

Studi tentang Laju Perubahan Volume dan Konsolidasi Tanah *Very Soft* dan *Ultra Soft* Berdasarkan Teori Terzaghi dengan Menggunakan Uji Oedometer dan CPTu

Maria Septhree Winna Sitohang ^{[1]*}, Paulus Pramono Rahardjo ^[1], Aswin Lim ^[1]

^{[1]*} Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan, 40141, Indonesia

Email: 8102301025@student.unpar.ac.id*

*) Corresponding Author

Received: 07 August 2025; Revised: 07 January 2026; Accepted: 18 January 2026

How to cited this article:

Sitohang, M.S.W., Rahardjo, P.P., Lim, A. (2026). Studi tentang Laju Perubahan Volume dan Konsolidasi Tanah *Very Soft* dan *Ultra Soft* Berdasarkan Teori Terzaghi dengan Menggunakan Uji Oedometer dan CPTu. *Jurnal Teknik Sipil*, 22(1), 82–101.
<https://doi.org/10.28932/jts.v22i1.12973>

ABSTRAK

Tanah *very soft* dan *ultra soft* merupakan jenis tanah dengan kadar air tinggi, konsistensi sangat lunak, dan daya dukung rendah, sehingga rentan mengalami deformasi dan penurunan akibat pembebanan. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan korelasi parameter perubahan volume dan konsolidasi pada tanah *very soft* dan *ultra soft* berdasarkan pengujian laboratorium (uji oedometer) dan pengujian in-situ (*Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement/CPTu*). Parameter yang diteliti meliputi koefisien konsolidasi (C_v), indeks kompresi (C_c), koefisien perubahan volume (m_v), dan parameter α sebagai korelasi antara nilai m_v hasil uji oedometer dan nilai *corrected cone resistance* (q_t) dari CPTu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai C_v berfluktuatif pada setiap peningkatan tegangan efektif. Selain itu, konsistensi nilai korelasi α menunjukkan bahwa CPTu dapat digunakan untuk memperkirakan nilai koefisien perubahan volume (m_v) secara cepat dan efisien di lapangan. Oleh karena itu, CPTu dapat menjadi alternatif untuk memprediksi perilaku kondisi tanah *very soft* dan *ultra soft* dalam kondisi in-situ secara lebih representatif.

Kata kunci: CPTu, Konsolidasi, Tanah *Very Soft*, Tanah *Ultra Soft*, Perubahan Volume.

ABSTRACT. Study on the Rate of Volume Change and Consolidation Based on Terzaghi's Theory of *Very Soft* and *Ultra Soft* Soil Using Oedometer and CPTu Tests. *Very soft* and *ultra soft* soils are types of soil with high water content, very soft consistency, and low bearing capacity, making them susceptible to deformation and subsidence due to loading. This study aims to determine the correlation between volume change parameters and consolidation in very soft and ultra-soft soils based on laboratory testing (oedometer test) and in-situ testing (*Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement/CPTu*). The parameters studied include the consolidation coefficient (C_v), compression index (C_c), volume change coefficient (m_v), and parameter α as the correlation between the m_v value from the oedometer test and the corrected cone resistance (q_t) value from CPTu. The results show that the C_v value varies with each increase in effective stress. Additionally, the consistency of the α correlation values indicates that CPTu can be used to quickly and efficiently estimate volume change coefficient (m_v) values in the field. Therefore, CPTu can serve as an alternative for predicting the behavior of very soft and ultra-soft soil conditions in situ in a more representative manner.

Keywords: CPTu, Consolidation, *Very Soft Soil*, *Ultra Soft Soil*, Volume Change.

1. PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara kepulauan yang terletak di antara Samudra Hindia dan Samudra Pasifik, dengan garis pantai yang sangat panjang. Kondisi geografis ini menciptakan banyak daerah pesisir, rawa, dan delta sungai. Daerah-daerah ini cenderung mengalami sedimentasi endapan halus seperti tanah liat (*clay*) yang memiliki karakteristik lunak. Selain kondisi geografis, Indonesia memiliki iklim tropis dengan curah hujan yang tinggi juga berperan penting dalam pembentukan tanah liat (*clay*). Curah hujan yang tinggi menyebabkan banyak daerah menjadi jenuh air, sehingga tanah di daerah tersebut mengalami pelunakan. Faktor-faktor geografis seperti keberadaan pesisir, rawa, dan delta sungai, ditambah dengan iklim tropis dengan curah hujan yang tinggi menjadi penyebab utama terbentuknya tanah *very soft* dan *ultra soft* di Indonesia (Arafianto, 2024).

Tanah *very soft* dan *ultra soft* memiliki karakteristik perilaku konsolidasi yang kompleks akibat kandungan air yang tinggi, indeks plastisitas besar, dan kuat geser yang sangat rendah (Rahardjo & Anggoro, 2016; Bo Wynt Win, 2003). Ciri khas tanah lunak tersebut ditemukan di berbagai wilayah pesisir maupun dataran rendah, termasuk di wilayah urban seperti Jakarta dan Bandung (Desiani, 2017; Permana & Rahardjo, 2022). Tanah dengan karakteristik seperti ini sering kali berada dalam kondisi jenuh dan *under-consolidated*, menyebabkan permasalahan serius dalam konstruksi dan perencanaan fondasi.

Teori konsolidasi satu dimensi yang dikembangkan oleh Terzaghi telah menjadi fondasi dalam menganalisis penurunan akibat konsolidasi. Namun demikian, asumsi-asumsi dasar dalam teori tersebut, seperti aliran satu arah, deformasi kecil (*small strain*), dan C_v yang konstan, tidak selalu sesuai untuk jenis tanah *very soft* dan *ultra soft*, yang menunjukkan perilaku sangat berbeda dari tanah *normally consolidated* (Mesri & Feng, 2016). Hal ini terutama disebabkan oleh kenyataan bahwa pada tanah *ultra soft*, deformasi besar dapat terjadi meskipun peningkatan tegangan efektif sangat kecil atau bahkan tidak ada sama sekali (Bo & Choa, 2003).

Penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa model konsolidasi konvensional seringkali tidak mampu memprediksi dengan akurat besarnya maupun laju deformasi pada tanah *ultra soft*. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan model yang mempertimbangkan parameter non-linier dan deformasi besar (Ding et al., 2022). Salah satu metode yang digunakan dalam validasi dan karakterisasi tanah lunak adalah uji CPTu (*Cone Penetration Test with pore pressure measurement*), yang memungkinkan evaluasi parameter seperti q_t , u_2 , dan B_q , yang berkorelasi dengan *Overconsolidation Ratio* (OCR) (Rahardjo, 2016).

Menurut Lunne dan Powell (2018), CPTu juga dapat digunakan sebagai pendekatan alternatif untuk menganalisis perilaku konsolidasi tanah lunak, terutama pada tanah jenuh dengan kohesi rendah, di mana data laboratorium tidak selalu representatif akibat gangguan saat

sampling. Oleh karena itu, kombinasi antara uji oedometer di laboratorium dan CPTu di lapangan menjadi sangat penting untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai perilaku konsolidasi pada tanah *very soft* dan *ultra soft*. Namun demikian, korelasi antara hasil CPTu dengan parameter konsolidasi seperti koefisien konsolidasi (C_v) dan indeks kompresi (C_c) untuk tanah *ultra soft* masih belum banyak dibahas secara kuantitatif (Kirana, 2017).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji laju perubahan volume dan perilaku konsolidasi pada tanah *very soft* dan *ultra soft* dengan menggunakan pendekatan teori Terzaghi, serta membandingkannya dengan hasil dari uji oedometer dan CPTu, guna mengetahui sejauh mana keakuratan teori tersebut dalam merepresentasikan kondisi lapangan.

2. METODOLOGI

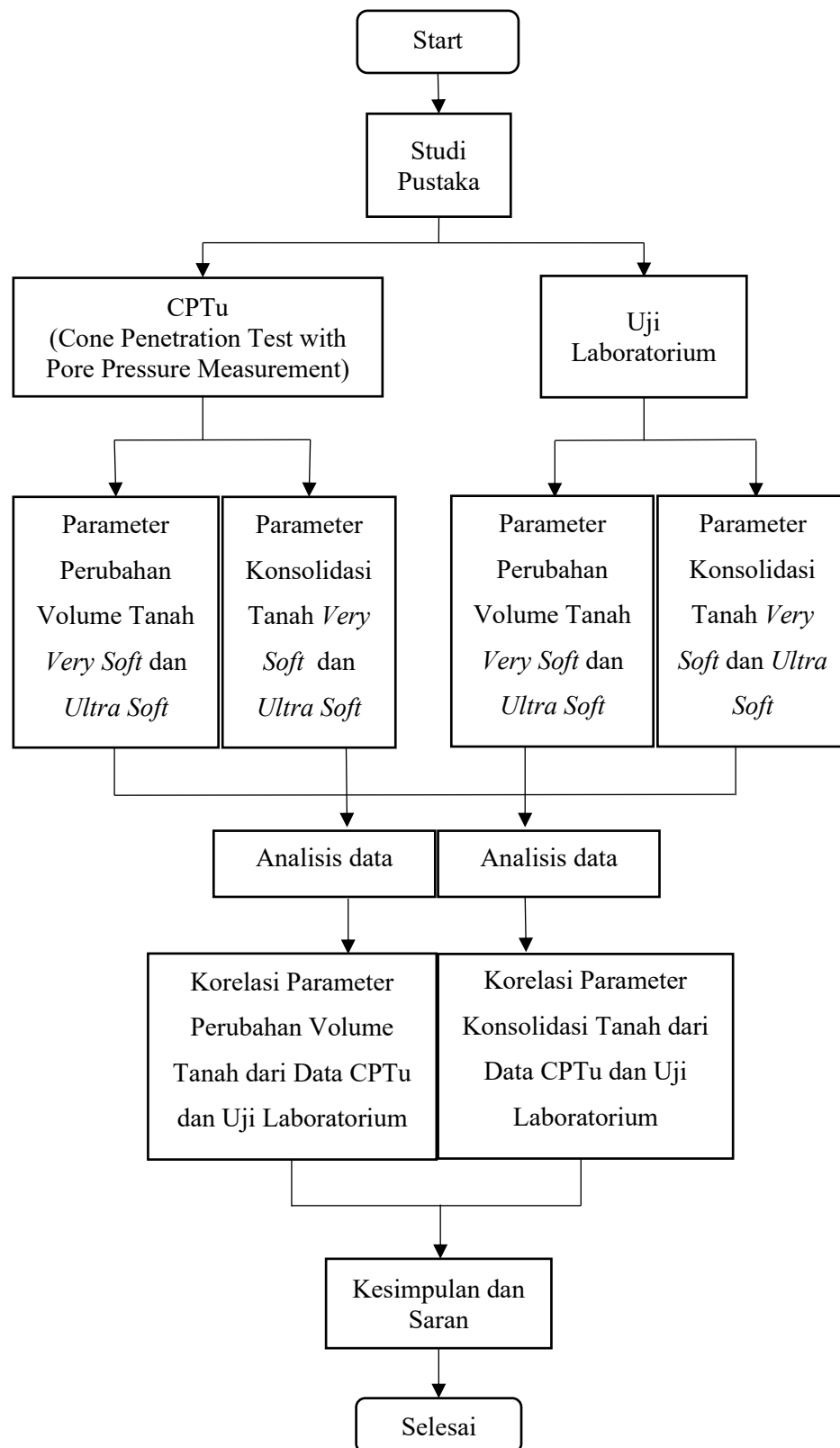
Penelitian ini menerapkan metode kuantitatif dengan pendekatan studi kasus yang melibatkan kombinasi antara pengujian laboratorium (uji oedometer) dan pengujian *in-situ* (CPTu) untuk memperoleh data karakteristik tanah secara menyeluruh.

2.1 Tahapan Penelitian

Dapat dilihat pada Gambar 1 bahwa tahapan-tahapan penelitian yang harus dikerjakan adalah sebagai berikut: pertama, merumuskan permasalahan apa saja yang menjadi latar belakang penelitian. Langkah berikutnya adalah melakukan studi literatur berkaitan teori-teori dan pendapat para ahli yang relevan dengan topik yang akan diteliti. Tahapan berikutnya adalah melakukan pengumpulan data yang terdiri dari 2 (dua) data sekunder, yaitu data uji laboratorium (oedometer) dan data uji lapangan (CPTu). Data uji oedometer diolah dengan 4 (empat) metode untuk mendapatkan koefisien konsolidasi (C_v). Selain menentukan koefisien konsolidasi, data uji oedometer juga diolah untuk memperoleh koefisien perubahan volume (m_v) dan indeks kompresi (C_c).

Interpretasi hasil pengujian CPTu berupa data tahanan ujung konus (q_c), tahanan selimut (f_s), tekanan air pori (u_2), nilai rasio tahanan (FR), dan rasio tekanan air pori (Bq) yang akan diolah untuk mendapatkan nilai *corrected cone resistance* (q_t) dan tegangan vertikal efektif (σ_v'). Setelah selesai mengolah data dari hasil uji laboratorium dan hasil uji CPTu, kemudian dikorelasikan untuk mendapatkan nilai α .

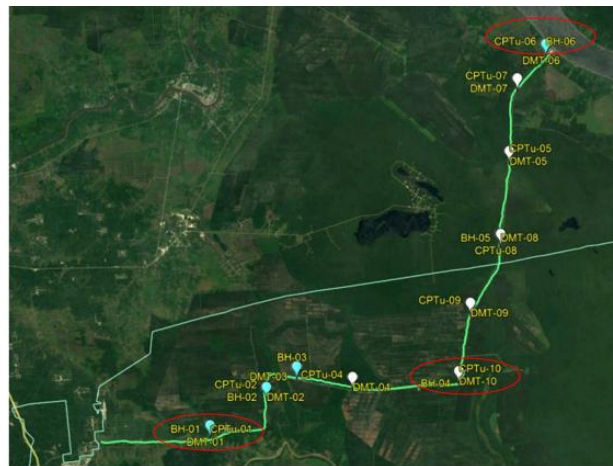
Hasil tersebut dapat mempercepat interpretasi karakteristik konsolidasi tanah *very soft* dan *ultra soft* dari data CPTu, mengurangi ketergantungan pada uji lab yang butuh waktu lama, serta dapat digunakan dalam permodelan *settlement* atau perencanaan fondasi di tanah *very soft* dan *ultra soft*.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

2.2 Lokasi Penelitian

Pada studi ini, data yang akan dianalisis diperoleh dari lokasi KM 17-88, Kerinci. Jumlah sampel yang akan dianalisis pada studi ini berjumlah 3 sampel dari pengujian konsolidasi menggunakan alat oedometer dan pengujian CPTu dengan pengambilan sampel pada titik yang sama. Tiga sampel tanah yang didapat yaitu, BH-01 pada kedalaman 8,00 – 8,50 m dengan CPTu-01 sampai kedalaman 21,64 m ; BH-04 pada kedalaman 16,50 – 17,00 m dengan CPTu-10 sampai kedalaman 27,40 m ; serta BH-06 pada kedalaman 12,50 – 13,00 m dengan CPTu-06 sampai kedalaman 30,02 m.



Gambar 2 Titik Penyelidikan Tanah

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Index Properties

Dalam penelitian ini, *bored hole* yang ditinjau hanya 3 (tiga) titik yaitu titik 1(BH-01), titik 2 (BH-4), dan titik 3 (BH-06) yang mana *index properties*nya dapat dilihat pada Tabel 1:

Tabel 1. *Index Properties*

	BH-01		BH-04		BH-06	
Kadar Air Alami (%)	63,46	Kadar Air Alami (%)	88,15	Kadar Air Alami (%)	88,84	
Batas Cair (%)	54,69	Batas Cair (%)	86,76	Batas Cair (%)	70,95	
Batas Plastis (%)	29,79	Batas Plastis (%)	48,08	Batas Plastis (%)	36,29	
Indeks Plastisitas (%)	24,90	Indeks Plastisitas (%)	38,68	Indeks Plastisitas (%)	34,66	
Klasifikasi Tanah	MH	Klasifikasi Tanah	MH	Klasifikasi Tanah	MH	
Berat Jenis	2,56	Berat Jenis	2,56	Berat Jenis	2,60	
Massa Jenis Jenis Basah (gr/cm ³)	1,50	Massa Jenis Jenis Basah (gr/cm ³)	1,42	Massa Jenis Jenis Basah (gr/cm ³)	1,42	
Massa Jenis Jenis Kering (gr/cm ³)	0,85	Massa Jenis Jenis Kering (gr/cm ³)	0,75	Massa Jenis Jenis Kering (gr/cm ³)	0,80	
Derajat Kejenuhan (%)	97	Derajat Kejenuhan (%)	94	Derajat Kejenuhan (%)	89	
Rasio Rongga	2,01	Rasio Rongga	2,43	Rasio Rongga	2,27	

3.2 Hasil Perhitungan Koefisien Konsolidasi (C_v)

Pada penelitian ini, menggunakan metode *log fitting method*, *square root fitting method*, perhitungan R50 dan R90 secara manual sebagai pengkoreksi. Penentuan besaran C_v ialah sebagai berikut:

1. *Log fitting method* (Casagrande, 1940)

$$C_v = \frac{0.197 H_t^2}{t_{50}} \quad (1)$$

dengan:

0.197 = Faktor waktu untuk 50% konsolidasi

C_v = Koefisien konsolidasi ($m^2/detik$)

H_t = Panjang jalur drainase terpanjang

t_{50} = Waktu untuk mencapai 50% konsolidasi (detik)

2. *Square Root Fitting Method* (Taylor, 1948)

$$C_v = \frac{0.848 H_t^2}{t_{90}} \quad (2)$$

dengan:

0.848 = Faktor waktu untuk 90% konsolidasi

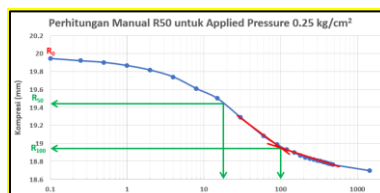
C_v = Koefisien konsolidasi ($cm^2/detik$)

H_t = Panjang jalur drainase terpanjang

t_{90} = Waktu untuk mencapai 90% konsolidasi (detik)

3. Perhitungan Manual R50

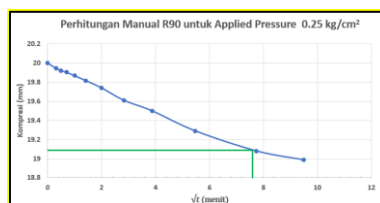
Metode ini dilakukan dengan menghitung waktu konsolidasi 50% (t_{50}) secara manual dari grafik penurunan (kompresi) terhadap logaritma waktu ($\log t$).



Gambar 3 Perhitungan Manual R50

4. Perhitungan Manual R90

Metode ini dilakukan dengan menghitung 90% secara manual dari penurunan total (R_{100}) menggunakan grafik penurunan terhadap akar waktu (\sqrt{t}).



Gambar 4 Perhitungan Manual R90

Setelah data diolah, hasil yang diperoleh dengan 4 (empat) metode tersebut adalah:

Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Analisis Perhitungan Nilai C_v Sampel BH-01

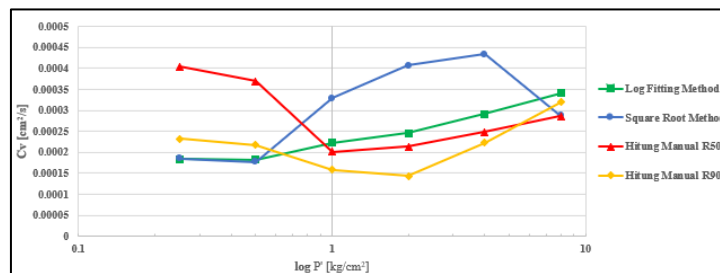
Applied Pressure (P') kg/cm ²	Log Fitting Method		Square Root Fitting Method		Hitung Manual R50		Hitung Manual R90	
	t50 detik	C_v cm ² /s	t90 detik	C_v cm ² /s	t50 detik	C_v cm ² /s	t90 detik	C_v cm ² /s
0,25	1002	0,000186	4335	0,000184	456	0,000404	3465,6	0,000232
0,5	900	0,000177	4034,4	0,000182	444	0,000369	3285,6	0,000217
1	660	0,000329	1949,4	0,000223	732	0,000201	4034,4	0,000156
2	522	0,000407	1382,4	0,000246	600	0,000214	3936,6	0,000143
4	378	0,000434	1109,4	0,000291	444	0,000248	2160	0,000223
8	276	0,000288	1440,6	0,000342	330	0,000286	1297,4	0,000319

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Analisis Perhitungan Nilai C_v Sampel BH-04

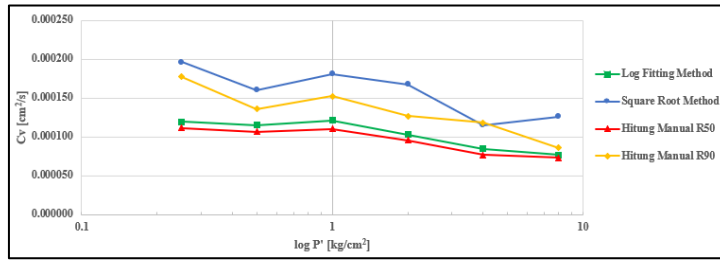
Applied Pressure (P') kg/cm ²	Log Fitting Method		Square Root Fitting Method		Hitung Manual R50		Hitung Manual R90	
	t50 detik	C_v cm ² /s	t90 detik	C_v cm ² /s	t50 detik	C_v cm ² /s	t90 detik	C_v cm ² /s
0,25	1680	0,000119	4489,4	0,000196	1800	0,000111	4968,6	0,000177
0,5	1500	0,000115	4752,6	0,000160	1620	0,000107	5587,4	0,000136
1	1230	0,000121	3650,4	0,000181	1350	0,000110	4435	0,000152
2	1200	0,000103	3285,6	0,000167	1290	0,000096	4335	0,000127
4	1200	0,000085	3840	0,000115	1320	0,000077	3744,6	0,000118
8	1080	0,000077	2873,2	0,000126	1140	0,000073	4233,6	0,000085

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Analisis Perhitungan Nilai C_v Sampel BH-06

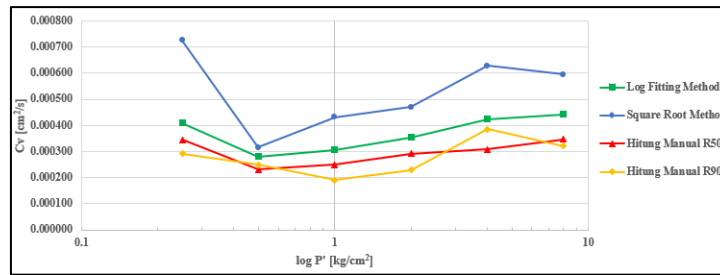
Applied Pressure (P') kg/cm ²	Log Fitting Method		Square Root Fitting Method		Hitung Manual R50		Hitung Manual R90	
	t50 detik	C_v cm ² /s	t90 detik	C_v cm ² /s	t50 detik	C_v cm ² /s	t90 detik	C_v cm ² /s
0,25	396	0,000409	960	0,000725	468	0,000246	2381,4	0,000292
0,5	492	0,000281	1881,6	0,000316	600	0,000230	2381,4	0,000250
1	390	0,000306	1188,2	0,000432	480	0,000248	2693,4	0,000191
2	282	0,000354	912,6	0,000470	342	0,000291	1881,6	0,000228
4	192	0,000425	558,2	0,000629	264	0,000309	912,6	0,000385
8	150	0,000443	4805	0,000595	192	0,000346	889,4	0,000322



Gambar 5. Grafik C_v vs $\log P'$ BH-01



Gambar 6. Grafik C_v vs $\log P'$ BH-04



Gambar 7. Grafik C_v vs $\log P'$ BH-06

Berdasarkan Gambar 5,6, dan 7, diperoleh bahwa nilai koefisien konsolidasi (C_v) yang diperoleh dari 4 (empat) metode *log fitting*, *square root*, perhitungan manual R50 dan R90 menunjukkan bahwa pola yang tidak konsisten terhadap perubahan tegangan efektif vertikal. Terdapat perbedaan mencolok antara nilai C_v yang dihitung, hal ini menandakan bahwa hasil perhitungan C_v sangat sensitif terhadap metode interpretasi yang digunakan.

Perubahan nilai C_v tidak mengikuti tren tertentu yang jelas secara linier atau logaritmik, melainkan fluktuatif, yang mengindikasikan bahwa pendekatan konsolidasi Terzaghi satu dimensi dengan asumsi C_v konstan mungkin tidak sesuai untuk tanah dengan karakteristik *ultra soft* seperti pada lokasi penelitian ini. Ketidakteraturan nilai C_v terhadap tegangan efektif ini sejalan dengan penelitian Bo dan Choa (2003) yang menyatakan bahwa parameter konvensional seperti C_v yang didasarkan pada asumsi *small strain* dan konsistensi parameter tanah tidak mampu menggambarkan perilaku tanah *ultra soft* secara akurat. Oleh karena itu, Bo dan Choa (2003) memperkenalkan parameter baru yaitu CF (*Large Strain Coefficient of Consolidation*), yang mempertimbangkan perubahan *void ratio* dan permeabilitas secara dinamis selama proses konsolidasi berlangsung, sehingga lebih representatif dalam memprediksi laju dan besarnya deformasi pada tanah *ultra soft*.

3.3 Hasil Analisa Penurunan (*Settlement*) Berdasarkan Teori Terzaghi

Setelah mendapatkan nilai C_v , maka selanjutnya menghitung nilai factor waktu (T_v) dan derajat konsolidasi (U_v) berdasarkan teori Terzaghi (1925) dengan persamaan :

$$T = C_v \frac{t}{H_{dr}^2} \quad (3)$$

dengan:

C_v = Koefisien konsolidasi ($m^2/detik$)

t = Waktu

Hdr = Panjang jalur drainase terpanjang

Kemudian setelah mendapatkan nilai T_v , selanjutnya menghitung nilai U_v dengan :

$$1. \text{ Untuk } U < 60\% : T_v = (\pi/4) U_v^2 \quad (4)$$

$$2. \text{ Untuk } U > 60\% : T_v = 1.781 - 0.933 \log (100-U_v\%) \quad (5)$$

Sehingga setelah mendapatkan nilai T_v dan U_v , maka settlement dapat dihitung dengan cara :

$$U_{avg} = \frac{S(t)}{S_c} \quad (6)$$

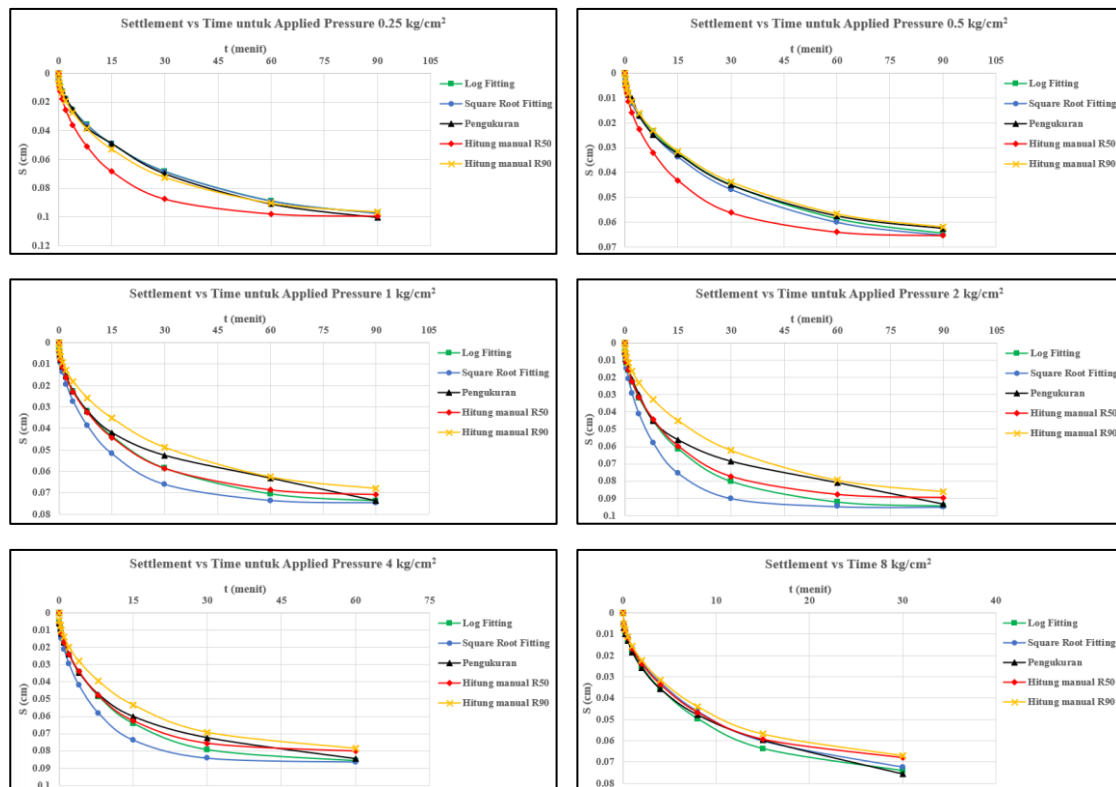
dengan:

U_{avg} = Derajat konsolidasi rata-rata

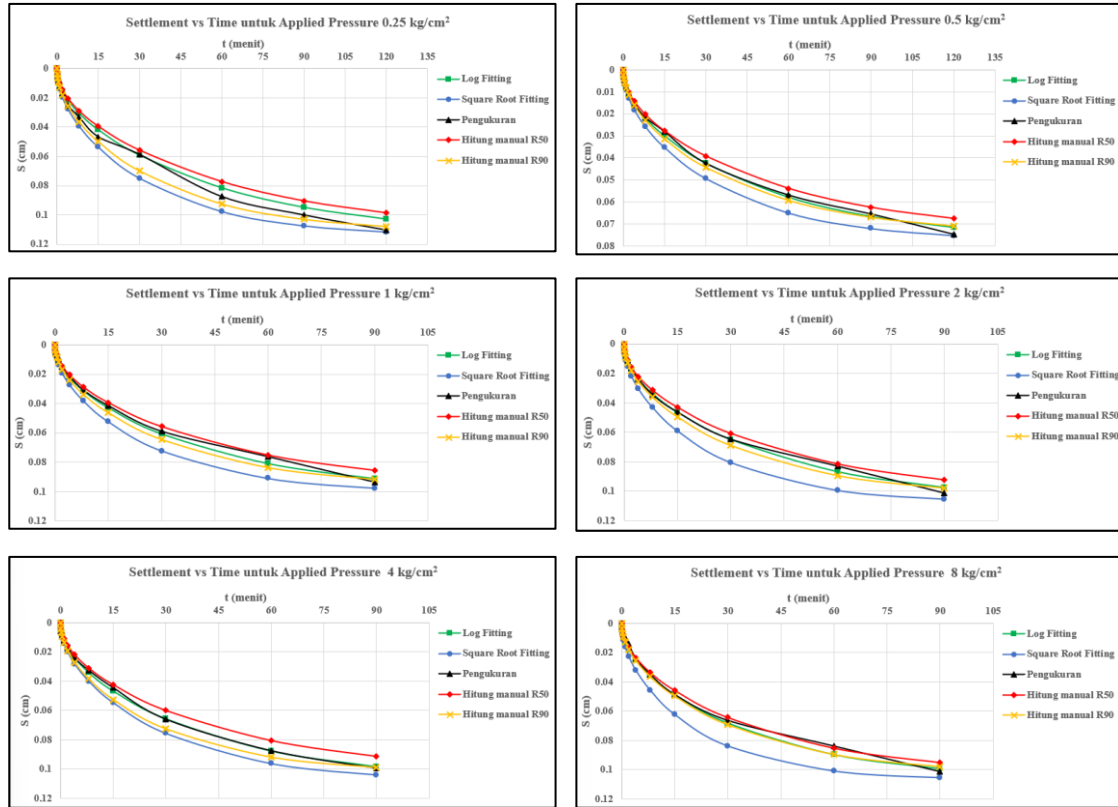
$S(t)$ = Penurunan yang terjadi pada waktu t

S_c = Total atau penurunan konsolidasi primer akhir (Ketika $t = \infty$)

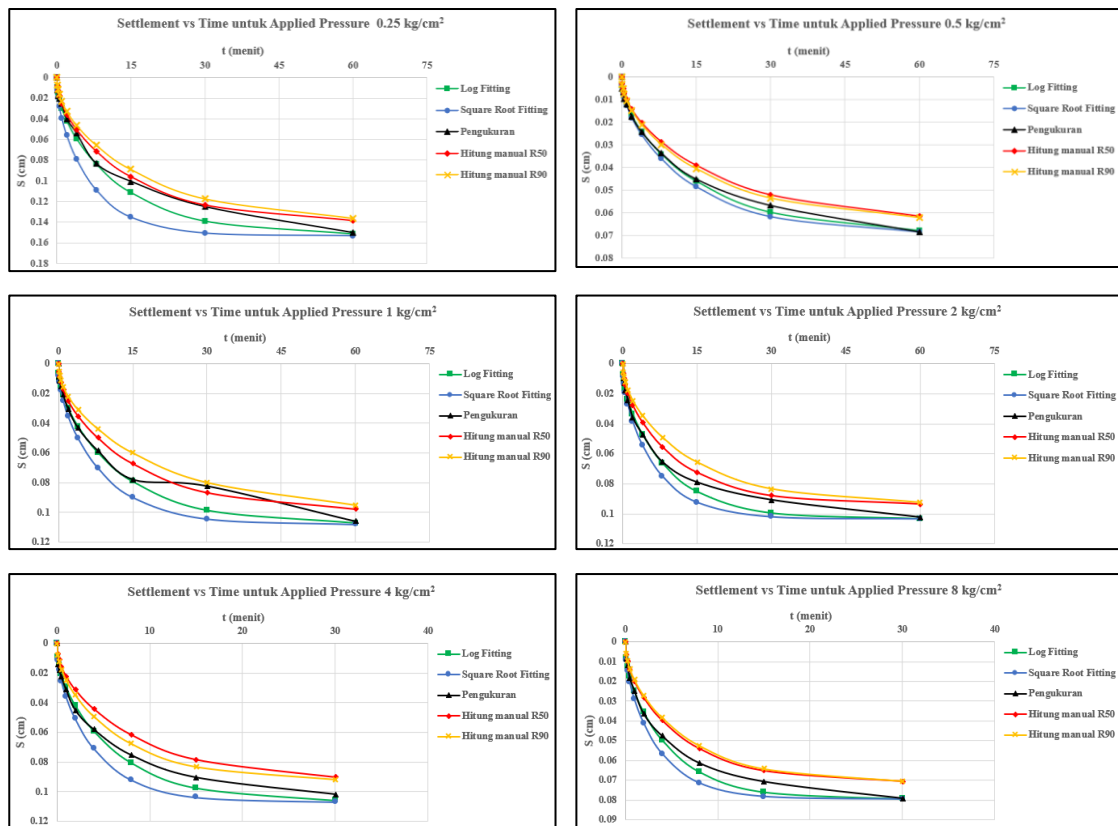
Berikut ini adalah hasil yang diperoleh :



Gambar 8. Settlement vs Time Sampel BH-01



Gambar 9. *Settlement vs Time* Sampel BH-04



Gambar 10. *Settlement vs Time* Sampel BH-06

Hasil analisa pada Gambar 8,9 dan 10, merupakan grafik hubungan antara *settlement* terhadap waktu pada berbagai tingkat tegangan yang diberikan yang menunjukkan bahwa seluruh proses deformasi pada tahap konsolidasi primer terjadi dalam waktu relatif singkat yaitu membutuhkan waktu 30 – 120 menit. Namun, variasi hasil antar metode pengolahan data (*log fitting, square root fitting, manual R50 dan R90*) serta ketidak konsistenan tren penurunan terhadap besarnya tegangan mengindikasikan bahwa tanah yang diteliti memiliki karakteristik *ultra soft* dengan perilaku deformasi non-linier.

Hal ini selaras dengan temuan Bo dan Choa (2003) bahwa teori Terzaghi untuk memprediksi besarnya dan laju waktu konsolidasi deformasi pada tanah *ultra soft* kurang akurat. Bo dan Choa (2003) mengemukakan bahwa teori konsolidasi Terzaghi tidak mampu memprediksi besar dan laju penurunan pada tanah *ultra soft* secara akurat. Hal ini disebabkan oleh kondisi tanah yang masih *under-consolidated*, berperilaku seperti lumpur (*slurry*), dan mengalami deformasi besar tanpa adanya peningkatan tegangan efektif. Oleh karena itu, diperlukan model alternatif berupa pendekatan visko-plastik, yang menggabungkan karakteristik fluida dan padatan dalam menggambarkan deformasi tanah.

3.4 Hasil Perhitungan Indeks Kompresi (C_c)

Indeks kompresi diperoleh dari hasil analisis kemiringan kurva hubungan angka pori (*void ratio*) dan tegangan dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log P} \quad (7)$$

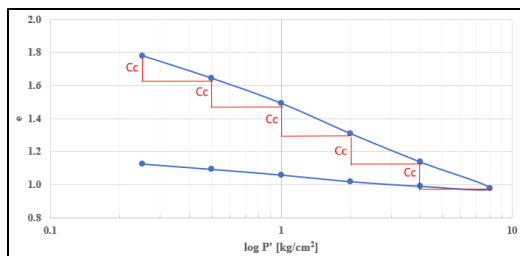
dengan:

C_c = Indeks kompresi

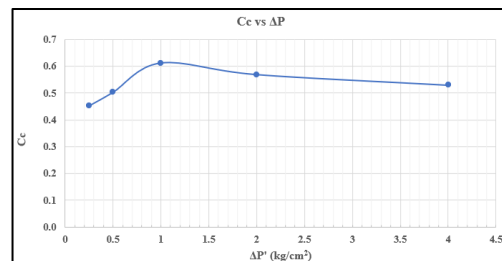
Δe = Perubahan angka pori

ΔP = Perubahan tegangan efektif

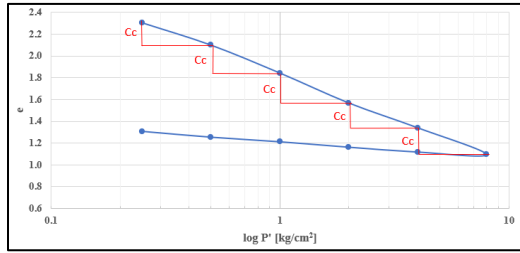
Setelah data diolah, adapun hasil yang diperoleh sebagai berikut:



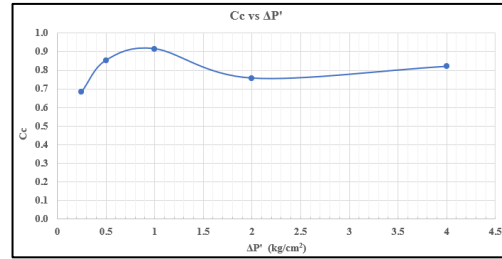
Gambar 11. Grafik e vs $\log P'$ Sampel BH-01



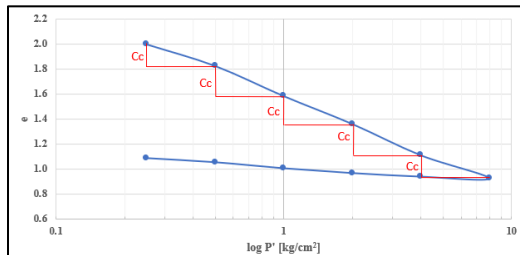
Gambar 12. Grafik C_c vs $\Delta P'$ Sampel BH-01



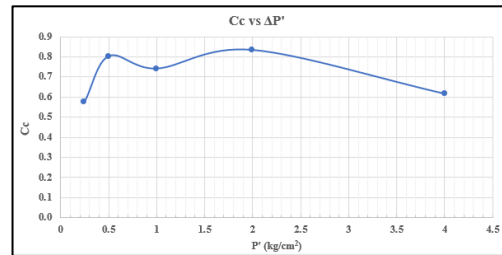
Gambar 13. Grafik e vs $\log P'$ Sampel BH-04



Gambar 14. Grafik C_c vs $\Delta P'$ Sampel BH-04



Gambar 15. Grafik e vs $\log P'$ Sampel BH-06



Gambar 16. Grafik C_c vs $\Delta P'$ Sampel BH-06

Berdasarkan Gambar 11, 13, dan 15 pada penelitian ini diperoleh nilai C_c yang bervariasi pada setiap penambahan tegangan, kemudian nilai C_c tersebut diolah sesuai dengan perubahan penambahan tegangan ($\Delta P'$). Berikut ini rekapitulasi indeks kompresi yang telah diolah :

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Analisis Perhitungan Nilai C_c

$\Delta P'$	BH-01	BH-04	BH-06
0.25	0,453	0,682	0,575
0.5	0,503	0,852	0,801
1	0,612	0,915	0,740
2	0,569	0,757	0,832
4	0,530	0,820	0,615

Berdasarkan hasil rekapitulasi nilai indeks kompresi (C_c) yang disajikan dalam Tabel 5, dapat disimpulkan bahwa tanah pada lokasi BH-01, BH-04, dan BH-06 memiliki karakteristik yang sangat kompresibel, dengan nilai C_c berkisar antara 0,453 hingga 0,915. Nilai C_c yang tergolong tinggi ini menunjukkan bahwa tanah yang diuji termasuk dalam kategori tanah *very soft* hingga *ultra soft*, yang memiliki kemampuan deformasi besar saat dikenai beban.

Dari ketiga titik bor, BH-04 menunjukkan nilai C_c tertinggi, yaitu sebesar 0,915 pada tegangan efektif vertikal ($\Delta P'$) sebesar 1 kg/cm². Hal ini menunjukkan bahwa tanah pada lokasi BH-04 memiliki kompresibilitas paling tinggi dibandingkan lokasi lainnya.

Selain itu, pola perubahan nilai C_c terhadap variasi tegangan efektif menunjukkan tren yang fluktuatif dan tidak linier. Hal ini mengindikasikan bahwa perilaku konsolidasi tanah di lokasi penelitian tidak mengikuti pola ideal tanah *normally consolidated* seperti yang diasumsikan dalam teori konsolidasi Terzaghi. Hal ini mendukung temuan Bo dan Choa (2003), yang menyatakan bahwa pada tanah *ultra soft*, deformasi yang terjadi bersifat non-linier dan memerlukan pendekatan khusus, seperti penggunaan parameter konsolidasi untuk *strain* besar.

3.5 Hasil Perhitungan Koefisien Perubahan Volume (m_v)

Koefisien perubahan volume (m_v) adalah perubahan volume persatuan penambahan tegangan efektif dan dapat diperoleh dengan persamaan :

$$m_v = \frac{\frac{\Delta H}{H_0}}{\Delta P'} \quad (8)$$

dengan:

m_v = Perubahan volume (cm^2/kg)

ΔH = Perubahan tebal (cm)

H_0 = Tebal awal (cm)

$\Delta P'$ = Perubahan tegangan efektif (kg/m^2)

Setelah data diolah, adapun hasil yang diperoleh sebagai berikut:

Tabel 6. Rekapitulasi Hasil Analisis Perhitungan Nilai m_v Sampel BH-01

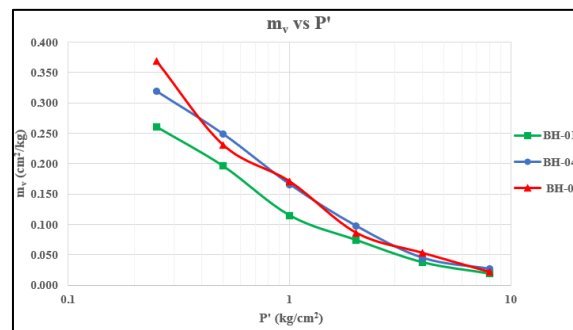
P'	Final Dial	Delta H	m_v
kg/cm^2	cm	cm	cm^2/kg
0	2	0	0
0,25	1,870	0,130	0,261
0,5	1,778	0,222	0,196
1	1,676	0,324	0,115
2	1,552	0,448	0,074
4	1,437	0,563	0,037
8	1,330	0,670	0,019

Tabel 7. Rekapitulasi Hasil Analisis Perhitungan Nilai m_v Sampel BH-04

P'	Final Dial	Delta H	m_v
kg/cm^2	cm	cm	cm^2/kg
0	2,1	0	0
0,25	1,933	0,167	0,319
0,5	1,813	0,287	0,248
1	1,663	0,437	0,165
2	1,502	0,598	0,097
4	1,369	0,731	0,044
8	1,224	0,876	0,026

Tabel 8. Rekapitulasi Hasil Analisis Perhitungan Nilai m_v Sampel BH-06

P'	Final Dial	Delta H	m_v
kg/cm ²	cm	cm	cm ² /kg
0	1,9	0	0
0,25	1,725	0,175	0,368
0,5	1,626	0,275	0,231
1	1,487	0,413	0,171
2	1,359	0,541	0,086
4	1,215	0,685	0,053
8	1,108	0,792	0,022

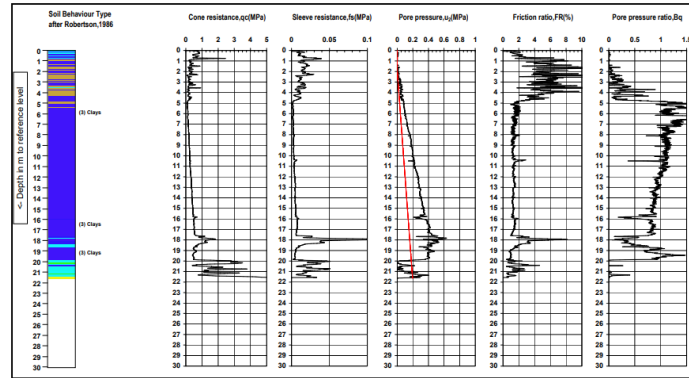


Gambar 17. Grafik m_v vs $\log P'$

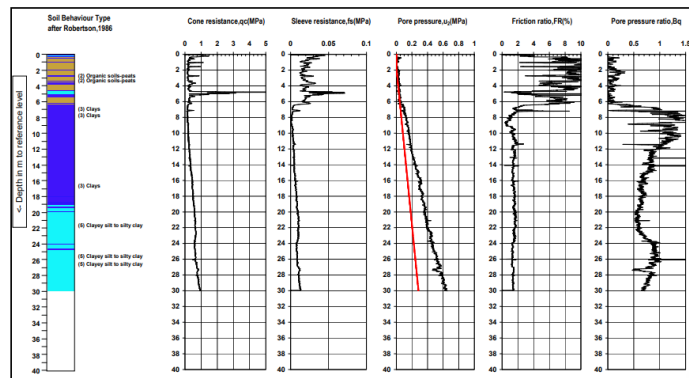
Dari hasil yang telah diperoleh, nilai koefisien perubahan volume (m_v) akan menurun setiap penambahan tegangan. Penurunan ini menandakan bahwa tanah mengalami peningkatan kekakuan (*stiffness*) akibat penambahan tegangan efektif. Pada tegangan rendah, nilai m_v pada BH-06 jauh lebih tinggi dibanding titik bor lainnya, menunjukkan bahwa tanah pada lokasi tersebut lebih kompresibel dan berada dalam kondisi lebih lunak. Namun, perbedaan nilai m_v antar titik bor mengecil pada tegangan tinggi, yang mengindikasikan bahwa tanah mulai terkonsolidasi dan memiliki sifat yang lebih seragam. Pola hubungan m_v dan P' yang bersifat non-linier ini mencerminkan perilaku khas tanah ultra-soft, sebagaimana dijelaskan oleh Bo dan Choa (2003), di mana deformasi besar terjadi pada tegangan rendah, sementara deformasi berkurang secara signifikan pada tegangan yang lebih tinggi.

3.6 Interpretasi Hasil Uji CPTu

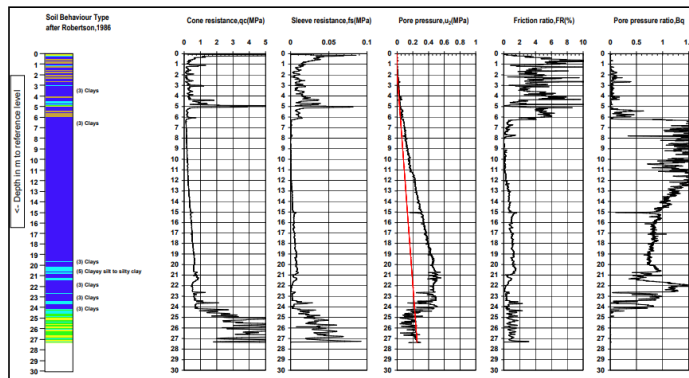
Hasil interpretasi CPTu berupa q_c , f_s , u_2 , FR, Bq ditunjukkan pada Gambar 18,19, dan 20:



Gambar 18. CPTu -01



Gambar 19. CPTu -06



Gambar 20. CPTu -10

Hasil pengukuran CPTu pada penelitian ini yang menunjukkan nilai rasio B_q tinggi ($> 0,75$) sejalan dengan karakteristik tanah *very soft* dan *ultra soft* seperti yang ditunjukkan oleh Tanaka dan Sakagami (1989) sebagai batas tanah yang terkonsolidasi secara normal.

Kemudian data CPTu diolah untuk memperoleh nilai q_t dan σ_v' dengan persamaan :

1. Nilai *corrected cone resistance* (q_t)

$$q_t = q_c + u_2 (1-a) \tag{9}$$

dengan:

$$q_t = \text{corrected cone resistance (kPa)}$$

$$q_c = \text{measured one resistance (kPa)}$$

u_2 = tekanan air pori yang diukur di belakang ujung kerucut (kPa)

a = *are ratio* dari *cone*

2. Nilai tegangan vertikal efektif (σ_v')

$$\sigma_v' = \sigma_v - u_0 \tag{10}$$

dengan

σ_v' = tegangan vertikal efektif (kPa)

σ_v = tegangan vertikal total = $\gamma \cdot z$ (kPa)

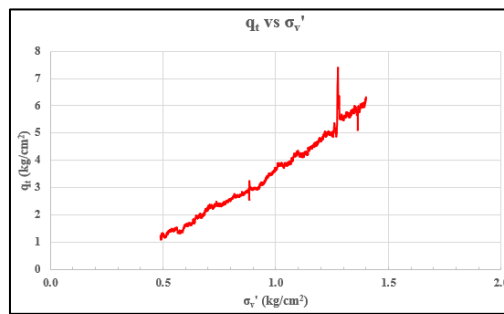
u_0 = tekanan pori hidrostatik (kPa) = $\gamma_w \cdot z$

γ = berat isi tanah total (kN/m³)

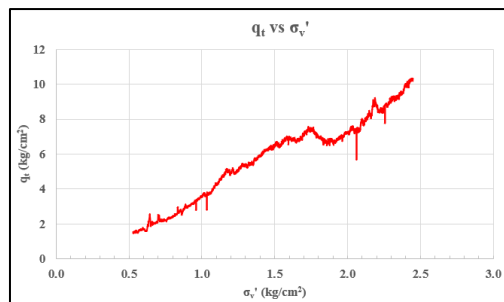
γ_w = berat isi air (kN/m³)

z = kedalaman dari permukaan (m)

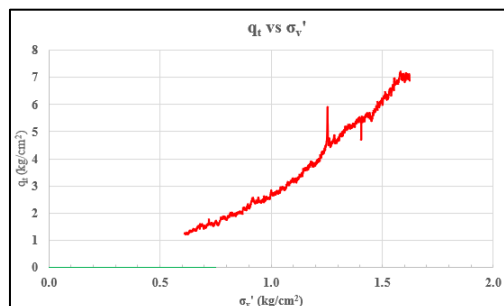
Berikut ini adalah hasil analisa q_t vs σ_v' pada penelitian yang diidentifikasi pada kedalaman 5,0 – 17,5 meter CPTu-01 ; kedalaman 6,30 – 20,0 meter CPTu-10 ; dan kedalaman 7,29 – 30,29 meter CPTu-06 merupakan tanah *very soft* dan *ultra soft*.



Gambar 21. q_t vs σ_v' CPTu-01



Gambar 22. q_t vs σ_v' CPTu-06



Gambar 23. q_t vs σ_v' CPTu-10

3.7 Korelasi Data Uji Oedometer dan Uji CPTu

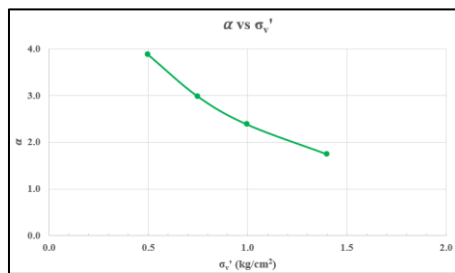
Setelah memperoleh nilai m_v dan q_t , kemudian korelasikan dengan persamaan berikut :

$$E = \frac{1}{m_v} = \alpha \cdot q_c \tag{11}$$

Dengan begitu, maka akan diperoleh nilai α . Berikut ini adalah hasil penelitian:

Tabel 9. Nilai α dari korelasi m_v Konsolidasi Sampel BH-01 dan q_t CPTu-01

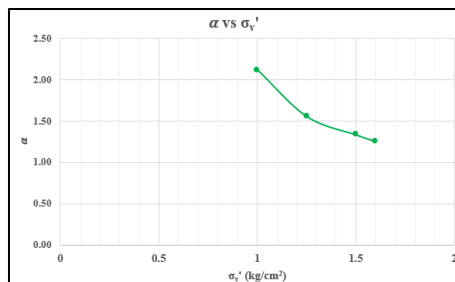
Applied Pressure (P')	m_v	q_t	α
kg/cm ²	cm ² /kg	kg/cm ²	
0,5	0,196	1,316	3,877
0,75	0,145	2,313	2,981
1	0,115	3,672	2,379
1.4	0,092	6,263	1,745



Gambar 24. Grafik α vs σ_v' Korelasi Sampel BH-01 dengan CPTu-01

Tabel 10. Nilai α dari korelasi m_v Konsolidasi Sampel BH-04 dan q_t CPTu-10

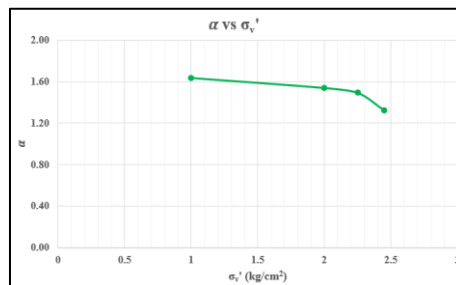
Applied Pressure (P')	m_v	q_t	α
kg/cm ²	cm ² /kg	kg/cm ²	
1	0,165	2,854	2,117
1,25	0,142	4,530	1,555
1,5	0,123	6,097	1,333
1,6	0,116	6,885	1,252



Gambar 25. Grafik α vs σ_v' Korelasi Sampel BH-04 dengan CPTu-10

Tabel 11. Nilai α dari Korelasi m_v Konsolidasi Sampel BH-06 dan q_t CPTu-06

Applied Pressure (P')	m_v	q_t	α
kg/cm ²	cm ² /kg	kg/cm ²	
1	0,171	3,584	1,635
2	0,086	7,540	1,539
2,25	0,078	8,584	1,494
2,45	0,073	10,321	1,327



Gambar 26. Grafik α vs σ_v' Korelasi Sampel BH-06 dengan CPTu-06

Berdasarkan hasil korelasi antara parameter hasil uji CPTu dan uji oedometer, diketahui bahwa nilai α mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya tegangan efektif yang diberikan. Hal ini mencerminkan bahwa pada kondisi awal, tanah berada dalam keadaan sangat lunak dan memiliki kompresibilitas tinggi, yang ditandai dengan nilai α yang besar. Namun, setelah mengalami pembebanan bertahap, tanah menunjukkan perilaku yang lebih kaku dengan nilai α yang semakin menurun. Rentang nilai α yang diperoleh dalam penelitian ini adalah antara 1,252 hingga 3,877, yang menunjukkan konsistensi dengan karakteristik tanah *very soft* hingga *ultra soft* sebagaimana dikaji dalam studi-studi sebelumnya (Bo & Choa, 2003; Rahardjo, 2016).

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan, analisis, dan pembahasan, maka kesimpulan yang didapat dari penelitian ini antara lain adalah:

1. Tanah *very soft* dan *ultra soft* memiliki karakteristik kompresibilitas tinggi dan kuat geser rendah. Hal ini ditunjukkan dari nilai indeks kompresi (C_c) yang tinggi (0,453–0,915) dan nilai koefisien perubahan volume (m_v) cenderung menurun seiring bertambahnya tegangan efektif, mengindikasikan bahwa tanah sangat mudah mengalami deformasi bahkan pada pembebanan kecil.

2. Koefisien konsolidasi (C_v) menunjukkan nilai yang fluktuatif terhadap peningkatan tegangan efektif, baik dari metode *log fitting*, *square root fitting*, maupun perhitungan manual R50 dan R90. Pola ini menunjukkan bahwa pendekatan konvensional Terzaghi dengan asumsi C_v konstan tidak sesuai diterapkan pada tanah *ultra soft* karena perilakunya bersifat non-linier.
3. Analisa settlement terhadap waktu menunjukkan bahwa seluruh deformasi primer terjadi dalam waktu relatif singkat (30–120 menit), tetapi tren waktu penurunan tidak selalu berbanding lurus dengan tegangan. Hal ini memperkuat bahwa pendekatan visko-plastik atau model *strain* besar lebih sesuai untuk menggambarkan perilaku deformasi pada *tanah ultra soft* dibanding teori Terzaghi.
4. Interpretasi data CPTu memberikan gambaran yang sejalan dengan karakteristik tanah lunak, terutama dengan nilai $B_q > 0,75$ yang mengindikasikan tanah sangat jenuh dan berstruktur sangat lunak. Nilai-nilai q_c , f_s , dan u_2 yang rendah mendukung klasifikasi tanah sebagai *very soft* dan *ultra soft*.
5. Korelasi antara m_v hasil uji oedometer dan q_t hasil CPTu melalui parameter α menunjukkan bahwa nilai α cenderung menurun dengan meningkatnya tegangan efektif. Nilai α berada dalam rentang 1,252 hingga 3,877. Pola ini mencerminkan berkurangnya kompresibilitas tanah seiring bertambahnya pembebanan, dan mendukung penggunaan CPTu sebagai alat prediktif terhadap perilaku konsolidasi di lapangan.
6. Penggunaan kombinasi uji oedometer dan CPTu terbukti mampu memberikan pendekatan yang lebih representatif terhadap karakteristik konsolidasi tanah *very soft* dan *ultra soft* dibandingkan penggunaan salah satu metode saja. Ini menunjukkan potensi besar CPTu dalam penghematan waktu dan biaya pada proyek-proyek dengan kondisi tanah sangat lunak.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Choa, V. & Bo, M.W. (2003) *Deformation of ultra-soft soil*. Singapura : Nanyang Technological University.
- Desiani, A., 2017, *Karakteristik Tanah Lunak Cekungan Bandung Berdasarkan Uji In Situ*, Disertasi, Bandung : Universitas Katolik Parahyangan.
- Ding, Y., Zhu, C., & Zhang, W. (2022). A new analytical model for consolidation of ultra-soft clay considering nonlinear parameters. *Computers and Geotechnics*, 143, 104612.
- Lunne, T., & Powell, J. (2018). Piezocone test for consolidation analysis: A state-of-the-art review. *Geotechnical Research*, 5(2), 79-92.
- Mesri, G., & Feng, Z. (2016). Time rate of consolidation of soft clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(1).
- Permana, A. M., & Rahardjo, P. P. (2022). The site characterization of Central Jakarta soft soil using CPTu and laboratory test. *Indonesian Geotechnical Journal*, 1(1), 25–40.
- Rahardjo, P.P. (2016). *Correlation Between Overconsolidation Ratio (OCR) and Pore Pressure Parameter (B_q) from CPTu Data*. In International Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 10, No. 3.

- Rahardjo, P. P., & Anggoro, B. W. (2016). CPTu in consolidating soils. *Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation (ISC 5)*, 363–368.
- Rahardjo, P. P., & Arafianto, A. (2022). *CPTu in ultra-soft and very soft marine clays and silts in North Jakarta coastal area*. In *International Symposium on Practical Applications of Ground Engineering for Embankments on Soft Soils (GEESS2022)*, Dorsett Grand Subang Hotel, Subang Jaya, Malaysia.
- Rongsadi, Kirana, 2017, *Evaluasi Performa/Perilaku Tanah Lunak Setelah Vacuum Preloading dengan Menggunakan CPTu*, Thesis, Bandung : Universitas Katolik Parahyangan.
- Tanaka, H., & Sakagami, M. (1989). Viscous-elastoplastic model for predicting the deformation of normally consolidated clay. *Soils and Foundations*, 29(1), 85–104.