



## Faktor Skala: Pengukuran Parameter Uji Konsolidasi Cepat Dan Perbandingan Dengan Odometer Konvensional

Steeva G. Rondonuwu<sup>#a</sup>, Oktovian B. A. Sompie<sup>#b</sup>, Alva N. Sarajar<sup>#c</sup>

<sup>#</sup>Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia  
<sup>a</sup>steeva\_rondonuwu@unsrat.ac.id, <sup>b</sup>spompie@unsrat.ac.id, <sup>c</sup>alva.sarajar@unsrat.ac.id

### Abstrak

Serangkaian uji konsolidasi cepat dilakukan dengan memodifikasi alat uji odometer konvensional dengan laju pembebanan tetap dan laju regangan tetap. Pengujian ini mempercepat lama pengujian konsolidasi satu dimensi sepuluh kali lebih cepat, dari sepuluh hari pada uji odometer konvensional menjadi tiga jam pada uji konsolidasi cepat. Selanjutnya dibandingkan kedua metode pengujian konsolidasi tersebut dan ditampilkan faktor skala yang dapat mengkonversi parameter uji odometer konvensional ke uji konsolidasi cepat, dan sebaliknya.

*Kata kunci: laju regangan tetap, laju pembebanan tetap, faktor skala, odometer, konsolidasi*

### 1. Pendahuluan

Proses penurunan tanah (land stability atau konsolidasi tanah) terjadi akibat adanya penambahan beban dan dalam proses waktu yang sedang berjalan. Ada dua permasalahan yang dihadapi dari proses konsolidasi yaitu untuk mendapatkan parameter besarnya penurunan dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai penurunan maksimum. Proses pengembangan alat uji konsolidasi standar dengan membuat panel kontrol untuk mengendalikan kecepatan pembebanan kemudian mengkondisikan sampel sesuai dengan kondisi terendam udara atau tanah jenuh telah dikembangkan (Sompie 2022), untuk mendapatkan parameter hasil uji konsolidasi pada kondisi konstruksi terendam udara seperti, tanggul atau bendungan tanah sampai dengan ketinggian 3 sampai dengan 5 meter. Hasil kajian acuan paten internasional, dengan menggunakan standar konsolidasi dan konsolidasi lainnya tanpa menggunakan kecepatan pembebanan seperti beberapa judul berikut: Model koefisien konsolidasi tanah dan metode penentuannya dari CN 104462202 A; Metode pengolahan pondasi tanah lunak untuk pengendalian penurunan konsolidasi sekunder CN 101806056 A; Metode Penentuan Parameter Reologi Tanah Lunak dan Alat Penentuan Parameter Reologi Tanah Lunak Berbasis Uji Relaksasi Tegangan Satu Dimensi; US 3608367 A. Peralatan Konsolidasi Tanah. Sebagai pengembangan dari Metode Pengujian Konsolidasi Standar (SC Test), dimana metode pengujian Constant Strain Rate Consolidation (CSRC) dan Constant Loading Rate Consolidation (CLRC) menunjukkan salah satu jenis Pengujian Konsolidasi Cepat yang cukup menjanjikan, karena mudah dilakukan dalam waktu yang lebih singkat dengan hasil berupa parameter kurva yang konsisten dengan standar konsolidasi dan konsolidasi dengan laju regangan konstan (Constant Strain Rate Consolidation). Selanjutnya telah didapatkan Paten Alat Uji Konsolidasi Cepat (Sompie, 2018).

Alat uji sebelumnya yang pernah dipatenkan yaitu alat uji konsolidasi cepat dengan No. Paten IDP000089005 yang diberikan tanggal 14 Agustus 2018 bisa mengukur penurunan vertikal dan beberapa parameter konsolidasi lainnya. Prinsip dan cara kerja alat tersebut telah dikembangkan berdasarkan alat uji konsolidasi konvensional. Parameter yang didapat melalui uji konsolidasi konvensional telah dikembangkan lebih cepat, efektif dan efisien pada alat uji konsolidasi cepat.

### 1.1. Latar Belakang

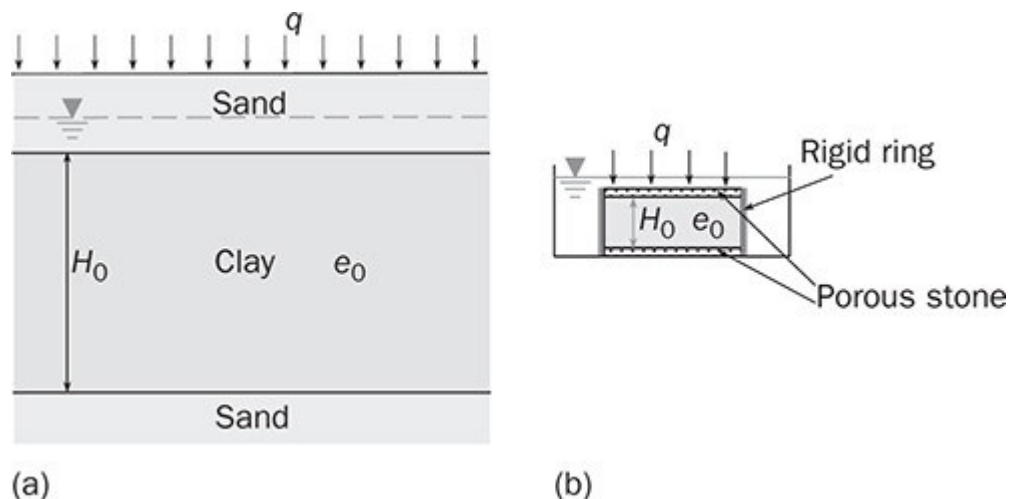
Pengujian tanah dengan konsolidasi wajib dilakukan pada pemeriksaan tanah lunak, sehingga topik ini menjadi pembelajaran wajib bagi mahasiswa S1 Teknik Sipil. Dengan alat uji konsolidasi konvensional, waktu yang diperlukan untuk satu uji membutuhkan 7- 10 hari. Dengan alat uji konsolidasi cepat hanya membutuhkan 2-3 hari. Pada kajian ini akan disajikan Faktor skala antara uji konsolidasi konvensional dengan uji konsolidasi cepat. Sehingga data dari uji konsolidasi konvensional akan dikonversikan melalui suatu faktor skala sehingga hasilnya akan sama dengan uji konsolidasi cepat, begitu juga sebaliknya.

Kajian ini membutuhkan serangkaian tes dengan alat odometer konvensional dan alat konsolidasi cepat.

## 2. Konsep Dasar

### 2.1. Konsolidasi Satu Dimensi

Lapisan tanah liat yang ditunjukkan pada Gambar 1. terjepit di antara dua lapisan pasir. Ketebalan awal lapisan lempung adalah  $H_0$  dan rasio rongga awal in situ dari lempung adalah  $e_0$ . Ketika pembebanan  $q$  dengan luas lateral yang besar diterapkan pada permukaan tanah, konsolidasi terjadi. Selama konsolidasi, diasumsikan bahwa regangan dan pengaliran di dalam tanah liat keduanya dalam arah vertikal. Tidak ada deformasi atau regangan lateral di dalam tanah. Sementara sebagian air dialirkan keluar karena disipasi kelebihan tekanan air pori, jalur drainase hanya vertikal. Tidak ada drainase ke arah horizontal. Artinya, lempung mengalami konsolidasi satu dimensi.



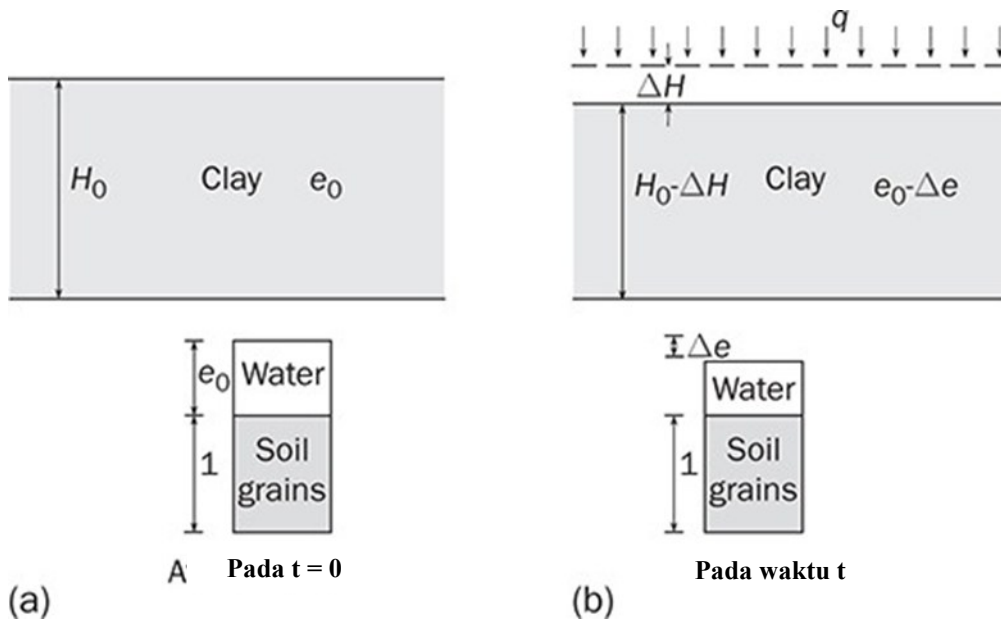
**Gambar 1.** Konsolidasi satu dimensi: (a) di lapangan, (b) di laboratorium

Gambar 1. menunjukkan susunan uji konsolidasi satu dimensi (oedometer) di laboratorium. Digunakan sampel tanah liat yang dibentuk kembali (remolded) dengan ketebalan  $H_0$  dan angka pori awal  $e_0$ , ditempatkan di dalam cincin logam kaku (cincin oedometer) untuk mencegah gesekan lateral.  $H_0$  adalah tinggi awal lapisan lempung di lapangan dan notasi yang sama pada ketebalan sampel lempung pada cincin oedometer. Dua batu berpori ditempatkan di bagian atas dan bawah, memungkinkan terjadinya pengaliran vertikal, sama halnya dengan lapisan pasir di lapangan. Ketika spesimen tanah liat diberi beban, maka terjadi konsolidasi satu dimensi, mereplikasi kondisi lapangan yang ditunjukkan pada Gambar 1.

### 2.2. Hubungan antara $\Delta e$ dan $\Delta H$ selama Konsolidasi

Gambar 2a menunjukkan lapisan lempung jenuh dengan tinggi awal  $H_0$  dan angka pori  $e_0$ , dengan diagram fasa di bawah ini. Gambar 2b menunjukkan hal yang sama, selama konsolidasi, setelah waktu  $t$  sejak pembebanan  $q$  diterapkan. Di sini,  $\Delta H$  dan  $\Delta e$  masing-masing adalah

penurunan tinggi dan angka pori, karena konsolidasi.



**Gambar 2.** Lapis lempung dan diagram fasa: (a) Pada waktu  $t = 0$ , (b) pada waktu  $t$  selama konsolidasi.

Regangan vertikal rata-rata pada waktu  $t$  dapat ditulis sebagai

$$\varepsilon_{\text{avg}} = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (1)$$

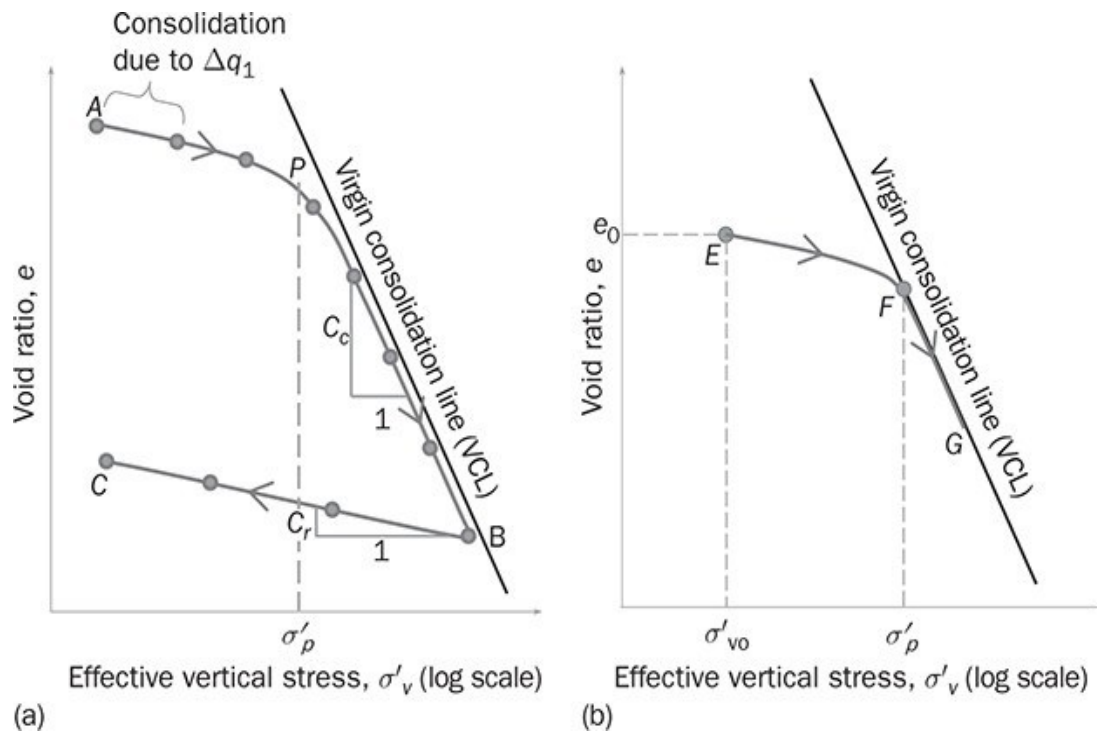
Dari diagram fase, regangan vertikal rata-rata yang sama dapat ditulis sebagai

$$\varepsilon_{\text{avg}} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (2)$$

Dari persamaan (1) dan (2) didapat:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (3)$$

Persamaan (3) berlaku sepanjang waktu selama konsolidasi, termasuk pada  $t = \infty$ . Oleh karena itu, jika pengurangan angka pori  $\Delta e$  pada  $t = \infty$  dapat ditentukan, penyelesaian konsolidasi akhir  $s_c$  (yaitu,  $\Delta H$  pada waktu  $t = \infty$ ) dapat dihitung dari Persamaan. (3).



Gambar 3. (a)  $e$  versus  $\sigma'_v$  plot dari laboratorium, (b)  $e$  versus  $\sigma'_v$  plot di lapangan.

Ada garis lurus unik yang disebut *Virgin Compression Line* (VCL) untuk setiap lempung. Segmen garis lurus dari plot  $e$ -log pada tekanan di luar tekanan prakonsolidasi bertepatan dengan garis ini. Oleh karena itu, VCL memiliki kemiringan  $C_c$ .

Pada Gambar 3b, titik E menunjukkan nilai awal  $e_0$  dan tanah liat yang sama di lapangan, yang VCL-nya sama. Ketika elemen lempung ini dibebani, ia mengikuti jalur EFG, dengan tekanan prakonsolidasi di F. Rasio  $\sigma'_p / \sigma'_{vo}$  disebut overconsolidation ratio (OCR). Dengan demikian,

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{vo}} \tag{4}$$

OCR adalah ukuran seberapa jauh keadaan awal (yaitu, Titik E) dari VCL. Ketika terletak pada VCL,  $OCR = 1$ , dan lempung tersebut disebut lempung terkonsolidasi normal. OCR meningkat saat titik menjauh dari VCL. Terlihat bahwa  $OCR \geq 1$ . Ketika  $OCR > 1$ , lempung tersebut disebut overconsolidated. Lempung yang terkonsolidasi sedikit memiliki OCR sedikit lebih dari 1,0 dan lempung yang terkonsolidasi berlebihan mungkin memiliki OCR lebih dari 10. Ketika spesimen tanah liat dikeluarkan dari tanah, ia segera menjadi terkonsolidasi berlebihan karena pelepasan tegangan.

Itu bisa dilihat dari Gambar. 3a dan 3b bahwa terlepas dari nilai awal  $e_0$  dan  $H_0$ , segera setelah jalur pembebanan mencapai VCL, kemiringannya berubah dari  $C_r$  ke  $C_c$ . Keadaan awal (Titik E) di lapangan pada Gambar 3b telah dicapai dengan pembongkaran sebelumnya dari VCL, yang mungkin telah terjadi ratusan tahun yang lalu, akibat pemindahan lapisan penutup atau faktor geologis lainnya.

Terlepas dari kapan itu terjadi, untuk tanah lempung saat ini adalah tekanan maksimum yang pernah dialaminya di masa lalu. Oleh karena itu, terkadang tekanan prakonsolidasi disebut tekanan masa lalu maksimum. Tekanan prakonsolidasi dapat dilihat sebagai tegangan leleh lempung, yang menunjukkan perilaku elastis saat konsolidasi berlebihan dan perilaku elasto-plastis saat konsolidasi normal. Besarnya dipengaruhi oleh lokasi keadaan awal dan VCL pada bidang  $e$ -log.

$$40\sigma'_p \leq D \leq 80\sigma'_p \tag{5}$$

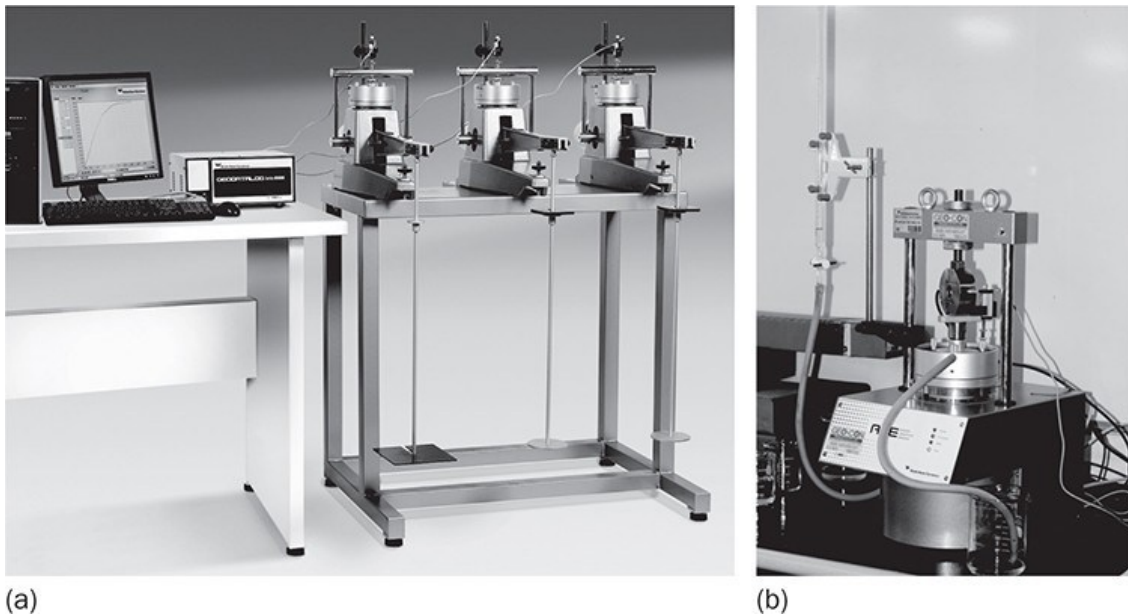
Ujung bawah kisaran berlaku untuk lempung lunak dan ujung atas untuk lempung kaku.

### 3. Metode

#### 3.1. Uji Konsolidasi Satu Dimensi/ Standard Consolidation

Uji konsolidasi laboratorium (ASTM D 2435-20) dilakukan pada sampel silinder berupa lempung yang dibentuk kembali, dengan berdiameter 63 mm dan tebal 20 mm. Spesimen ditempatkan dalam cincin logam kaku seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, direndam dalam air dan mengalami serangkaian peningkatan tegangan, pada interval 24 jam, diikuti dengan pembongkaran. Pengukur dial ditempatkan di bagian atas oedometer untuk memantau penurunan selama konsolidasi.

Gambar 4a menunjukkan serangkaian tiga uji oedometer di mana beban diterapkan menggunakan bobot mati. Gambar 4b menunjukkan pengaturan konsolidasi yang sepenuhnya dikendalikan servo, yang menggunakan pembebanan pneumatik. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1b, batu berpori di bagian atas dan bawah spesimen lempung memfasilitasi drainase. Cincin logam kaku tidak memungkinkan deformasi lateral atau drainase, sehingga memastikan konsolidasi satu dimensi. Uji konsolidasi laboratorium (ASTM D 2435-20) umumnya dilakukan pada spesimen tanah liat silinder yang tidak terganggu, biasanya berdiameter 50–75 mm dan tebal 20–25 mm.



**Gambar 4.** Uji konsolidasi laboratorium: (a) Tiga buah Oedometer dengan *dead load* depan (b) penyiapan konsolidasi yang dikendalikan servo dengan pemuatan pneumatik.

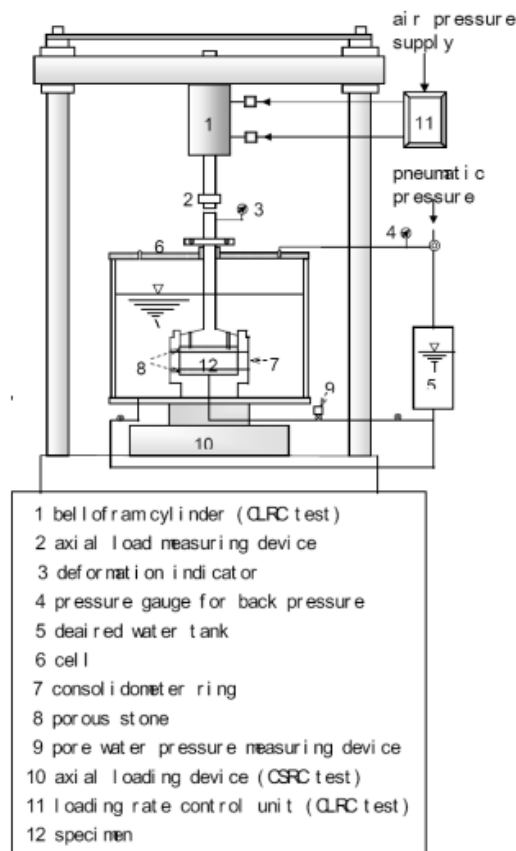
Spesimen Ditempatkan dalam cincin logam kaku seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 4b, terendam di dalam udara dan dikenai serangkaian peningkatan tegangan, Pada pengujian SC, tekanan pembebanan diberikan secara bertahap sebesar 9,8-19,6-39,2-78,4-156,8-313,6-627,2-1254,4 kPa, yang masing-masing dipertahankan konstan selama 24 jam, diikuti dengan pembongkaran. Dial gauge ditempatkan di bagian atas odometer untuk memantau penurunan selama konsolidasi. Angka pori awal  $e_0$  dan tinggi  $H_0$  dari spesimen harus diketahui, dan dial pengukur diinisialisasi ke nol. Ketika kenaikan tegangan mula- mula  $\Delta q_1$  diterapkan, konsolidasi dibiarkan terjadi dan pembacaan dial dipantau. Penurunan  $\Delta H_1$  pada akhir konsolidasi, perubahan angka pori  $\Delta e_1$  dapat ditentukan menggunakan Persamaan (3). Oleh karena itu,  $H$  dan  $e$  pada akhir konsolidasi ditentukan. Hal ini dilakukan berulang untuk mendapatkan hubungan angka pori dan tegangan. Dari data uji ini,  $e$  diplot terhadap (dalam skala logaritmik), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3a. Plot rasio rongga versus tegangan efektif pada Gambar 3a, dimulai pada A dan mencapai B pada akhir kenaikan beban akhir. Sepanjang jalur AB ini, rasio rongga  $e$  menurun dengan peningkatan. BC menunjukkan jalur pembongkaran, di mana tanah lempung terangkat dengan rasio rongga yang meningkat dengan pengurangan. Selama pembebanan, plot berbelok tajam pada P di mana tegangan efektif disebut tekanan prakonsolidasi. Ini adalah tekanan beban lebih efektif maksimum yang pernah dialami oleh lempung di lokasi tersebut (dari tempat spesimen diambil) sejak pengendapannya. Segmen PB kira-kira berupa garis lurus, di mana

kemiringan  $C_c$  dikenal sebagai indeks kompresi. Jalur pembongkaran (atau pembengkakan) BC juga merupakan garis lurus, yang memiliki kemiringan  $C_s$  atau  $C_r$ , yang dikenal sebagai indeks pemuaian atau indeks rekompresi. Ketika lempung dimuat ulang dari C, ia mengikuti jalur yang sama CB dan karenanya disebut indeks rekompresi. Jalur AP, CB, dan jalur *unloading reloading* selanjutnya memiliki kemiringan  $C_r$  (atau  $C_s$ ) yang sama. Rasio rongga awal  $e_0$  dan ketinggian  $H_0$  dari spesimen harus diketahui, dan dial gauge diinisialisasi ke nol. Ketika kenaikan tegangan pertama  $\Delta q_1$  diterapkan, konsolidasi dibiarkan terjadi dan pembacaan dial gauge dimonitor. Dari pengurangan ketebalan  $\Delta H_1$  pada akhir konsolidasi, pengurangan angka pori  $\Delta e_1$  dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan. (3).

Oleh karena itu, H dan e pada akhir konsolidasi ditentukan. Hal ini dapat diulangi untuk serangkaian peningkatan tekanan, diikuti dengan pembongkaran, dan nilai pasang dan ditabulasikan. Dari data uji ini, kemudian diplot terhadap (dalam skala logaritmik), seperti ditunjukkan pada Gambar 3a. Rasio angka pori versus plot tegangan efektif pada Gambar 3a, dimulai dari A dan mencapai B pada akhir kenaikan beban akhir. Sepanjang jalur AB ini, rasio pori-pori berkurang seiring bertambahnya. BC menunjukkan jalur *unloading*.

Selama *reloading*, plot menjadi tajam. Putar di P di mana tegangan efektif disebut tekanan pra konsolidasi. Ini adalah tekanan overburden efektif maksimum yang pernah dialami oleh tanah liat di lokasi tersebut sejak pengendapan. Segmen PB kira-kira merupakan garis lurus, di mana kemiringan  $C_c$  dikenal sebagai indeks kompresi. Jalur unloading (atau *swelling*) BC juga merupakan garis lurus, yang memiliki kemiringan  $C_s$  atau  $C_r$ , yang dikenal sebagai indeks muai atau indeks kompresi ulang. Ketika tanah liat mengalami *reloading* dari C, ia mengikuti jalur CB yang sama dan karenanya disebut indeks rekompresi, yang digunakan dalam buku ini. Jalur AP, CB, dan jalur bongkar/muat lebih lanjut memiliki kemiringan  $C_r$  (atau  $C_s$ ) yang sama.

### 3.2. Uji Konsolidasi Cepat: Constant Strain Rate (CSR) dan Constant Loading Rate (CLR)



**Gambar 5.** Sketsa alat uji Laju regangan tetap dan Laju pembebanan tetap

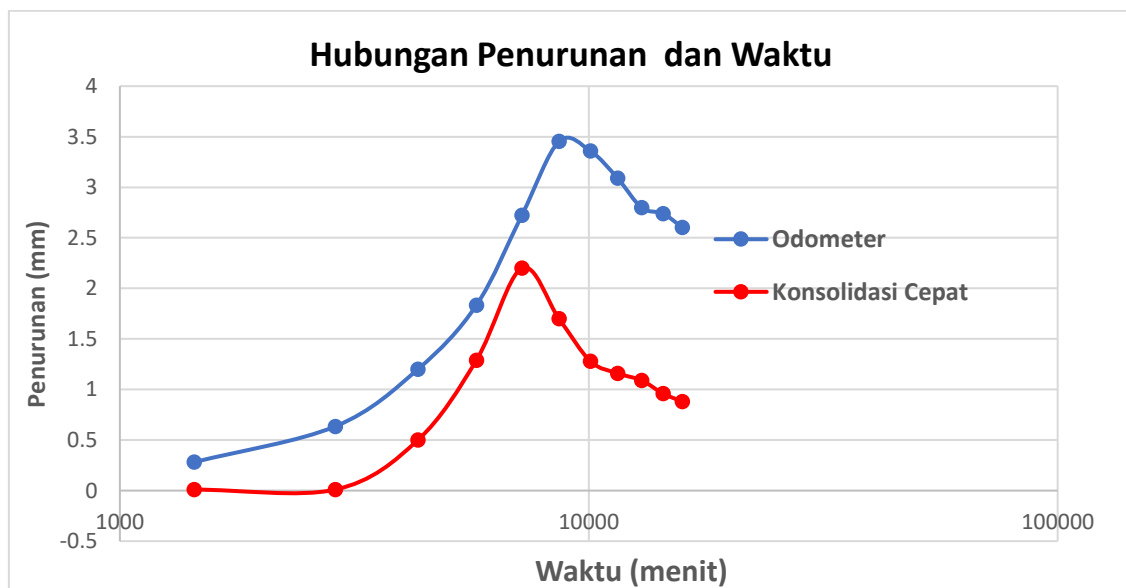
Sampel lempung lunak di lakukan tekanan prakonsolidasi terlebih dahulu, kemudian disiapkan sebagai sampel lempung jenuh dengan dimensi yang sesuai dengan ring konsolidasi

yaitu diameter 63 mm dan tinggi 20 mm. Selanjutnya pengujian, uji dengan laju regangan tetap (CSR) dan laju pembebanan tetap (CLR) dilakukan secara terpisah. Pengujian CSRC dilakukan di bawah laju regangan yang ditentukan sebesar 0,1, 0,05 dan 0,01 %/menit yang diasumsikan tidak bergantung waktu, karena sedikit ketergantungan waktu yang diamati dalam uji konsolidasi isotropik. Selama proses CSRC tidak dikendalikan laju regangan itu sendiri tetapi laju deformasi. Uji CLRC dilakukan di bawah laju pembebanan 9,8, 1,96 dan 0,49 kPa/menit. Uji CSRC dan CLRC dilakukan oleh peralatan yang ditunjukkan pada Gambar 5. Permukaan atas dan bawah spesimen masing-masing merupakan batas permeabel dan kedap air. Tekanan air pori dipantau di bagian bawah spesimen.

Dalam uji CSRC, tekanan pembebanan dipantau di permukaan atas, sedangkan dalam uji CLRC penurunan diukur di permukaan atas. Setelah memasukkan spesimen uji ke dalam oedometer dan setelah memasukkan tekanan balik sebesar 98 kPa, spesimen dikonsolidasikan oleh tekanan konstan vertikal sebesar 9,8 kPa selama 24 jam dalam kondisi  $K_0$  anisotropik. Proses prakonsolidasi ini tampaknya penting untuk membawa spesimen uji ke dalam kontak penuh dengan pelat pembebanan.

#### 4. Hasil dan Pembahasan

Dari hasil pembacaan tes odometer dan uji konsolidasi cepat diperoleh hasil bahwa uji konsolidasi cepat dikendalikan waktunya menjadi 30 menit per pembebanan sedangkan uji konsolidasi satu dimensi mengikuti standar ASTM 24 jam per pembebanan. Pembebanan dilakukan mulai dari 0,5 kPa sampai 16 kPa. Hubungan antara penurunan di tampilan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hubungan Penurunan dan Waktu pada Tes Odometer dan Uji Konsolidasi Cepat

Konversi dari uji konsolidasi cepat ke odometer satu dimensi dapat dinyatakan sbb:

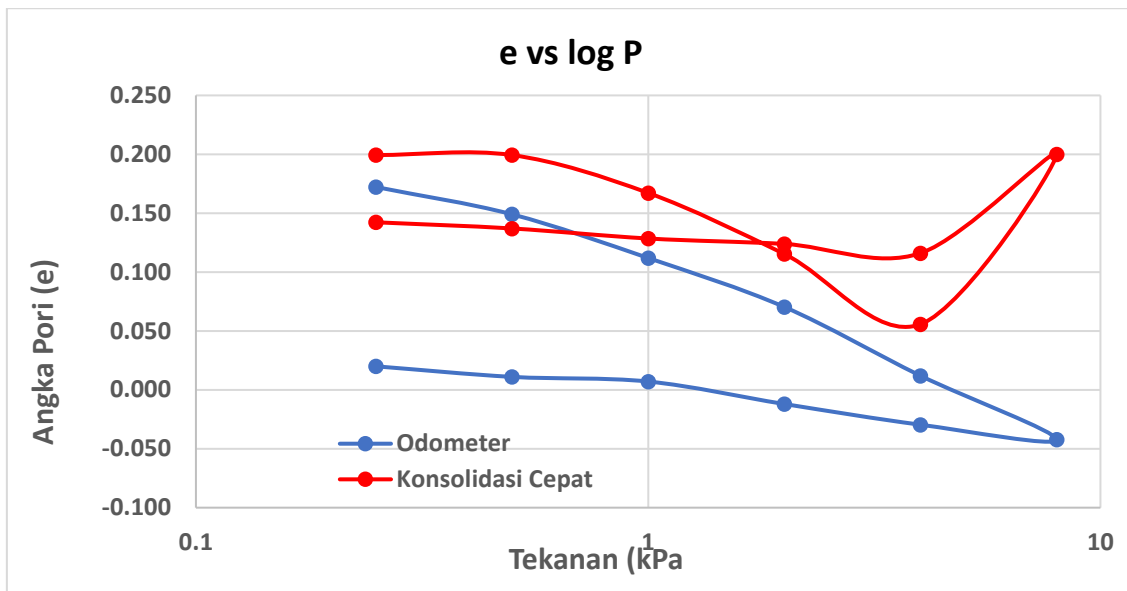
$$T_o = 80 * T_c \quad (6)$$

Dimana :

$T_o$  = waktu yang dibutuhkan pada tes odometer

$T_c$  = waktu yang dibutuhkan untuk uji konsolidasi cepat

Selanjutnya hubungan  $e$  log  $p$  belum menunjukkan analogi antara uji konsolidasi cepat dan odometer satu dimensi. Perlu dilakukan pengujian berulang dengan memperhitungkan faktor pengaruh untuk mendapat hasil yang akurat dan eksak.



Gambar 7. Hubungan  $e$  vs.  $\log p$  pada Tes Odometer dan Uji Konsolidasi Cepat

## 5. Kesimpulan

Pengujian konsolidasi satu dimensi berdasarkan standar ASTM menjadi patokan pengukuran uji konsolidasi dalam melakukan penyelidikan tanah secara umum, dapat dipersingkat 80 kali dengan uji konsolidasi cepat. Hasil Pengujian melalui odoemeter satu dimensi dapat dikonversi, deformasi dan waktu terjadinya konsolidasi dengan uji konsolidasi cepat, begitu pula sebaliknya

## Referensi

- AKAI, K. and TAMURA, T. (1978). Numerical analysis of multi-dimensional consolidation accompanied with elasto-plastic constitutive equation. *Journal of JSCE*, No. 269, pp. 95-104 (in Japanese).
- ASTM D 2435-20. Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils using Incremental Loading.
- ARAI, K. (1985). Representation of soft clay behavior based on minimization of dissipated energy. *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Nagoya, Japan, Vol. 1, pp. 277-284.
- ARAI, K. (1994). Relationship between time effects in triaxial test and secondary compression. *Soils and Foundations*, Vol. 34, No. 3, pp. 59-69.
- Mesri, G., and B. Vardhanabhuti. "Compression of Granular Materials," *Canadian Geotechnical Journal*, 46:369–392, 2009.
- Mikasa, M. "The Consolidation of Soft Clay—A New Consolidation Theory and Its Application," *Civil Engineering in Japan*, Japan Society of Civil Engineering, Tokyo, 1965, pp. 21–26.
- Oikawa, H. "Compression Curves of Soft Soils," *Soils and Foundations*, 27(3):99–104, 1987.
- Sompie B; Arai K; and Kita A; (2008); Secondary compression behavior in three types of consolidation tests; *JOURNAL OF THE SOUTHEAST ASIAN GEOTECHNICAL SOCIETY* JSSMFE (The Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering) (1994). Designation: JSF T 412-1993 Method for Constant strain rate Consolidation Test on Soils.