafik Tekanan Air Pori vs Waktu pada Zona 2 Point 2 (sta 0+850) dan Point 7 (sta 1+100).**

Menggunakan data tekanan air pori yang telah ditampilkan pada gambar 4 di atas, distribusi tekanan air pori awal, tekanan air pori akhir, garis hidrostatik dan *suction line* kemudian di gambar pada Grafik tekanan air pori terhadap kedalaman seperti yang terlihat pada Gambar 5. Dari gambar terlihat bahwa tekanan air pori awal secara umum lebih besar dari garis hidrostatik, hal ini dikarenakan pada fase awal, adanya tekanan air pori berlebih akibat penambahan beban dari lapisan pasir yang dipasang pada saat persiapan proses vakum dan tanah sedang mengalami proses konsolidasi akibat dari beban tersebut.



**Gambar 5. Grafik Tekanan Air Pori vs Kedalaman pada Zona 2 Point 7 (sta 1+100).**

Pada akhir dari pembebanan vakum, tekanan air pori berkurang antara 78-88 kPa mendekati ke arah *suction line*, sedangkan akhir dari konsolidasi primer dicapai pada saat besaran tekanan air pori ( $u_t$ ) sama dengan *suction line*. Hal ini mengindikasikan bahwa berdasarkan analisa tekanan air pori, proses vakum belum mendekati akhir dari konsolidasi primernya. Derajat konsolidasi rata-rata dari perhitungan menggunakan data tekanan air pori adalah 65.15 %. Akhir dari konsolidasi didapatkan dengan cara membagi penurunan aktual pada permukaan tanah saat akhir dari proses vakum (1188 mm) dengan derajat konsolidasi rata-rata (65.15%), sehingga didapatkan penurunan total pada akhir dari konsolidasi primer sebesar 1823.5 mm. Perbandingan derajat konsolidasi antara dua metode di atas dilakukan pada zona 2 point 7 dengan membandingkan besaran derajat konsolidasi pada durasi vakum 30, 45, 60, 90 dan pada akhir proses vakum. Derajat konsolidasi yang dihitung dengan kedua metode tersebut ditampilkan pada Tabel 3. Dari tabel perbandingan di atas terlihat bahwa secara umum, derajat konsolidasi yang dihitung berdasarkan penurunan tanah cenderung lebih besar dibandingkan

derajat konsolidasi yang dihitung berdasarkan tekanan air pori. Adanya perbedaan ini mungkin disebabkan pada posisi pemasangan piezometer yang biasanya dipasang di tengah di antara 2 PVD dimana pada area ini mempunyai tekanan air pori yang terbesar karena jarak antar PVD yang terjauh.

**Tabel 3. Perbandingan Derajat Konsolidasi Pada berbagai Durasi Vakum (Zona 2 Point 7)**

Durasi Vakum (Hari)	Berdasarkan Penurunan Tanah (%)	Berdasarkan Tekanan Air Pori (%)
30 Hari	40.7	40.1
45 Hari	50.6	47.9
60 Hari	57.9	50.2
90 Hari	71.2	58.1
130 Hari (Akhir dari proses vakum)	82.2	65.1

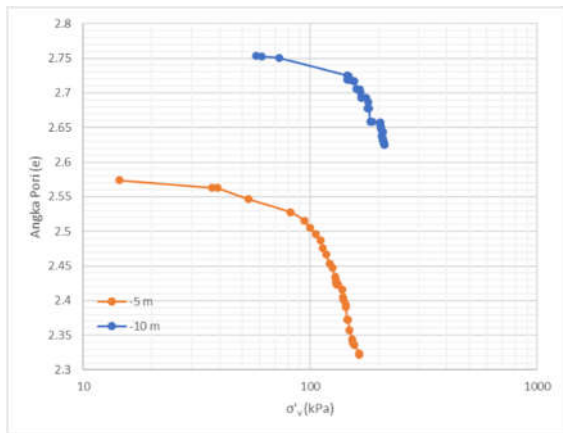
Pada tahap awal konsolidasi, yaitu pada durasi vakum 30 dan 45 hari, terlihat bahwa derajat konsolidasi diantara kedua metode menunjukkan nilai yang relatif sama, akan tetapi seiring dengan berjalannya proses vakum (>60 hari), perbedaan yang cukup signifikan terlihat diantara keduanya, terutama pada derajat konsolidasi dengan menggunakan tekanan air pori, peningkatan derajat konsolidasi terlihat melambat dibandingkan dengan metode Asaoka, fenomena seperti ini juga dilaporkan juga oleh Arulrajah (2004) dan Bo et al (1999). Fenomena ini disebabkan karena beberapa hal yaitu adanya pergerakan partikel-partikel tanah dalam skala besar selama proses konsolidasi vakum yang menghasilkan peningkatan distribusi tekanan air pori, proses pergerakan dan

tertahannya partikel tanah tersebut lama kelamaan akan membentuk lapisan penyumbat, tekanan air pori mungkin menunjukkan tingkat yang lebih tinggi karena adanya kompresi dan penataan ulang struktur tanah seperti yang juga dijelaskan oleh peneliti lain (Chu dan Yan, 2005), atau akibat adanya kondisi ketidakpastian dalam memprediksi penurunan akhir menggunakan data penurunan tanah yang mungkin disebabkan adanya pengaruh dari penurunan seketika atau penurunan sekunder.

**Tegangan Pra-Konsolidasi dan Parameter Kompresibilitas**

Parameter tegangan pra-konsolidasi ( $\sigma'_p$ ), indeks kompresi ( $C_c$ ) dan indeks rekompresi ( $C_r$ ) merupakan tiga parameter yang diperlukan dalam menghitung penurunan konsolidasi. Umumnya, parameter-parameter ini ditentukan dengan oedometer test (pengujian konsolidasi) pada saat pengujian laboratorium. Hasil pengamatan lapangan juga dapat digunakan untuk mendapatkan parameter-parameter kompresibilitas ini, tegangan pra-konsolidasi didapatkan dengan cara membangun grafik angka pori ( $e$ ) terhadap tegangan efektif ( $\sigma'_v$ ). Nilai angka pori pada saat penurunan tertentu didapatkan dengan menggunakan persamaan 10 dan nilai tegangan efektif didapatkan dengan menggunakan persamaan 11. Selanjutnya, nilai tegangan pra-konsolidasi dapat dihitung dengan menggunakan metode Casagrande. Setelah tegangan pra-konsolidasi didapatkan, selanjutnya nilai indeks rekompresi dan indeks kompresi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan konsolidasi 12 dan 13.



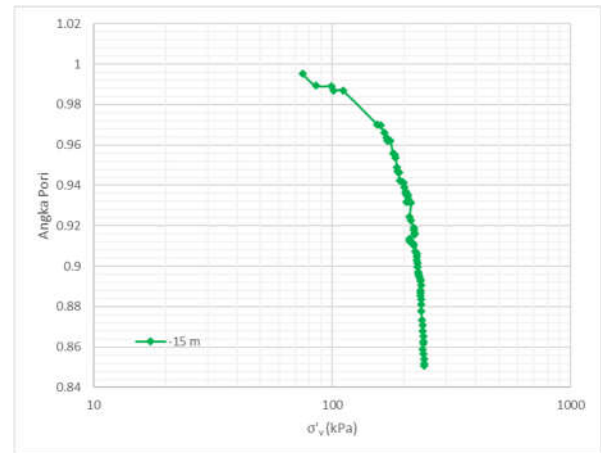


**Gambar 6. Grafik Angka Pori vs Tegangan Efektif pada Kedalaman 5 dan 10 m**

Back analysis parameter kompresibilitas hanya dilakukan pada zona 2 point 7 (sta 1+100) dikarenakan hanya pada titik ini data monitoring yang diperlukan cukup lengkap (penurunan tanah tiap lapisan, dan tekanan air pori tiap lapisan). Grafik angka pori terhadap tegangan efektif tpada kedalaman 5m, 10m, dan 15m dapat dilihat pada Gambar 6 dan 7.

Tabel 4 menunjukkan perbandingan nilai parameter tegangan pra-konsolidasi, indeks rekompresi dan indeks kompresi antara hasil dari perhitungan back analysis dan data laboratorium pengujian oedometer. Secara umum terlihat bahwa nilai tegangan pra-konsolidasi mempunyai besaran yang relatif sama antara hasil back analysis dengan pengujian laboratorium, meskipun nilai tegangan hasil pengujian laboratorium sedikit lebih rendah pada kedalaman 15 m, hal ini biasanya disebabkan karena adanya gangguan pada sampel tanah tidak terganggu, baik pada saat pengambilan sampel atau pada saat transportasi sampel dari lokasi penelitian hingga laboratorium, mengingat sampel diambil di area Palembang sedangkan pengujian laboratorium dilakukan ditempat lain. Nilai indeks rekompresi hasil dari perhitungan

back analysis secara umum lebih rendah dari nilai laboratorium.



**Gambar 7. Grafik Angka Pori vs Tegangan Efektif pada Kedalaman 15 m**

**Tabel 4. Parameter Kompresibilitas Tanah Hasil Back Analysis dan Hasil Pengujian Laboratorium**

Kedalaman	Back Analysis			Laboratorium		
	$\sigma'_p$ (kPa)	$C_r$	$C_c$	$\sigma'_p$ (kPa)	$C_r$	$C_c$
5 m	10	0.0	1.4	11	0.0	0.8
	7	9	69	5	92	793
10 m	15	0.0	1.2	15	0.1	1.2
	0	82	74	0	28	21
15 m	17	0.1	1.4	16	0.0	0.3
	5	04	7	5	32	3

**Back Analysis Parameter Koefisien Konsolidasi Horizontal Tanah (Ch) dan Permeabilitas Tanah (Kh)**

Perhitungan back analysis untuk mendapatkan nilai koefisien konsolidasi horizontal tanah menggunakan metode asaoka dilakukan dengan memasukkan data

hasil perhitungan ke dalam persamaan 3 dan perhitungan menggunakan metode tekanan air pori dilakukan dengan memasukkan hasil perhitungan ke dalam persamaan 9. Perhitungan dengan metode asaoka dilakukan dengan menggunakan interval waktu 1 hari.

Hasil perhitungan parameter konsolidasi horizontal tanah baik dengan metode asaoka maupun tekanan air tanah ditabulasikan pada Tabel 5 di bawah.

**Tabel 5. Hasil Back Analysis dari koefisien Konsolidasi Horizontal ( $C_h$ )**

Lokasi	$C_h$ Metode Asaoka (m <sup>2</sup> /tahun)	$C_h$ Metode Tekanan Air Pori (m <sup>2</sup> /tahun)
Point 1	1.701541621	
Point 2	1.379364414	
Point 3	1.058198556	
Point 4	1.506911351	
Point 5	1.54874834	
Point 6	1.00105026	
Point 7	1.484756495	0.981931106

Dari Tabel 5 di atas terlihat bahwa nilai koefisien konsolidasi yang didapatkan dari metode tekanan air pori lebih rendah dibandingkan dengan metode asaoka, hal ini dikarenakan nilai derajat konsolidasi yang lebih rendah yang dihasilkan oleh metode tekanan air pori pada saat akhir dari proses vakum sehingga menghasilkan nilai koefisien konsolidasi yang rendah.

Nilai koefisien permeabilitas horizontal tanah didapatkan dengan cara *back analysis* menggunakan persamaan 14, dan hasil perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 6 berikut ini.

**Tabel 6. Hasil Back Analysis Permeabilitas Horizontal Tanah ( $K_h$ )**

Kedalaman	RR (Cr/1+e <sub>0</sub> )	$C_h$ (m <sup>2</sup> /year)	$\sigma'_{v0}$ (kPa)	$k_h$ (m/day)
	0.0250		9.7	4.452
0-5	76	1.48	4	6E-05
	0.0216		34.	1.071
5-10	47	1.48	93	8E-05
	0.0517		67.	1.327
10-14.5	19	1.48	36	9E-05

### Kesimpulan

Konsolidasi tanah menggunakan metode pembebanan vakum bukan merupakan suatu metode yang baru, akan tetapi metode ini baru berhasil dilakukan dalam beberapa tahun belakangan pada proyek-proyek yang besar seperti contohnya pada area jalan tol Palembang Indralaya ini. Pengisolasian massa tanah menggunakan membrane pelapis untuk area yang cukup luas agar tanah dapat dikonsolidasikan menggunakan bantuan system pompa vakum dan PVD merupakan faktor kunci dalam pelaksanaan pembebanan vakum yang dapat terukur kinerjanya.

Hasil *back analysis* derajat konsolidasi menggunakan metode Asaoka menunjukkan bahwa area penelitian telah mengalami konsolidasi sebesar 72.95% - 85.04% sedangkan dengan menggunakan metode tekanan air pori menunjukkan derajat konsolidasi rata-rata sebesar 65.15%. Derajat konsolidasi dari metode Asaoka memiliki kecenderungan nilai yang lebih besar dibandingkan derajat konsolidasi menggunakan metode tekanan air pori, hal ini disebabkan antara lain karena adanya perbedaan lokasi peralatan monitoring keduanya yaitu piezometer dan extensometer, perbedaan ini juga disebabkan karena adanya pergerakan partikel-partikel tanah dalam skala besar

selama proses konsolidasi vakum yang menghasilkan peningkatan distribusi tekanan air pori, proses pergerakan dan tertahannya partikel tanah tersebut lama kelamaan akan membentuk lapisan penyumbat, tekanan air pori mungkin menunjukkan tingkat yang lebih tinggi karena adanya kompresi dan penataan ulang struktur tanah.

Hasil *back analysis* terhadap nilai tegangan pra-konsolidasi menunjukkan besaran yang relatif sama dengan nilai pengujian laboratorium, sedangkan hasil *back analysis* nilai indeks kompresi dan indeks rekompresi menunjukkan nilai yang bervariasi antara hasil *back analysis* dengan nilai pengujian laboratorium. Namun secara umum nilai indeks rekompresi hasil *back analysis* memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan pengujian laboratorium, sedangkan nilai indeks kompresi hasil *back analysis* secara umum lebih besar dibandingkan pengujian laboratorium.

Nilai koefisien hasil dari *back analysis* menggunakan metode Asaoka menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan hasil *back analysis* menggunakan metode tekanan air pori. Hal ini dipengaruhi dari nilai derajat konsolidasi pada metode tekanan air pori yang lebih rendah dari metode Asaoka, sehingga menghasilkan nilai koefisien konsolidasi horizontal yang juga lebih rendah.

#### Daftar Pustaka

- Aboshi, H., & Monden, H. (1963). Determination of the Horizontal Coefficient of Consolidation of an alluvial clay. *Proc. 4th Australian-New Zealand Conf.SMFE*, (hal. 159-164).
- Asaoka, A. (1978). Observational procedure of settlement prediction. *Soils Found., Jap. Soc. Soil. Mech. Found. Eng*, 18(4), 87-101.
- Barron, R. A. (1984). Consolidation of Fine Grained Soils by Drain Wells. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 113, 718-724.
- Casagrande, A. (1936). The Determination of the Preconsolidation Load and Its Practical Significance. *1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (hal. 60-64). Cambridge.
- Chu, J., & Yan, S. W. (2005). Estimation of Degree of Consolidation for Vacuum Preloading Projects. *International Journal of Geomechanics*, 5, 158-165.
- Chu, J., Yan, S. W., & Yang, H. (2000). Soil improvement by the vacuum preloading method for an oil storage station. *Geotechnique*, Vol. 50, 625-632.
- Hansbo, S. (1981). Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. *In: Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng*, 3, hal. 677-682. Stockholm.
- Holtz, R. D., Jamiolkowski, M. B., Lancellotta, R., & Pedroni, R. (1991). *Prefabricated Vertical Drains: Design and Performance*. London: CIRIA.
- Indraratna, B., Bamunawita, C., & Khabbaz, H. (2004). Numerical modeling of vacuum preloading and field applications. *Canadian Geotechnical Journal*, 41, 1098-1110.
- Magnan, J. P., Pilot, G., & Queyroi, D. (1983). Back analysis of soil consolidation around vertical drains. *In: 8th ECSMFE*, 2, hal. 653-658. Balkema, Helsinki.
- Mesri, G., & Khan, A. Q. (2012). Ground Improvement Using Vacuum Loading Together with Vertical Drains. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(6), 680-689.
- Silva, P. F. (1970). A new graphical construction for determination of the pre-consolidation stress of a soil sample. *Proceedings 4th Brazilian*

*Conference Soil Mechanincs and  
Foundation Engineering, (hal. 225-232).  
Rio de Janeiro.*