

**ANALISIS PERBANDINGAN PENURUNAN TANAH TERHADAP
FUNGSI WAKTU PADA PERBAIKAN TANAH LUNAK DENGAN
*PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD)***

**SKRIPSI
TEKNIK SIPIL**

**Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



**FARHAN PRIMA CHANDRA
NIM. 165061100111013**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2020**



LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PERBANDINGAN PENURUNAN TANAH TERHADAP FUNGSI WAKTU PADA PERBAIKAN TANAH LUNAK DENGAN *PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD)*

SKRIPSI TEKNIK SIPIL

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



FARHAN PRIMA CHANDRA

NIM. 165061100111013

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
Pada tanggal 27 Juli 2020

Dosen Pembimbing I

Dr. Eng. Ir. Yulvi Zaika, MT
NIP. 19680707 199403 2 002

Dosen Pembimbing II

Dr. rer. nat. Ir. Arief Rachmansyah
NIP. 19660420 199303 1 002

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1



Dr. Eng. Indradi Wijatmiko, ST., M.Eng (Prac.)
NIP. 19810220 200604 1 002

HALAMAN IDENTITAS TIM PENGUJI SKRIPSI

JUDUL SKRIPSI:

**ANALISIS PERBANDINGAN PENURUNAN TANAH TERHADAP
FUNGSI WAKTU PADA PERBAIKAN TANAH LUNAK DENGAN
PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD)**

Nama Mahasiswa : Farhan Prima Chandra

NIM : 165061100111013

Program Studi : Teknik Sipil

Minat : Geoteknik

TIM DOSEN PENGUJI

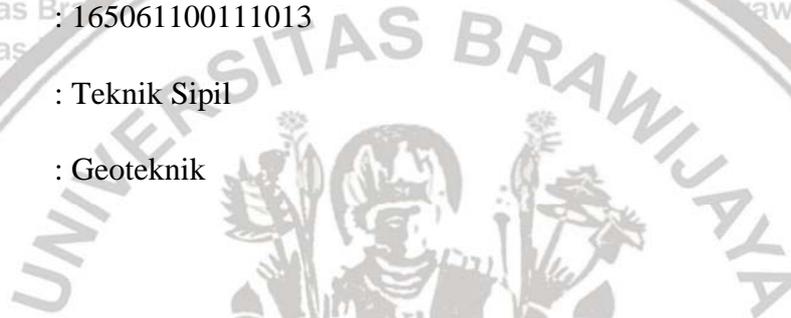
Dosen Penguji I : Ir. Eko Andi Suryo, ST., MT., Ph.D

Dosen Penguji II : Dr. Eng. Ir. Yulvi Zaika, MT.

Dosen Penguji III : Dr. rer. nat. Ir. Arief Rachmansyah

Tanggal Ujian : 17 Juli 2020

SK Penguji : 1253/UN10.F07/KP/2020



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur- unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang- undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 17 Juli 2020

Mahasiswa,



Farhan Prima Chandra

NIM. 165061100111013



**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA**



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 013/UN10.F07.11.11/PP/2020

Sertifikat ini diberikan kepada :

FARHAN PRIMA CHANDRA

Dengan Judul Skripsi :

**ANALISIS PERBANDINGAN PENJURUNAN TANAH TERHADAP FUNGSI
WAKTU PADA PERBAIKAN TANAH LUNAK DENGAN
*PREFABRICATED VERTICAL DRAIN (PVD)***

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal 24 Juli 2020

Ketua Jurusan Teknik Sipil



Alwafi Pujiraharjo, ST, MT
9700829 / 200012 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil

Dr. Eng. Indradi Wijatmiko, ST., M. Eng. [Prac]
NIP. 19810220 200604 1 002

RINGKASAN

FARHAN PRIMA CHANDRA, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2020, *Analisis Perbandingan Penurunan Tanah Terhadap Fungsi Waktu Pada Perbaikan Tanah Lunak Dengan Prefabricated Vertical Drain (PVD)*, Dosen Pembimbing: Yulvi Zaika dan Arief Rachmansyah.

Indonesia merupakan salah satu negara berkembang di dunia yang sedang mengalami pembangunan yang sangat pesat, terutama dalam bidang infrastruktur. Dalam proses pembangunan, sudah semestinya bagi para pemangku kepentingan untuk mengetahui karakteristik daerah yang akan dibangun, salah satu indikatornya adalah kondisi tanah dalam suatu daerah pembangunan. Salah satu infrastruktur yang pembangunannya dihadapkan pada permasalahan tanah lunak adalah Jalan Tol Pasuruan-Probolinggo. Jalan tol ini menghubungkan daerah Pasuruan dengan kota Probolinggo, Jawa Timur. Tanah yang berada di daerah tersebut memiliki karakteristik tanah yang tidak stabil karena mempunyai kandungan air tanah berlebih sehingga tanah menjadi lunak serta daya dukung tanah yang rendah. Selain itu, penurunan konsolidasi yang besar dan lama turut menjadi perhatian serius. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu usaha perbaikan tanah agar struktur tanah menjadi lebih kuat dan kokoh dalam menahan beban konstruksi.

Usaha perbaikan tanah pada tanah lunak pada penelitian ini adalah dengan perlakuan pra-pembebanan yang akan diberikan secara bertahap di laboratorium selama 5 hari dan dipadukan dengan *Prefabricated Vertical Drain (PVD)* yang divariasikan terhadap variabel jarak antar PVD, kedalaman PVD, dan pola pemasangan PVD. Hal tersebut bertujuan untuk mengetahui kinerja maksimum PVD dalam mempercepat proses penurunan tanah yang sebagian besar terjadi akibat konsolidasi primer. Selanjutnya, data karakteristik tanah yang telah diperbaiki akan di bandingkan terhadap sampel tanah yang tak diperbaiki dengan PVD (*benchmark*) dan di analisis, terutama dalam segi waktu dan penurunan konsolidasi berdasarkan perhitungan konsolidasi satu dimensi Terzaghi, perhitungan analisis PVD dengan mempertimbangkan efek *smear zone* dan perhitungan konsolidasi dengan proyeksi Asaoka.

Dari hasil pengolahan data, dapat diketahui bahwa diantara perbedaan variasi PVD, nilai penurunan terbesar setelah 5 hari pembebanan adalah pada variasi kedalaman PVD 40 cm berpola segitiga. Hal tersebut dibuktikan dengan capaian penurunan aktual skala laboratorium sebesar 42,926 mm, kemudian penurunan dengan analisis PVD mempertimbangkan efek *smear zone* sebesar 42,926 mm, dan terakhir nilai penurunan dengan analisis Asaoka sebesar 61,448 mm. Kemudian besar penurunan akhir *benchmark* setelah 5 hari pembebanan dengan analisis Terzaghi adalah sebesar 6,824 mm, serta variasi PVD dengan nilai penurunan terbesar dan waktu konsolidasi tercepat terhadap *benchmark* adalah variasi kedalaman PVD 40 cm berpola segitiga dimana besarnya penurunan saat akhir konsolidasi sebesar 42,926 mm dan waktu penurunan yang dibutuhkan untuk mencapai *benchmark* penurunan yaitu selama 3,945 jam.

Kata kunci: Tanah lunak, *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*, Terzaghi, *smear zone*, Asaoka

SUMMARY

FARHAN PRIMA CHANDRA, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, July 2020, Analysis of Soil Settlement Against Consolidation Time Function of Soil Improvement Using Prefabricated Vertical Drain (PVD), Academic Supervisor: Yulvi Zaika and Arief Rachmansyah

Indonesia is one of the developing countries that is experiencing very rapid development, especially in infrastructure development. In this process, it is proper for stakeholders to know the characteristics of the area that built, one of the indicator is the condition of the land in a development area. One of the infrastructures whose development is faced with soft soil issues is the Pasuruan-Probolinggo Toll Road project. This toll road connects the Pasuruan area with Probolinggo City at East Java. Land in the area has unstable soil characteristics because it has excess soil water content so that the soil becomes soft and the soil bearing capacity is low. In addition, a large and prolonged decline in consolidation is also a serious concern. Therefore, an effort to improve the soil is needed so that the soil structure becomes stronger.

Soil improvement from soft soils in this study are by preloading treatment which will be given in stages in the laboratory for 5 days and combined with Prefabricated Vertical Drain (PVD) which varies with variable distance between PVD, PVD depth, and PVD installation pattern. It aims to determine the maximum performance of PVD in accelerating the process of land subsidence which is mostly due to primary consolidation. Furthermore, the improved soil characteristics data will be compared against soil samples that are not repaired with a PVD (benchmark sample), especially in terms of time and consolidation decreases based on one-dimensional Terzaghi consolidation calculations, PVD analysis calculations that taking into account the effects of smear zones and calculation of soil consolidation with Asaoka's projections.

From the results of data processing, it can be seen that among the variations in PVD variation, the greatest reduction after 5 days of loading is the variation in the depth of the 40 cm triangular patterned PVD. This is evidenced by the achievement of an actual decrease in laboratory scale is 42.926 mm, then a decrease with PVD analysis considers the effect of a smear zone is 42.926 mm, and finally the value of the decline with the Asaoka analysis of 61.448 mm. Then, the final reduction in the benchmark after 5 days of loading with Terzaghi analysis was 6.824 mm, and the variation of PVD with the largest decrease and the fastest consolidation time against the benchmark was a 40 cm patterned PVD depth variation where the magnitude of the decline at the end of the consolidation was 42.926 mm and the time of decline required to achieve the benchmark decline is 3.945 hours.

Key words: Soft soil, Prefabricated Vertical Drain (PVD), Terzaghi, smear zone, Asaoka

PENGANTAR

Puji syukur dipanjatkan ke hadirat Allah SWT karena berkat rahmat, anugerah, hidayah dan tuntunan-Nya penulis berhasil menyelesaikan skripsi dengan judul “Analisis Perbandingan Penurunan Tanah Terhadap Fungsi Waktu Pada Perbaikan Tanah Lunak Dengan *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*”. Sholawat serta salam tak lupa dihadirkan kepada Rasul-Nya, Nabi Muhammad SAW berkat luhur budi dan suri tauladannya yang telah membawa umat manusia menuju zaman yang cemerlang.

Penyusunan skripsi ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya. Dalam proses penulisan skripsi ini tidak terlepas dari pertolongan, bimbingan serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis dengan tulus ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ibu Budi Lestari, SP. dan Bapak Heru Sru Wiratno, SP. sebagai orangtua penulis yang selalu mendukung dan memberikan motivasi dalam kehidupan sehari-hari.
2. Ibu Dr. Eng. Ir. Yulvi Zaika, MT. selaku Dosen Pembimbing I.
3. Bapak Dr. rer. nat. Ir. Arief Rachmansyah selaku Dosen Pembimbing II.
4. Bapak Ir. Eko Andi Suryo, ST., MT., Ph.D. selaku Ketua Majelis/Penguji.
5. Bapak Dr. Ir. Harimurti, MT. selaku dosen penguji ujian akhir, semoga selalu diberikan kesehatan.
6. Bapak Dr. Eng. Ir. Alwafi Pujiraharjo, ST, MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya.
7. Bapak Dr. Eng. Ir. Indradi Wijatmiko, ST., M.Eng (Prac.) selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil Universitas Brawijaya.
8. Bapak Ir. Sugeng Prayitno Budio, MS., IPM selaku Dosen Penasihat Akademis yang selalu mendukung dan memberikan motivasi saat kegiatan perkuliahan.
9. Fritz Risty Randan, Willy Anggi Abadi, Iffat Shafwan Haristama, dan Dyka Retry Rasyid sebagai rekan penulis dalam penelitian skripsi yang selalu menyertai dan kebersamai penulis dalam mengerjakan skripsi.
10. George Rasyid Permana, Firzi Maulana Sani, Muhammad Musyfiq Nur Hafidhi, I Putu Leo Pramana, dan Oksa Eberly sebagai rekan dekat penulis selama berkuliah di



Teknik Sipil Universitas Brawijaya yang selalu memberikan dukungan materiil dan moril.

11. Paguyuban RT 01/RW 04 dan Paguyuban RT 02/RW 06 Perumahan Grand Masyhur Residence Kota Malang yang sudah mewedahi dan kebersamai penulis selama menetap di Kota Malang.
12. Keluarga Besar Mahasiswa Sipil dan Keluarga Besar Mahasiswa Teknik sebagai pendukung terbesar dalam kegiatan perkuliahan.
13. Teman-teman Teknik Sipil Angkatan 2016 dan 2017, Forum Studi Islam Sipil FT-UB, Himpunan Mahasiswa Sipil, Badan Eksekutif Mahasiswa FT-UB dan Al-Hadiid FT-UB sebagai pendukung dalam organisasi dan kemahasiswaan.
14. Staff dan Laboran Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi yang sudah memberikan dukungan moril dan pengetahuan dalam kegiatan perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik serta saran yang membangun sangat diharapkan untuk riset lanjutan di masa mendatang. Terakhir, semoga skripsi ini bisa memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan umum khususnya di ranah teknik sipil.

Malang, 1 Juli 2020

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	3
1.3 Rumusan Masalah.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Tujuan Penelitian.....	4
1.6 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Tanah.....	6
2.1.1 Definisi Tanah.....	6
2.1.2 Komposisi Tanah.....	7
2.2 Ukuran Butiran Tanah.....	10
2.3 Tanah Lempung Lunak.....	12
2.4 Konsolidasi dan Penurunan.....	14
2.5.1 Koefisien Pemampatan (a_v) dan Koefisien Perubahan Volume (m_v).....	16
2.5.2 Indeks Pemampatan (C_c).....	17
2.5.3 Indeks Pemampatan Kembali (C_r).....	17
2.5.4 Penurunan Konsolidasi Menggunakan C_r dan C_c	18
2.5.5 Derajat Penurunan Konsolidasi (U).....	19
2.5.6 Koefisien Konsolidasi (C_v).....	19
2.6 <i>Prefabricated Vertical Drain (PVD)</i>	19
2.7 <i>Uji Vane Shear</i>	24
2.8 Analisis Prosedur Observasi Asaoka.....	26
BAB III METODE PENELITIAN	30
3.1 Waktu dan Tempat.....	30
3.2 Rencana Penelitian.....	30
3.3 Persiapan.....	30
3.4 Pekerjaan Lapangan.....	30





3.5 Pekerjaan Laboratorium.....	30
3.5.1 Percobaan Penelitian.....	30
3.5.2 Pengumpulan Data.....	31
3.6 Metode Pengujian.....	31
3.7 Rancangan Penelitian.....	34
3.8 Analisis Data.....	34
3.9 Diagram Alir.....	35
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	36
4.1 Karakteristik Tanah.....	36
4.1.1 Sifat Fisis.....	36
4.1.2 Sifat Mekanis.....	39
4.2 Perencanaan Slurry Tanah Benda Uji.....	40
4.3 Pembebanan Konsolidasi Di Laboratorium.....	40
4.3.1 Kalibrasi Alat.....	40
4.3.2 Beban Rencana.....	42
4.3.3 Uji Kadar Air.....	43
4.3.4 Berat Isi Tanah.....	43
4.3.5 Derajat Kejenuhan.....	43
4.4 Hubungan Penurunan dan Waktu.....	44
4.4.1 Tanpa PVD.....	44
4.4.2 Panjang PVD Pola Segiempat.....	48
4.4.3 Panjang PVD Pola Segitiga.....	53
4.4.4 Jarak PVD Pola Segiempat.....	58
4.4.5 Jarak PVD Pola Segitiga.....	63
4.4.6 Perbandingan Penurunan Beda Pola.....	68
4.5 Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu.....	71
4.5.1 Tanpa PVD.....	71
4.5.2 Panjang PVD Pola Segiempat.....	72
4.5.3 Panjang PVD Pola Segitiga.....	76
4.5.4 Jarak PVD Pola Segiempat.....	79
4.5.5 Jarak PVD Pola Segitiga.....	82
4.5.6 Perbandingan Tegangan Air Pori Beda Pola.....	85
BAB V PENUTUP.....	88
5.1 Kesimpulan.....	88
5.2 Saran.....	89

DAFTAR PUSTAKA

90

LAMPIRAN

92



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Kandungan Bahan Organik	9
Tabel 2.2	Perbandingan Nilai <i>Ch/Cv</i>	23
Tabel 3.1	Variasi Jarak dan Kedalaman PVD	32
Tabel 4.1.	Ukuran dan Specific Gravity Untuk Tanah Pasir, Lanau, Lempung, dan Organik	38
Tabel 4.2	Kandungan Bahan Organik	38
Tabel 4.3	Kalibrasi Alat Uji dan Box Konsolidasi	41
Tabel 4.4	Beban Rencana Box 60x60x55 cm ³ Pada Alat Uji 2	42
Tabel 4.5	Beban Rencana Box 50x50x45 cm ³ Pada Alat Uji 1	43
Tabel 4.6	Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi Tanpa PVD	47
Tabel 4.7	Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi Tanpa PVD	47
Tabel 4.8	Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segiempat	49
Tabel 4.9	Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segiempat	49
Tabel 4.10	Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segiempat	49
Tabel 4.11	Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segiempat	50
Tabel 4.12	Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segiempat	51
Tabel 4.13	Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segiempat	51
Tabel 4.14	Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segiempat	52
Tabel 4.15	Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segiempat	52
Tabel 4.16	Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segiempat	53



Tabel 4.17 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segitiga	54
Tabel 4.18 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segitiga	54
Tabel 4.19 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segitiga	54
Tabel 4.20 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segitiga	55
Tabel 4.21 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segitiga	56
Tabel 4.22 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segitiga	56
Tabel 4.23 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segitiga	57
Tabel 4.24 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segitiga	57
Tabel 4.25 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segitiga	58
Tabel 4.26 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Jarak PVD 20 cm Pola Segiempat	59
Tabel 4.27 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 20 cm Pola Segiempat	59
Tabel 4.28 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 20 cm Pola Segiempat	59
Tabel 4.29 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Jarak PVD 25 cm Pola Segiempat	60
Tabel 4.30 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 25 cm Pola Segiempat	61
Tabel 4.31 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 25 cm Pola Segiempat	61
Tabel 4.32 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Jarak PVD 30 cm Pola Segiempat	62
Tabel 4.33 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 30 cm Pola Segiempat	62



Tabel 4.34 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 30 cm Pola Segiempat.....	62
Tabel 4.35 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Jarak PVD 20 cm Pola Segitiga	63
Tabel 4.36 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 20 cm Pola Segitiga	64
Tabel 4.37 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 20 cm Pola Segitiga.....	64
Tabel 4.38 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Jarak PVD 25 cm Pola Segitiga	65
Tabel 4.39 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 25 cm Pola Segitiga	65
Tabel 4.40 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 25 cm Pola Segitiga.....	66
Tabel 4.41 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Jarak PVD 30 cm Pola Segitiga	67
Tabel 4.42 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 30 cm Pola Segitiga	67
Tabel 4.43 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 30 cm Pola Segitiga.....	67
Tabel 4.44 Rekapitulasi Nilai Penurunan Seluruh Box Uji Konsolidasi.....	71
Tabel 4.45 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Tanpa PVD	72
Tabel 4.46 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segiempat.....	73
Tabel 4.47 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segiempat.....	74
Tabel 4.48 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segiempat.....	75
Tabel 4.49 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segitiga.....	76
Tabel 4.50 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segitiga.....	77
Tabel 4.51 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segitiga.....	78



Tabel 4.52 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Jarak PVD 20 cm Pola

Segiempat 79

Tabel 4.53 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Jarak PVD 25 cm Pola

Segiempat 80

Tabel 4.54 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Jarak PVD 30 cm Pola

Segiempat 81

Tabel 4.55 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Jarak PVD 20 cm Pola

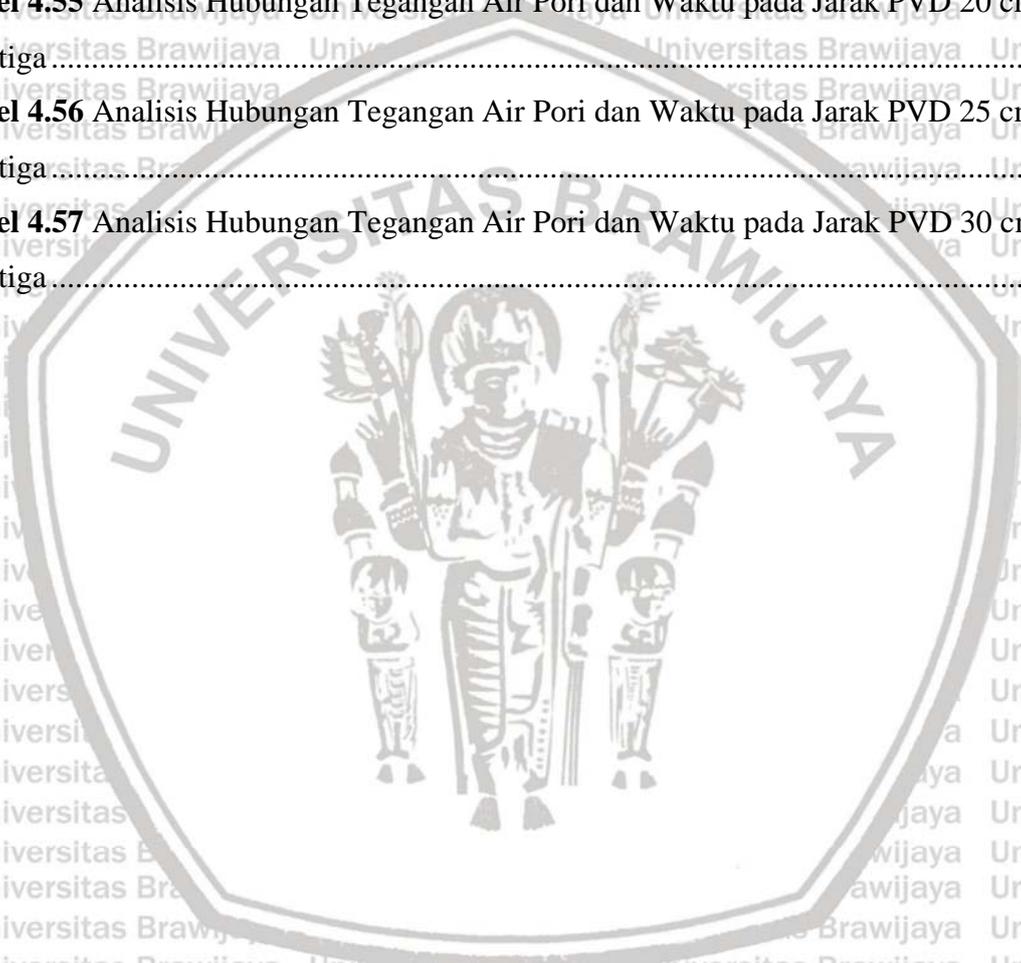
Segitiga 82

Tabel 4.56 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Jarak PVD 25 cm Pola

Segitiga 83

Tabel 4.57 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Jarak PVD 30 cm Pola

Segitiga 84



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
	Gambar 2.1 Tiga Fase Elemen Tanah	7
	Gambar 2.2 Alat Uji Hidrometer.....	10
	Gambar 2.3 Analisis Distribusi Ukuran Butiran	12
	Gambar 2.4 Reaksi Tekanan Air Pori Saat Terjadi Konsolidasi.....	15
	Gambar 2.5 Kurva e-p'.....	17
	Gambar 2.6 Kurva e-logp'.....	18
	Gambar 2.7 Grafik e-logp' pada:	18
	Gambar 2.8 Metode Akar Waktu Taylor.....	19
	Gambar 2.9 Prefabricated Vertical Drain (PVD)	20
	Gambar 2.10 Proses Konsolidasi Tanpa PVD	20
	Gambar 2.11 Proses Konsolidasi Dengan PVD	21
	Gambar 2.12 Pola Pemasangan PVD.....	21
	Gambar 2.13 Equivalent Diameter (dw) untuk PVD	22
	Gambar 2.14 Daerah Pengaruh Vertical Drain	23
	Gambar 2.15 Alat Uji Vane Shear.....	24
	Gambar 2.16 Hubungan Kedalaman dan Kuat Geser Undrained dari Berbagai Tipe Pengujian.....	25
	Gambar 2.17 Zona Distorsi dan Koreksi Kuat Geser Undrained dari Uji Vane Shear.....	26
	Gambar 2.18 Prosedur Analisis Data Penurunan Dengan Interval Waktu Yang Konstan (Sumber: Magnan dan Deroy, 1980).....	28
	Gambar 2.19 Prediksi Penurunan Akhir Dengan Metode Asaoka.....	29
	Gambar 3.1 Kalibrasi Alat Uji 1	32
	Gambar 3.2 Kalibrasi Alat Uji 2	33
	Gambar 3.3 Kalibrasi Alat Uji 3	33
	Gambar 3.4 Alat Uji dan Box Konsolidasi 60x60x55 cm ³	34
	Gambar 3.5 Diagram Alir Metode Penelitian	35
	Gambar 4.1 Investigasi Tanah dengan SPT.....	37
	Gambar 4.2 Grafik Plastisitas Tanah.....	39
	Gambar 4.3 Kalibrasi Alat Uji 1	41
	Gambar 4.4 Kalibrasi Alat Uji 2	42
	Gambar 4.5 Kalibrasi Alat Uji 3	42

Gambar 4.6 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi Tanpa PVD	48
Gambar 4.7 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segiempat	50
Gambar 4.8 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segiempat	51
Gambar 4.9 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segiempat	53
Gambar 4.10 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segitiga	54
Gambar 4.11 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segitiga	56
Gambar 4.12 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segitiga	58
Gambar 4.13 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 20 cm Pola Segiempat	60
Gambar 4.14 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 25 cm Pola Segiempat	61
Gambar 4.15 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi Jarak PVD 30 cm Pola Segiempat	63
Gambar 4.16 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 20 cm Pola Segitiga	64
Gambar 4.17 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 25 cm Pola Segitiga	66
Gambar 4.18 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi Jarak PVD 30 cm Pola Segitiga	68
Gambar 4.19 Perbandingan Nilai Penurunan Dengan Variasi Jarak dan Pola Segiempat..	69
Gambar 4.20 Perbandingan Nilai Penurunan Dengan Variasi Jarak dan Pola Segitiga.....	69
Gambar 4.21 Perbandingan Nilai Penurunan Dengan Variasi Kedalaman dan Pola Segiempat	70
Gambar 4.22 Perbandingan Nilai Penurunan Dengan Variasi Kedalaman dan Pola Segitiga	70
Gambar 4.23 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi Tanpa PVD	72
Gambar 4.24 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segiempat	73



Gambar 4.25 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segiempat.....	74
Gambar 4.26 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segiempat.....	75
Gambar 4.27 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segitiga.....	76
Gambar 4.28 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segitiga.....	77
Gambar 4.29 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segitiga.....	78
Gambar 4.30 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 20 cm Pola Segiempat.....	79
Gambar 4.31 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 25 cm Pola Segiempat.....	80
Gambar 4.32 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segiempat.....	81
Gambar 4.33 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 20 cm Pola Segitiga.....	82
Gambar 4.34 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 25 cm Pola Segitiga.....	83
Gambar 4.35 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 30 cm Pola Segitiga.....	84
Gambar 4.36 Perbandingan Nilai Tegangan Air Pori Terhadap Waktu Konsolidasi Dengan Variasi Jarak dan Pola Segiempat.....	85
Gambar 4.37 Perbandingan Nilai Tegangan Air Pori Terhadap Waktu Konsolidasi Dengan Variasi Jarak dan Pola Segitiga.....	86
Gambar 4.38 Perbandingan Nilai Tegangan Air Pori Terhadap Waktu Konsolidasi Dengan Variasi Kedalaman dan Pola Segiempat.....	86
Gambar 4.39 Perbandingan Nilai Tegangan Air Pori Terhadap Waktu Konsolidasi Dengan Variasi Kedalaman dan Pola Segitiga.....	87





(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara berkembang di dunia yang sedang mengalami pembangunan yang sangat pesat, terutama dalam bidang infrastruktur. Dalam proses pembangunan, sudah semestinya bagi para pemangku kepentingan untuk mengetahui karakteristik daerah yang akan dibangun, salah satu indikatornya adalah kondisi tanah dalam suatu daerah pembangunan. Salah satu infrastruktur yang pembangunannya dihadapkan pada permasalahan tanah lunak adalah Jalan Tol Pasuruan-Probolinggo. Jalan tol ini menghubungkan daerah Pasuruan dengan kota Probolinggo, Jawa Timur. Tanah yang berada di daerah tersebut memiliki karakteristik tanah yang tidak stabil karena mempunyai kandungan air tanah berlebih sehingga tanah menjadi lunak serta daya dukung tanah yang rendah. Selain itu, penurunan konsolidasi yang besar dan lama turut menjadi perhatian serius. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu usaha perbaikan tanah agar struktur tanah menjadi lebih kuat dan kokoh dalam menahan beban konstruksi.

Perlunya perbaikan tanah pada tanah lunak adalah dengan perlakuan pra-pembebanan dan dipadukan dengan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dengan timbunan yang akan diberikan secara bertahap di laboratorium. Pra-pembebanan bertujuan untuk menghilangkan penurunan konsolidasi yang berimbas pada meningkatnya kekuatan geser pada tanah dan berkurangnya kompresibilitas tanah. Metode ini secara langsung merupakan metode perkuatan tanah dengan mengurangi kadar air tanah. Namun, perbaikan tanah dengan pra-pembebanan saja belum cukup, karena metode ini memerlukan waktu yang relatif lama (dapat mencapai waktu puluhan tahun), sementara suatu proyek konstruksi seringkali tidak dapat menunggu lama. Oleh karena itu, untuk mempercepat waktu konsolidasi maka pra-pembebanan digabung dengan PVD untuk mempercepat proses penurunan tanah yang sebagian besar terjadi akibat konsolidasi primer.

Penelitian terdahulu telah dilakukan, salah satu diantaranya adalah perencanaan perbaikan tanah lunak dengan studi kasus di Apron Bandara Kualanamu, Medan, Sumatera Utara. Perbaikan tanah dilakukan dengan metode pra-pembebanan yang dikombinasikan memakai PVD dengan mengukur waktu yang dibutuhkan untuk mencapai konsolidasi 90%.

Hasil yang didapatkan, yaitu dengan menggunakan kombinasi pra-pembebanan dan PVD hanya membutuhkan waktu 73 hari untuk mencapai derajat konsolidasi 90%, lebih cepat dibandingkan dengan tanpa menggunakan PVD yaitu selama 7,8 tahun untuk mencapai derajat konsolidasi 90% (Atsarina, 2012). Jadi, penggunaan PVD dapat mempercepat waktu konsolidasi tanah dan meningkatkan daya dukung tanah.

Hardiyatmo (2018) menyebutkan bahwa proses konsolidasi dalam skala laboratorium dapat diamati dengan pemasangan piezometer untuk mencatat perubahan tekanan air pori, durasi waktu penurunan konsolidasi, serta besarnya penurunan konsolidasi yang diukur dengan berpedoman pada titik referensi ketinggian di tempat tertentu. Sementara itu, uji *unconfined* adalah uji yang digunakan untuk mengetahui daya dukung tanah di laboratorium. Dalam pengujian tanah, data yang dapat diambil berupa kuat bebas saat tanah mengalami keruntuhan. Tes ini akan dilakukan terhadap sampel tanah asli di lapangan.

Menurut Nawir et al. (2012), teori konsolidasi satu dimensi Terzaghi telah digunakan untuk memprediksi penurunan serta waktu konsolidasi. Teori ini dianggap dapat menjelaskan penurunan akibat kompresi dan drainase satu dimensi pada tanah dengan baik. Akan tetapi dalam banyak kasus, estimasi penurunan konsolidasi dengan teori Terzaghi memberikan hasil yang jauh lebih besar daripada penurunan aktual di lapangan. Adanya pengabaian dari beberapa faktor yang terkait dengan metode pelaksanaan pembebanan menjadi penyebab terjadinya *error*. Perkuatan tanah (*gained strength*) yang terjadi akibat proses penimbunan bertahap (*stage construction*), rangkak (*creep strain*), dan perubahan tingkat kejenuhan (*wetting effects*), merupakan faktor-faktor yang sering diabaikan dalam estimasi penurunan konsolidasi.

Selain teori Terzaghi, terdapat pula prosedur dalam analisis penurunan tanah berdasarkan pengamatan lapangan. Dilansir Asaoka (1978), besarnya penurunan tanah aktual dapat diprediksi tanpa membutuhkan parameter-parameter yang digunakan pada analisis konsolidasi, seperti koefisien konsolidasi, data tekanan air pori, regangan maksimum, dan panjang drainase tanah. Besarnya prediksi penurunan tanah akibat suatu kasus timbunan dianalisis dengan menggunakan prosedur observasi Asaoka yang diperoleh setelah data penurunan didapatkan, kemudian dilakukan *curve fitting*. Beberapa parameter yang digunakan pada perhitungan konsolidasi Terzaghi akan dikoreksi oleh penurunan konsolidasi yang didapatkan dengan metode Asaoka.

1.2 Identifikasi Masalah

Permasalahan awal yang dapat diambil dari tajuk diatas, yaitu:

1. Tanah lunak memiliki kadar air dan kompresibilitas tinggi yang dapat menyebabkan penurunan yang besar serta dapat mengakibatkan kerusakan pada bangunan diatasnya.
2. Tanah lunak memiliki sifat permeabilitas yang rendah dan penurunan yang terjadi dapat berlangsung dalam waktu yang lama sehingga dibutuhkan usaha perbaikan terhadap sifat asli tanah di lapangan.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian yang telah dipaparkan sebelumnya, maka dapat dirumuskan beberapa masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini, diantaranya:

1. Bagaimana karakteristik tanah lunak yang dijumpai di Jalan Tol Pasuruan- Probolinggo berdasarkan sifat fisik dan mekaniknya?
2. Berapa besar penurunan pada tanah yang diteliti dengan metode pra-pembebanan yang dikombinasikan dengan PVD menggunakan teori Terzaghi?
3. Berapa besar penurunan pada tanah yang diteliti terhadap fungsi waktu melalui analisis prosedur observasi Asaoka?
4. Berapa hasil perbandingan antara nilai penurunan dengan teori Terzaghi dan nilai penurunan dengan analisis Asaoka?

1.4 Batasan Masalah

Untuk memperjelas ruang lingkup penelitian, maka pembatasan masalah diberikan sebagai berikut:

1. Benda uji yang digunakan sebagai sampel adalah tanah *disturbed* di Jalan Tol Pasuruan-Probolinggo.
2. Penelitian dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, dengan penelitian sebagai berikut:
 - Sifat fisik tanah asli (uji konsolidasi dan kadar air).
 - Penentuan besarnya penurunan pada tanah terhadap fungsi waktu konsolidasi menggunakan analisis Asaoka.
3. Perlakuan pada sampel, diantaranya:

- Penambahan kombinasi PVD dengan panjang 50 cm pola segitiga dan persegi dengan beban bertahap yang disesuaikan dengan alat uji yang digunakan.
- Penggunaan piezometer sebagai alat untuk mengetahui tegangan air pori pada sampel tanah.

1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik tanah lunak di daerah Jalan Tol Pasuruan-Probolinggo berdasarkan sifat fisik dan mekaniknya.
2. Mengetahui besar penurunan pada tanah yang diteliti dengan metode pra-pembebanan yang dikombinasikan dengan PVD menggunakan teori Terzaghi.
3. Mengetahui besar penurunan pada tanah yang diteliti terhadap fungsi waktu dengan analisis prosedur observasi Asaoka.
4. Mengetahui hasil perbandingan antara nilai penurunan dengan teori Terzaghi dan nilai penurunan dengan analisis Asaoka.

1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Bagi praktisi lapangan, diantaranya:
 - Sebagai informasi data karakteristik tanah lunak di daerah Jalan Tol Pasuruan-Probolinggo.
 - Dengan mengetahui hubungan antara kadar air dengan besarnya nilai daya dukung tanah diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan dalam menentukan solusi yang tepat dalam mengatasi permasalahan di daerah tersebut.
 - Mempercepat waktu penurunan tanah yang akan ditinjau.
 - Meningkatkan daya dukung tanah dengan menggunakan PVD pola segitiga dan persegi dan pra-pembebanan yang diberikan secara bertahap.
 - Mengetahui perbedaan nilai penurunan konsolidasi berdasarkan teori Terzaghi dengan penurunan pada tanah yang diteliti terhadap fungsi waktu menggunakan analisis prosedur observasi Asaoka.

2. Bagi kalangan akademisi, sebagai referensi yang dapat digunakan sebagai acuan penelitian di bidang geoteknik dan mekanika tanah khususnya yang terkait dengan permasalahan tanah lunak.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah

2.1.1 Definisi Tanah

Tanah adalah campuran antara batuan dengan material organik dan anorganik yang hadir pada permukaan bumi akibat erosi dan pelapukan seiring berjalannya waktu. Adapun menurut para ahli, tanah dapat diartikan sebagai berikut:

1. Tanah diartikan sebagai material yang terdiri dari butiran mineral-mineral padat yang tak tersegmentasi dengan yang lainnya dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk disertai dengan zat cair dan udara yang mengisi ruang-ruang kosong diantara partikel-partikel tersebut (Das, 2011).
2. Tanah adalah kumpulan dari padatan dan tidak terikat satu sama lain serta terdapat rongga-rongga diantara bagian-bagian tersebut yang berisi udara dan air (Verhoef, 1994).
3. Dunn (1980) menyebutkan bahwa berdasarkan asalnya, tanah diklasifikasikan secara luas menjadi 2 macam yaitu:
 - a. Tanah organik adalah campuran yang berasal dari sisa tanaman dan kadang-kadang dari kumpulan kerangka dan kulit organisme.
 - b. Tanah anorganik adalah tanah yang berasal dari pelapukan batuan secara kimia maupun fisis.

Dalam bidang konstruksi, tanah mempunyai peran sangat besar dalam perencanaan dan pembangunan bangunan sipil karena tanah berfungsi untuk mendukung beban konstruksi yang ada di atasnya. Oleh karena itu, tanah yang akan digunakan harus dipersiapkan terlebih dahulu sebelum digunakan sebagai lapisan dasar (*subgrade*).

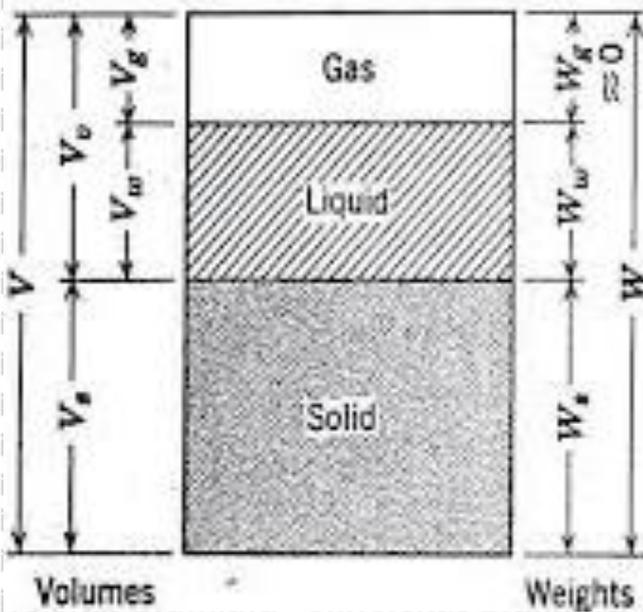
Adapun pengklasifikasian tanah dikelompokkan menurut sistem *Unified Soil Classification System* (USCS). Klasifikasi ini dibuat oleh Cassagrande pada tahun 1942. Pada dasarnya, tanah terbagi menjadi tanah berbutir kasar (kerikil dan pasir) dan tanah berbutir halus (lanau dan lempung). Tanah digolongkan dalam butiran kasar apabila kurang dari 50% lolos saringan nomor 200, sementara tanah tergolong butiran halus jika lebih dari 50% lolos saringan nomor 200.

2.1.2 Komposisi Tanah

Tanah terdiri dari tiga fase elemen yaitu:

- a) Butiran tanah (*solid*)
- b) Air
- a) Udara

Tiga fase elemen tanah seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Tiga Fase Elemen Tanah

(Sumber: Das, 2011)

Hubungan volume-berat :

$$V = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a \quad (2.1)$$

Dimana :

- V_s = volume butiran padat
- V_v = volume pori
- V_w = volume air di dalam pori
- V_a = volume udara di dalam pori

Apabila udara dianggap tidak memiliki berat, maka berat total dari contoh tanah dapat dinyatakan dengan:

$$W = W_s + W_w \quad (2.2)$$

Dimana:

W_s = berat butiran padat

W_w = berat air

Hubungan persamaan yang umum dipakai untuk suatu elemen tanah adalah angka pori (*void ratio*), porositas (*porosity*), derajat kejenuhan (*degree of saturation*), berat jenis (*unit weight*), dan kadar air (*water content*) sebagai berikut:

a. Angka Pori

Angka pori atau *void ratio* (e) adalah perbandingan antara volume pori dan volume butiran padat, atau:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.3)$$

b. Porositas

Porositas atau *porosity* (n) adalah perbandingan antara volume pori dan volume tanah total, atau:

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2.4)$$

c. Derajat Kejenuhan

Derajat kejenuhan atau *degree of saturation* (S) adalah perbandingan antara volume air dengan volume pori, atau:

$$s = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.5)$$

d. Kadar Air

Kadar air atau *water content* (w) adalah perbandingan antara berat air dan berat butiran padat dari volume tanah yang diselidiki, atau:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (2.6)$$

e. Berat Volume

Berat volume (γ) adalah berat tanah per satuan volume, atau:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2.7)$$



Kadar Bahan Organik dalam Tanah

Tanah organik adalah tanah yang mengandung material organik yang berasal dari sisa tumbuhan ataupun hewan di masa lalu. ASTM D4427 menjelaskan tanah dengan kandungan bahan organik lebih dari 20% disebut tanah organik dan tanah dengan kandungan bahan organik lebih dari 75% disebut Gambut. Selanjutnya terdapat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kandungan Bahan Organik

Basic Soil Type	Description	Symbol	Organic Content (%)
Clay or silt or sand	Slightly organic	O	2-20
Organic soil		O	25-75
Peat	-	Pt	>75

American Society for Testing Material (ASTM D2487) menggolongkan tanah menurut *Unified Soil Classification System* (USCS). Sistem ini dibuat berdasarkan distribusi ukuran butir dan batas-batas Atterberg yaitu Batas Cair (LL); Batas Plastis (PL) dan Indeks Plastisitas (PI=LL-PL). Sistem klasifikasi membedakan dua jenis tanah utama, tanah butir kasar dan tanah butir halus yang didasarkan apakah % tanah lebih halus dari 0.075 mm jumlahnya lebih besar atau sama dengan 50% (tanah butir halus), atau lebih sedikit dari 50% (tanah butir kasar). Lebih lanjut, untuk mengetahui kadar organik dalam tanah dapat dilakukan pengujian termal.

Metode *loss on ignition* adalah metode dekomposisi bahan organik memakai panas. Pemanasan pada suhu tinggi digunakan untuk menghilangkan bahan organik. Sampel tanah kering oven ditempatkan pada tanur dengan kontrol suhu yang baik. Berat yang hilang dari sampel tanah sehubungan oksidasi bahan organik disebut LOI (%), didapat melalui persamaan berikut ini:

$$LOI (\%) = \left(\frac{\text{Berat}_{105} - \text{Berat}_{440}}{\text{Berat}_{105}} \right) \times 100\% \quad (2.8)$$

Dimana:

LOI (%) = jumlah bahan organik yang terdapat pada tanah

Berat₁₀₅ = berat tanah kering oven pada suhu 105°C selama 24 jam

Berat₄₄₀ = berat tanah setelah pemanasan pada suhu 440°C selama waktu tertentu.

Batas Atterberg

Menurut Das (2011), kadar air dimana terjadi transisi dari keadaan padat ke keadaan semi-padat didefinisikan sebagai batas susut (*shrinkage limit*). Selanjutnya, kadar air di mana transisi dari keadaan semi-padat ke keadaan plastis terjadi dinamakan batas plastis

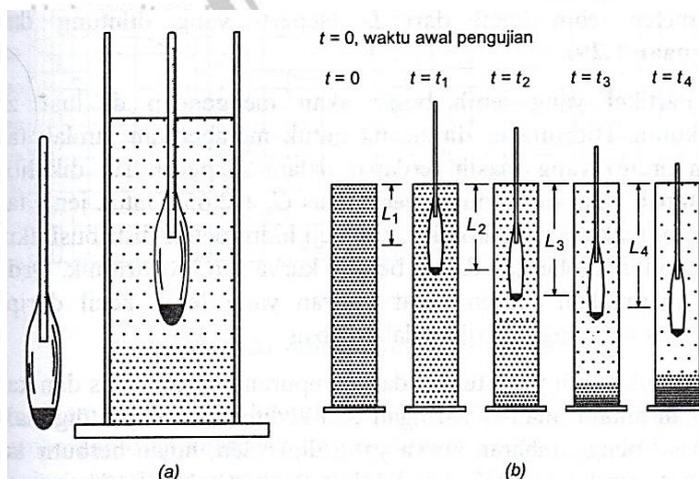
(*plastic limit*), dan dari keadaan plastis ke keadaan cair dinamakan batas cair (*liquid limit*).

Batas – batas ini dikenal juga sebagai batas Atterberg (*Atterberg limits*). Batas cair (*Liquid Limit*), didefinisikan sebagai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis, yaitu batas atas dari daerah plastis. Batas Plastis (*Plastic Limit*), didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi padat, yaitu persentase kadar air dimana tanah dengan diameter silinder 3,2 mm mulai mengalami keretakan saat di gulung. Batas susut (*Shrinkage Limit*), didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah semi padat dan padat, yaitu persentase kadar air dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanahnya (Hardiyatmo, 1992).

2.2 Ukuran Butiran Tanah

Sifat-sifat tanah sangat berpengaruh pada ukuran butirannya. Besar ukuran butiran dijadikan dasar untuk pemberian nama dan klasifikasi tanah. Oleh karenanya, analisis butiran merupakan pengujian yang cukup sering dilakukan. Analisis ukuran butiran tanah adalah penentuan persentase berat butiran pada satu unit saringan, dengan ukuran diameter lubang tertentu. Tanah digolongkan dalam butiran kasar apabila lebih dari 50% tertahan saringan nomor 200, sementara tanah tergolong butiran halus jika lebih dari 50% lolos saringan nomor 200 (Hardiyatmo, 2017).

Distribusi ukuran tanah butiran halus, selain dari yang lolos saringan no. 200 sebanyak lebih dari 50%, juga dapat ditentukan dengan cara sedimentasi melalui alat uji hidrometer seperti yang terlihat pada Gambar 2.2 (a). Metode ini didasarkan pada hukum Stokes, yang berkaitan dengan kecepatan mengendap butiran pada larutan suspensi.



Gambar 2.2 Alat Uji Hidrometer

(a) Hidrometer dan gelas ukur

(b) Posisi hidrometer saat pengendapan berlangsung

Menurut Stokes, kecepatan mengendap butiran dapat ditentukan dari persamaan:

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\mu} D^2 \quad (2.9)$$

Dimana:

v = kecepatan (cm/s)

γ_w = berat volume air (g/cm³)

γ_s = berat volume butiran tanah (g/cm³)

μ = kekentalan air absolut (g.s/cm²)

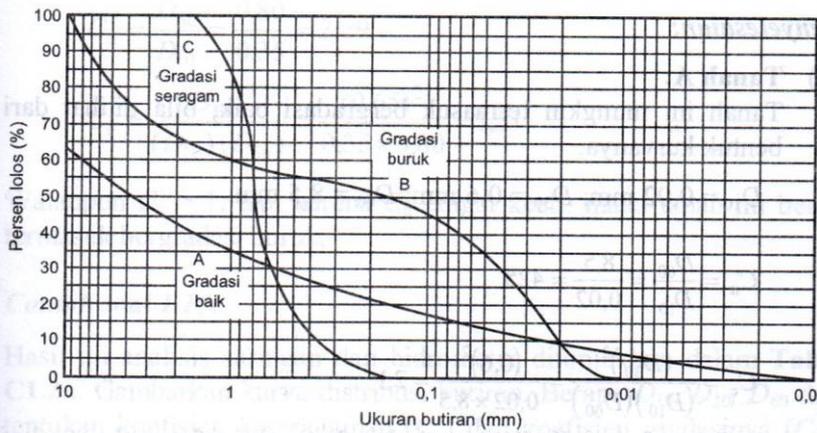
D = diameter butiran tanah (mm)

Pada uji hidrometer, tanah benda uji sebelumnya harus dibebaskan dari zat organik, kemudian tanah dilarutkan ke dalam air destilasi yang dicampur dengan bahan pendeflokulasi agar partikel-partikel menjadi bagian yang terpisah satu sama lain. Kemudian, larutan suspensi ditempatkan pada tabung hidrometer. Dalam uji hidrometer, contoh tanah yang digunakan beratnya kira-kira 50 gram kering oven. Diameter silinder adalah 2,5 in (63,5 mm), tinggi 18 in (457, 2 mm), dan volumenya 1000 ml sesuai dengan Gambar 2.2 (a) (Hardiyatmo, 2017).

Ketika hidrometer dimasukkan dalam larutan suspensi (pada waktu t dihitung dari permulaan sedimentasi), hidrometer ini mengukur berat jenis larutan di sekitar gelembung hidrometer yang berada di kedalaman L sesuai Gambar 2.2 (b). Berat jenis suspensi merupakan fungsi dari jumlah partikel tanah yang ada per volume satuan suspensi pada kedalaman L . Pada waktu t tersebut, partikel-partikel tanah dalam suspensi pada kedalaman L akan berdiameter lebih kecil dari D . Partikel yang lebih besar akan mengendap di luar zona pengukuran. Hidrometer dirancang untuk memberikan jumlah tanah yang masih terdapat dalam suspensi dan dikalibrasikan untuk tanah yang mempunyai berat jenis $G_s = 2,65$. Untuk jenis tanah yang lain maka perlu dikoreksi. Dari uji hidrometer, distribusi ukuran butiran tanah digambarkan dalam kurva semi logaritmik. Ordinat grafik menunjukkan persentase berat butiran yang lebih kecil daripada ukuran butiran yang diberikan dalam absis.

Untuk tanah yang terdiri dari campuran butiran halus dan kasar, dapat menggunakan gabungan antara analisis saringan dan sedimentasi. Dari hasil penggambaran kurva yang diperoleh seperti pada Gambar 2.3, tanah berbutir kasar digolongkan bergradasi baik apabila tidak ada kelebihan butiran pada sembarang ukurannya dan tidak ada yang kurang pada ukuran butiran sedang. Umumnya tanah dikategorikan *well graded* jika distribusi ukuran butiran tanah tersebar luas, *uniform graded* bila jumlah butiran sebagian besar mengelompok

di dalam batas interval diameter butir yang sempit, dan *poor graded* apabila butiran kecil maupun besar ada, tetapi dengan pembagian butiran yang relatif rendah pada ukuran sedang.



Gambar 2.3 Analisis Distribusi Ukuran Butiran

Notasi D10 didefinisikan sebagai 10% dari berat butiran total yang berdiameter kurang dari ukuran butiran tertentu. Sebagai contoh, D10= 0,45 mm artinya 10% dari berat butiran total berdiameter kurang dari 0,45 mm. Ukuran-ukuran yang lain seperti D30 dan D60 didefinisikan dengan cara yang sama. Ukuran D10 disebut sebagai ukuran efektif.

Kemiringan dan bentuk umum dari kurva distribusi butiran digambarkan dengan koefisien keseragaman (Cu), dan koefisien gradasi (Cc) yang diberikan menurut persamaan:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \tag{2.10}$$

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{(D_{60})(D_{10})} \tag{2.11}$$

Tanah bergradasi baik jika mempunyai koefisien gradasi $1 < Cc < 3$ dengan $Cu > 4$ untuk kerikil, dan $Cu > 6$ untuk pasir. Tanah bergradasi sangat baik jika $Cu > 15$.

2.3 Tanah Lempung Lunak

Tanah lempung merupakan agregat partikel berukuran mikroskopik dan submikroskopik yang berasal dari pembusukan kimiawi unsur-unsur penyusun batuan, dan bersifat plastis dalam selang kadar air sedang sampai luas. Dalam keadaan kering, tekstur tanah lempung sangat keras, dan tak mudah terkelupas oleh tangan. Selain itu, permeabilitas lempung sangat rendah (Hakim, 2014). Sifat khas yang dimiliki oleh tanah lempung adalah dalam keadaan kering akan bersifat keras, dan jika basah akan bersifat lunak plastis, kohesif, mengembang dan menyusut dengan cepat, sehingga mempunyai perubahan volume yang besar.

Tanah lempung terdiri dari sekumpulan partikel-partikel mineral lempung dan pada intinya adalah hidrat aluminium silikat yang mengandung ion-ion Mg, K, Ca, Na dan Fe. Mineral-mineral lempung digolongkan ke dalam empat golongan, yaitu *kaolinit*, *montmorillonit*, *illit* dan *chlorite*. Mineral-mineral lempung ini merupakan produk pelapukan batuan yang terbentuk dari penguraian kimiawi mineral-mineral silikat lainnya dan selanjutnya terangkut ke lokasi pengendapan.

Menurut Hardiyatmo (2017), tanah lempung lunak mempunyai karakteristik yang khusus diantaranya kemampuan yang tinggi, indeks plastisitas yang tinggi, kadar air yang relatif tinggi, dan mempunyai kuat geser yang kecil. Sifat-sifat yang dimiliki tanah lempung secara umum adalah sebagai berikut:

- a. Ukuran butir halus, ($<0,002$ mm).
- b. Permeabilitas rendah.
- c. Kenaikan air kapiler tinggi.
- d. Bersifat kohesif.
- e. Bersifat ekspansif (kadar kembang susut yang tinggi).

Pada tanah lunak, semakin muda umur akumulasinya, semakin tinggi pula letak muka airnya. Lapisan muda ini juga kurang mengalami pembebanan sehingga sifat mekanisnya buruk dan tidak mampu menahan beban. Apabila kuat gesernya kecil, koefisien permeabilitas yang kecil serta kemampuan yang besar, maka dapat dikatakan bahwa tanah tersebut adalah tanah lunak. Sehingga, apabila pembebanan konstruksi melampaui daya dukung kritisnya maka besarnya penurunan akan meningkat dan dalam jangka waktu tertentu konstruksi akan mengalami keruntuhan.

Suatu struktur bangunan karena alasan-alasan teknis, ekonomi, atau sosial, terpaksa harus didirikan di atas tanah lunak, maka biasanya ada dua masalah geoteknik yang harus diatasi yaitu daya dukung yang rendah dan penurunan yang relatif besar. Walaupun pondasi dalam dapat mengatasi kedua masalah tersebut, penyelesaian ini menjadi tidak ekonomis bila konstruksi berdiri di atas daerah yang panjang dan luas, misalnya kompleks perumahan, landasan pacu pesawat, pabrik, tangki-tangki di kilang minyak, dan proyek reklamasi. Teknik pra-pembebanan merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengatasi masalah tersebut. Pra-pembebanan adalah suatu proses pemampatan tanah pondasi dengan jalan pemberian pembebanan sementara sebelum konstruksi yang sesungguhnya didirikan.

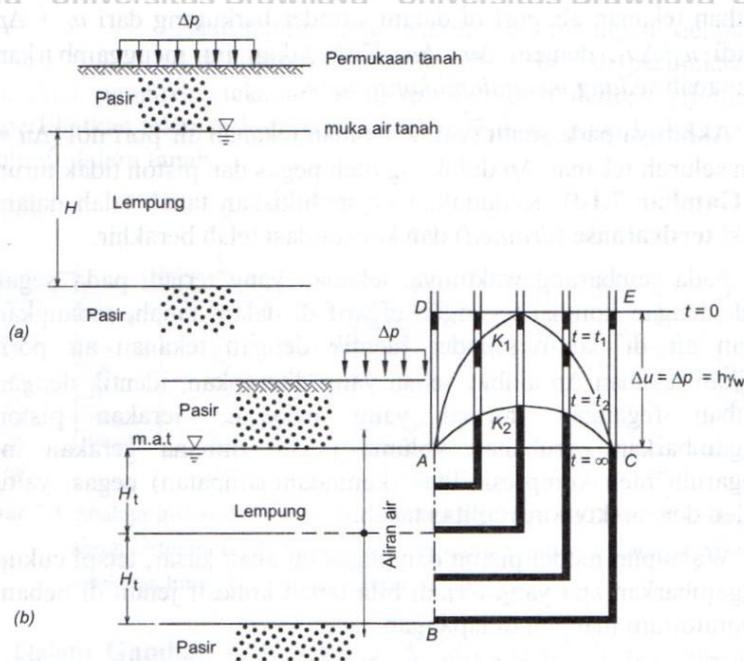
Proses konsolidasi akan semakin cepat terjadi dengan menggunakan metode pra-

pembebanan yang dikombinasikan dengan pemasangan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD). PVD adalah sistem drainase buatan yang dipasang vertikal di dalam lapisan tanah lunak. Sistem drainase vertikal ini mempunyai bentuk berupa sabuk berpenampang persegi panjang, terdiri dari bagian luar berupa penyaring yang terbuat dari bahan sintetik seperti *geotextile* atau kertas dan bagian dalam yang berfungsi sebagai media aliran air yang terbuat dari plastik. Kombinasi sistem ini bertujuan untuk memperpendek waktu perbaikan lapisan tanah lempung yang cukup tebal karena dengan penggunaan PVD akan menyebabkan terjadinya aliran air pori arah horizontal selain aliran arah vertikal yang menyebabkan air pori dapat dikeluarkan dengan lebih cepat.

2.4 Konsolidasi dan Penurunan

Menurut Hardiyatmo (2018), konsolidasi adalah proses berkurangnya volume atau berkurangnya rongga pori dari tanah lunak akibat pembebanan, dimana prosesnya dipengaruhi oleh kecepatan terperasnya air pori keluar dari rongga pori tanah. Proses konsolidasi dapat diamati dengan pemasangan piezometer untuk mencatat perubahan tekanan air pori dengan waktunya. Besarnya penurunan dapat diukur dengan berpedoman pada titik referensi ketinggian di tempat tertentu.

Contoh nyata konsolidasi di lapangan dicontohkan oleh Peck et al. (1974) dalam Hardiyatmo (2018). Diperlihatkan suatu pondasi yang sangat lebar dibangun di atas tanah lempung jenuh yang diapit oleh lapisan tanah pasir dengan tinggi muka air tanah di permukaan lapisan lempung yang berbatasan dengan pasir di sebelah atas seperti terlihat pada Gambar 2.4 (a) berikut ini.



Gambar 2.4 Reaksi Tekanan Air Pori Saat Terjadi Konsolidasi

- (a) Pondasi sangat lebar pada tanah lempung lunak
- (b) Diagram perubahan tekanan air pori terhadap waktu

Pada pondasi yang sangat lebar, tekanan akibat pondasi ke seluruh kedalaman tanah sama dengan tekanan di dasar pondasi. Oleh karena itu, segera setelah pembebanan seluruh kedalaman lapisan lempung mengalami kenaikan tegangan yang sama. Air pori di dalam lapisan lempung ini dianggap dapat mengalir dengan baik ke lapisan pasir dan arah aliran air hanya ke atas dan ke bawah saja. Jalannya proses konsolidasi diamati lewat piezometer yang ditanam sepanjang kedalaman tanah lempung. Tinggi air dalam piezometer menyatakan nilai kelebihan tekanan air pori di lokasi piezometer tersebut dipasang. Akibat tambahan tekanan Δp , yang terjadi segera setelah beban bekerja, tinggi tekanpn air atau tinggi air dalam saluran piezometer naik sebesar $h = \Delta p / \gamma_w$ yang dinyatakan oleh garis DE.

Garis DE menyatakan distribusi kelebihan tekanan air pori awal. Dalam waktu tertentu, tekanan air pori pada lapisan yang lebih dekat dengan lapisan pasir lebih dulu berkurang sementara tekanan air pori lapisan lempung di bagian tengah masih konstan. Kedudukan ini digambarkan oleh kurva K1. Dalam tahapan waktu sesudahnya, ketinggian air dalam saluran piezometer ini ditunjukkan oleh gambar kurva K2. Setelah waktu yang cukup lama ($t = \text{tak hingga}$), tinggi air dalam pipa piezometer kembali sama dengan kedudukan muka air tanah awal saat sebelum pembebanan (garis AC). Kedudukan garis AC ini menunjukkan proses konsolidasi telah selesai, yaitu ketika kelebihan tekanan air pori (Δu) mencapai nilai nol.

Pada awalnya, setiap kenaikan beban dilawan sepenuhnya oleh tekanan air pori, yaitu berupa kelebihan tekanan air pori (Δu) yang besarnya sama dengan Δp . Dalam kondisi demikian, tidak ada perubahan tegangan efektif di dalam tanah. Setelah air pori sedikit demi sedikit keluar dari rongga pori tanah lunak, secara perlahan tanah mulai mampat dan beban ditransfer menuju butiran tanah sehingga tegangan efektif bertambah. Pada akhirnya, kelebihan air pori menjadi nol ($\Delta u = 0$), atau penurunan konsolidasi primer selesai. Pada saat ini, tekanan air pori sama dengan tekanan hidrostatik yang sesuai dengan ketinggian muka air tanah di atas atau di bawah tanah mampat yang dimana penurunan konsolidasi primer selesai. Lalu, bila tebal lempung (H) sangat lebih kecil dibandingkan dengan lebar pondasi ($B/H = \text{tak hingga}$), maka perubahan volume tanah akibat konsolidasi akan ke arah vertikal saja; dengan kata lain konsolidasi terjadi dalam satu dimensi. Dalam kondisi ini, kenaikan air pori awal pada sembarang titik di dalam tanah $\Delta u = \Delta p$, yaitu sama dengan tegangan akibat beban yang bekerja di permukaan tanah (Hardiyatmo, 2018).

Konsolidasi terbagi menjadi dua macam, diantaranya adalah *normally consolidated* dan *overconsolidated*. Lapisan tanah lempung biasanya terjadi dari proses sedimentasi atau pengendapan. Selama proses pengendapan, lempung mengalami konsolidasi atau penurunan akibat tekanan tanah yang berada di atasnya. Lapisan-lapisan tanah yang berada di atas ini, suatu saat bisa saja hilang akibat proses alam. Hal ini berarti tanah lapisan bagian bawah pernah mengalami konsolidasi akibat tekanan yang lebih besar dari tekanan yang bekerja di waktu sekarang. Tanah semacam ini disebut dalam kondisi *overconsolidated* (OC) atau terkonsolidasi berlebihan. Di sisi lain, jika tegangan efektif yang bekerja pada suatu titik di dalam tanah pada waktu sekarang merupakan tekanan maksimumnya, atau tanah tidak pernah mengalami tekanan yang lebih besar dari tekanan pada waktu sekarang, maka tanah termasuk dalam kondisi *normally consolidated* atau terkonsolidasi normal (Hardiyatmo, 2018).

2.5 Interpretasi Hasil Uji Konsolidasi

2.5.1 Koefisien Pemampatan (a_v) dan Koefisien Perubahan Volume (m_v)

Koefisien pemampatan (a_v) adalah koefisien yang menyatakan kemiringan kurva $e-p'$ seperti pada Gambar 2.5. Jika tanah dengan volume V_1 mampat sehingga volumenya menjadi V_2 dan mampatnya tanah dianggap hanya sebagai pengurangan rongga pori, maka perubahan volume hanya dalam arah vertikal sebagai berikut:

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta p} = \frac{e_1 - e_2}{p_2' - p_1'} \quad \text{dan} \quad m_v = \frac{a_v}{1 + e_1} \quad (2.12)$$

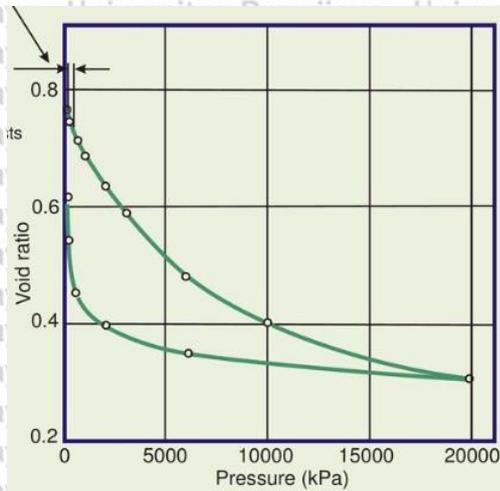
Dengan:

e_1 = angka pori pada tegangan p_1'

e_2 = angka pori pada tegangan p_2'

v_1 = volume pada tegangan p_1'

v_2 = volume pada tegangan p_2'



Gambar 2.5 Kurva e-p'

2.5.2 Indeks Pemampatan (C_c)

Indeks pemampatan atau indeks kompresi adalah kemiringan dari bagian lurus grafik

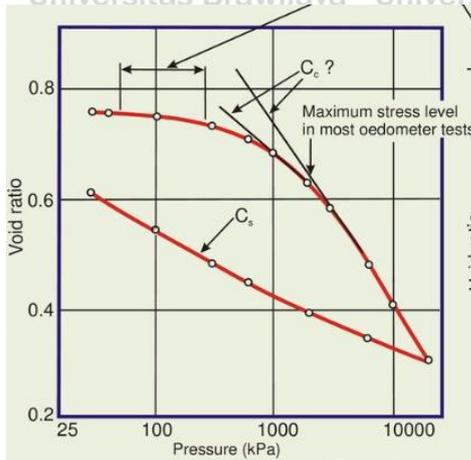
$e - \log p'$ seperti pada Gambar 2.6 yang dinyatakan oleh persamaan:

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log p'} = \frac{e_1 - e_2}{\log \left(\frac{p_2'}{p_1'} \right)} \quad (2.13)$$

2.5.3 Indeks Pemampatan Kembali (C_r)

Indeks pemampatan kembali adalah kemiringan dari kurva pelepasan beban dan pembebanan kembali pada grafik $e - \log p'$ yang dinyatakan oleh persamaan:

$$C_r = \frac{1}{5} \text{ sampai } \frac{1}{10} C_c \quad (2.14)$$



Gambar 2.6 Kurva e-log p'

2.5.4 Penurunan Konsolidasi Menggunakan Cr dan Cc

Persamaan penurunan konsolidasi total dengan menggunakan grafik e-log p' dapat dilakukan bila $\Delta H = S_c$, maka dapat dibuat persamaan:

$$S_c = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} H = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H \tag{2.15}$$

Untuk tanah lempung *normally consolidated* (NC),

$$S_c = C_c \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{p_1'}{p_0'} \tag{2.16}$$

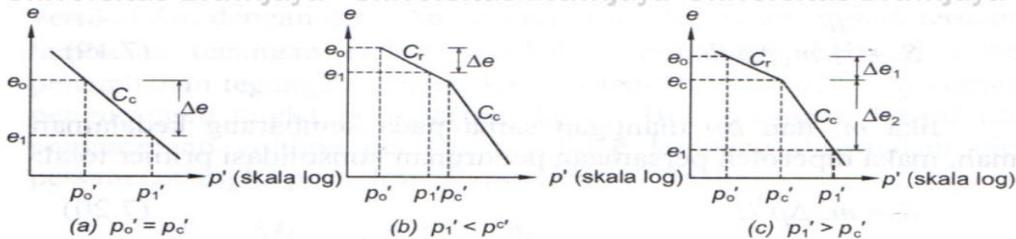
Untuk tanah lempung *overconsolidated* (OC),

(1) Bila $p_1' < p_c'$

$$S_c = C_r \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{p_1'}{p_0'} \tag{2.17}$$

(2) Bila $p_1' > p_c'$

$$S_c = C_r \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{p_c'}{p_0'} + C_c \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{p_1'}{p_c'} \tag{2.18}$$



Gambar 2.7 Grafik e-log p' pada:

(a) Tanah *normally consolidated*

(b) dan (c) Tanah *overconsolidated*



2.5.5 Derajat Penurunan Konsolidasi (U)

Pada elemen tanah yang dalamnya z, perkembangan proses konsolidasi akibat kenaikan tegangan tertentu dinyatakan dengan persamaan:

$$U = \frac{e_0 - e}{e_0 - e_1} = \frac{p' - p_0'}{p_1' - p_0'} = 1 - \frac{u}{u_i} \tag{2.19}$$

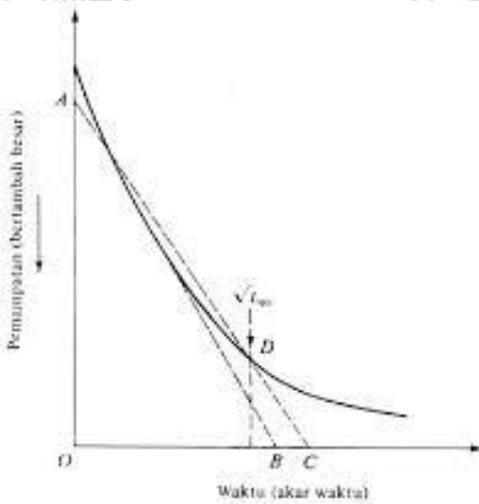
2.5.6 Koefisien Konsolidasi (Cv)

Dalam teori konsolidasi satu dimensi, koefisien konsolidasi didapat dengan persamaan:

$$Cv = \frac{k}{\gamma_w \alpha m v} = \frac{T_v(H)^2}{t} \tag{2.20}$$

Cv didapat dari waktu untuk mencapai konsolidasi primer 90% (t₉₀) pada grafik akar waktu Taylor.

$$Cv = \frac{0,848(H)^2}{t_{90}} \tag{2.21}$$



Gambar 2.8 Metode Akar Waktu Taylor

2.6 Prefabricated Vertical Drain (PVD)

Pre-fabricated Vertical Drain (PVD) adalah produk berbentuk pita (potongan melintang segiempat) yang terdiri atas material penyaring geotekstil yang membungkus inti plastik. Ukuran PVD adalah 10 cm lebar dengan ketebalan antara 3 – 4 cm (Bo et al., 2003).

Material dibentuk dari inti plastik yang berguna untuk mengalirkan air yang terjebak pada saringan geotekstil (Schaefer, 1997).



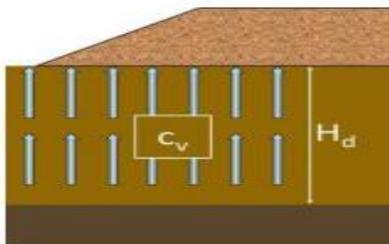


Gambar 2.9 Prefabricated Vertical Drain (PVD)
(Sumber: PT. Teknindo Geosistem Unggul, 2015)

p

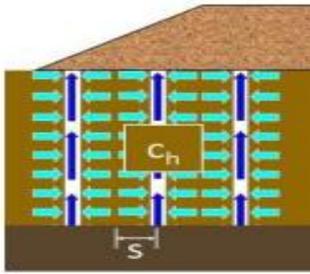
Pre-fabricated Vertical Drain (PVD) merupakan salah satu produk geosintetik yang berfungsi sebagai pengalir air (*drainage*). PVD terdiri dari 2 bagian yaitu *core*/inti yang berfungsi untuk mempermudah air pori mengalir dari bawah ke atas dan *jacket*/filter yang berfungsi untuk melindungi dan menyaring material agar tidak bercampur dengan air pori. Selanjutnya, air pori tersebut masuk ke dalam celah-celah inti PVD dan air pori dialirkan keluar dari tanah yang nantinya diteruskan oleh pori-pori dari material timbunan.

PVD dapat mempercepat waktu konsolidasi karena dapat memperpendek jarak pengaliran air pori. Sebelum pemasangan PVD, air pori mengalir ke arah vertikal sesuai dengan besarnya koefisien konsolidasi vertikal (C_v) sepanjang tebal lapisan tanah lunak (H_d). Waktu konsolidasi (t) ditentukan oleh besarnya kuadrat dari tebal lapisan tanah lunak (H_d) dibagi dengan koefisien konsolidasi vertikal (C_v) seperti pada Gambar 2.10.



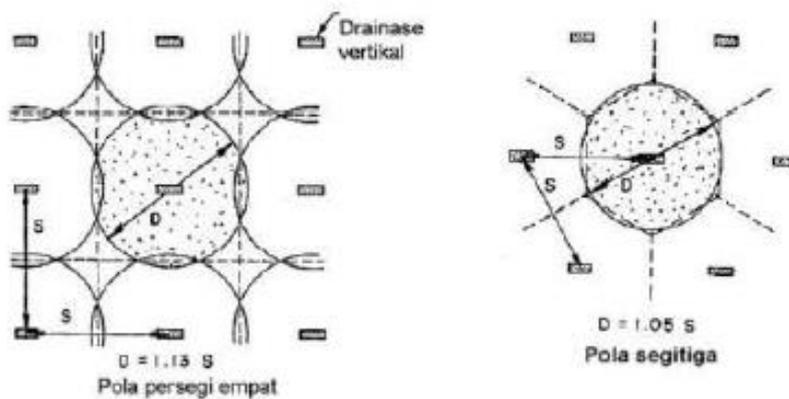
Gambar 2.10 Proses Konsolidasi Tanpa PVD

Apabila digunakan PVD, waktu konsolidasi tanah lempung lunak diilustrasikan seperti pada Gambar 2.11. Air pori mengalir ke arah horisontal sesuai dengan besarnya koefisien konsolidasi horisontal (C_h) sepanjang setengah dari jarak pemasangan PVD (s).



Gambar 2.11 Proses Konsolidasi Dengan PVD

Cara kerja dari metode PVD ini adalah dengan mempermudah dalam mengalirkan air dan udara yang berada pada lapisan tanah lunak pada kedalaman yang sulit untuk air dan udara tersebut keluar dalam waktu yang singkat secara vertikal.



Gambar 2.12 Pola Pemasangan PVD

(Sumber: Das, 2011)

Terzaghi (1943) menyarankan untuk memilih jarak pola PVD tertentu sehingga 90% dari konsolidasi total telah dicapai selama pembangunan tanah timbunan. Hubungan antara jarak drainase vertikal (s) dengan diameter pengaruh drainase (D) adalah sebesar $D = 1,13s$ untuk pola segiempat dan $D = 1,05s$ untuk pola segitiga seperti pada Gambar 2.12 diatas.

PVD yang berbentuk persegi diasumsikan dengan diameter ekuivalen PVD (d_w) sebagai diameter lingkaran. Untuk kondisi umum, d_w dapat diasumsikan tidak terpengaruh oleh kondisi bawah permukaan akibat pemasangan dan sifat-sifat tanah sehingga hanya merupakan fungsi dari bentuk (konfigurasi) dan geometri *drain*. Untuk desain diameter ekuivalen dapat dihitung sebagai berikut:

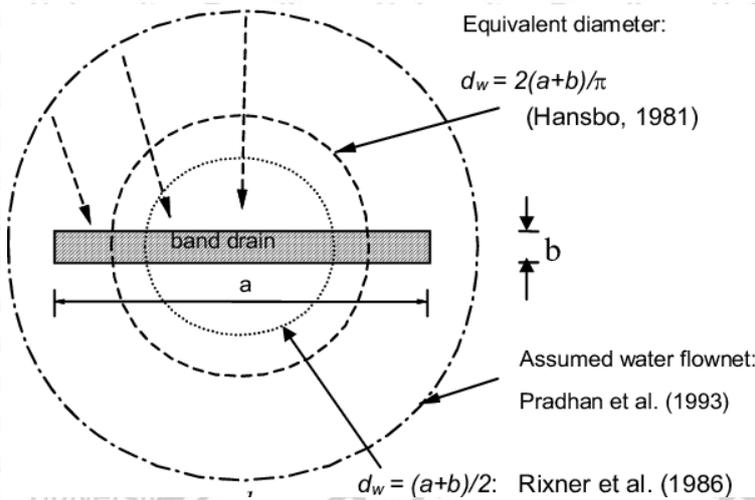
$$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi} \quad (2.22)$$

dimana :

a = Lebar Penampang PVD

b

= Tebal Penampang PVD



Gambar 2.13 Equivalent Diameter (d_w) untuk PVD

(Sumber: Indraratna, 2002)

Menurut Ariza (2014), salah satu hal yang harus dipertimbangkan adalah pengaruh dari gangguan tanah pada zona di sekitar PVD, yang disebut juga dengan zona pengotoran (*smear zone*). Konsolidasi dapat mengalami gangguan dari tanah akibat rusaknya struktur atau susunan lempung selama proses instalasi PVD di lapangan dengan bantuan mandrel. Gangguan tanah ini disebut juga *smear* yang mengakibatkan berkurangnya koefisien permeabilitas arah horizontal (k_h). Oleh karena itu, untuk menentukan derajat konsolidasi radial (U_h) dengan mempertimbangkan *smear zone*, maka persamaan derajat konsolidasi U_h adalah:

$$U_h = 1 - \exp\left(\frac{-8Th}{m}\right); \quad (2.23)$$

$$\text{dan } m = \frac{n^2}{n^2 - S^2} \ln\left(\frac{n}{S}\right) - 0,75 + \frac{S^2}{4n^2} + \frac{kh}{ks} \left(\frac{n^2 - S^2}{n^2}\right) \ln S \quad (2.24)$$

Carillo (1942) mengusulkan persamaan untuk mendapatkan derajat konsolidasi rata-rata untuk aliran air vertikal dan aliran air radial (U_h), yang dapat dihitung dengan persamaan:

$$U = 1 - [(1-U_v) \cdot (1-U_h)] \times 100\% \quad (2.25)$$

Sementara itu, faktor waktu yang digunakan untuk drainase vertikal (T_v) dan drainase radial adalah sebagai berikut.

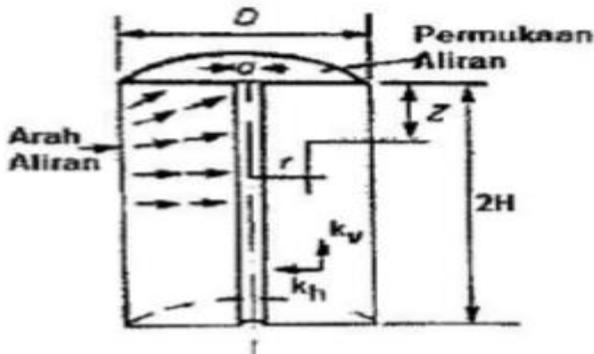
$$T_v = \left(\frac{c_v t}{H^2}\right) \text{ dan } T_h = \left(\frac{Ch t}{4D^2}\right) \quad (2.26)$$



Fungsi PVD pada pekerjaan perbaikan tanah lempung lunak adalah sebagai berikut:

- Gangguan pada tanah yang diakibatkan saat pemasangan lebih kecil.
- Waktu yang dibutuhkan saat kontrol kualitas lebih cepat.
- Kualitas PVD cenderung seragam.
- Tahan terhadap deformasi besar tanpa terlalu banyak kehilangan fungsi drainase.
- Kontaminasi butiran halus pada tanah asli jauh lebih kecil.
- Pemasangan lebih cepat dan ekonomis.

Teori konsolidasi akibat aliran air pori dalam arah horizontal menuju vertikal drain didasarkan kepada asumsi bahwa setiap *vertical drain* mempunyai daerah pengaruh yang berbentuk silinder dengan panjang yang sama dengan panjang *vertical drain* itu sendiri sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.14. Dalam proses pemasangan, PVD dapat dipasang dengan konfigurasi bentuk pemasangan segitiga ataupun segiempat tergantung kondisi dan kebutuhan di lapangan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12. Lama waktu konsolidasi dalam perencanaan *vertical drain* sangat tergantung pada parameter tanah, terutama sekali nilai Ch . Biasanya nilai Ch ini diambil dengan didasarkan pada nilai C_v . Sebagai pedoman, dapat digunakan perbandingan nilai $\frac{Ch}{C_v}$ yang disarankan oleh Jamiolkowski et al (1983) dan diperlihatkan pada Tabel 2.2.



Gambar 2.14 Daerah Pengaruh *Vertical Drain*

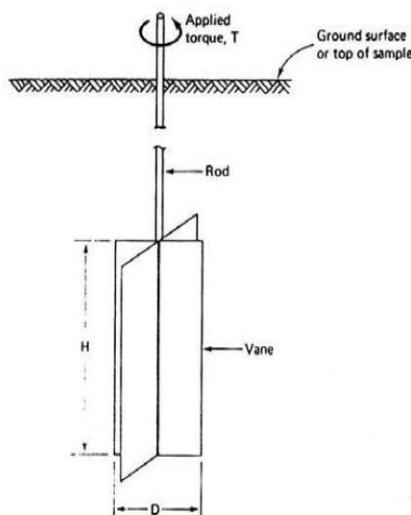
Tabel 2.2 Perbandingan Nilai $\frac{Ch}{C_v}$

Sifat lapisan tanah lempung	$\frac{Ch}{C_v}$
Relatif homogen (hampir tidak ada lapisan permeabel)	1 – 1,5
Lempung endapan (terdapat lapisan pasir yang tidak kontinu)	2 – 4

Lempung berlapis (<i>varved clay</i>) atau lempung dengan lapisan pasir yang lebih kurang kontinu	3-15
---	------

2.7 Uji *Vane Shear*

Menurut Hardiyatmo (2017), selain uji kuat tekan bebas (*unconfined*), uji *vane shear* dapat digunakan untuk mengevaluasi kuat geser tidak terdrainase (*undrained*) baik di laboratorium maupun di lapangan pada lempung lunak jenuh air. Pengujian ini sangat cocok untuk tanah lempung lunak yang kuat gesernya dapat berubah oleh penanganan sewaktu *sampling*. Harga kekuatan geser tanah kondisi tidak terdrainase (*undrained*) yang didapat dengan alat *vane shear* juga tergantung kepada kecepatan pemutaran momen torsi. Uji ini terdiri atas proses pemasukan baling ke dalam lempung dan pemutaran alat pemuntir pada sumbu vertikal, sesuai dengan standar SNI 06-2487 atau ASTM D 2573. Alat *vane shear* biasanya terdiri dari empat pelat baja tipis dengan dimensi yang sama yang dilaskan ke sebuah batang putar seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.15



Gambar 2.15 Alat Uji *Vane Shear*

Kipas dan batangnya ditekan kedalam tanah lempung di bawah dasar dari lubang bor pada kedalaman paling sedikit 3 kali diameter lubang bor. Uji *vane shear* juga dapat diterapkan pada lempung lunak tanpa lubang bor, dengan penembusan kipas langsung ke dalam tanah. Dalam hal ini, bahan pelindung diperlukan untuk melindungi baling-baling selama proses penembusan. Putaran dikerjakan berangsur-angsur pada ujung puncak batangnya dengan peralatan tertentu sampai lempung tergeser akibat rotasi dari kipasnya. Kecepatan rotasi harus dalam interval 6 derajat sampai 12 derajat per menit. Jika diinginkan hubungan antara tenaga puntiran dan rotasi dapat dicatat selama pengujian. Kuat geser tidak terdrainase (*undrained*) dapat ditentukan dari persamaan:

$$Su = 1000 \left(\frac{T}{\pi \left(\frac{D^2 H}{2} + \frac{D^3}{6} \right)} \right) \quad (2.29)$$

Keterangan:

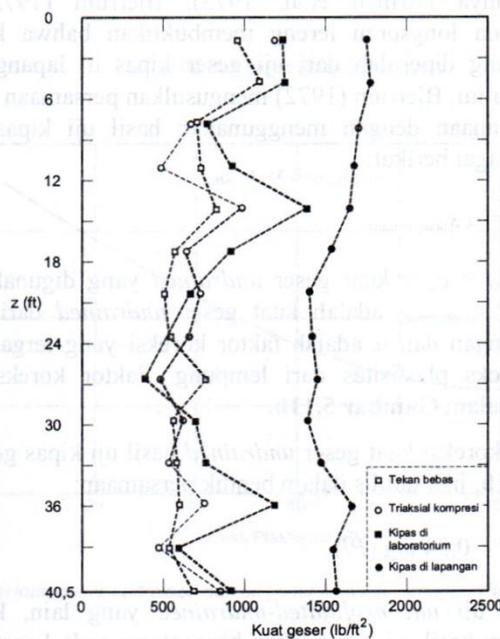
Su : kuat geser *undrained* (kg/m²)

T : Bacaan torsi maksimum (kgm)

D : Diameter *vane* (m)

H : Tinggi *vane* (m)

Studi yang mendetail dalam menentukan hubungan kuat geser *undrained* yang dimana hasil uji diperoleh dari uji *vane shear* di laboratorium dan di lapangan, uji triaksial kondisi *undrained*, dan uji *unconfined*, telah dilakukan oleh Arman et.al (1975) dalam Hardiyatmo (2017) pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Hubungan Kedalaman dan Kuat Geser Undrained dari Berbagai Tipe Pengujian (Arman et al., 1975)

Disini dapat dilihat bahwa kuat geser *undrained* yang diperoleh dari uji *vane shear* di lapangan lebih besar daripada kuat geser *undrained* yang diperoleh dari pengujian-pengujian yang lain. Hal ini disebabkan oleh zona geser terjadi di luar bidang kegagalan dari kipas (Gambar 2.17(a)). Perluasan bidang kegagalan tergantung dari tipe dan kohesi tanahnya. Bjerrum (1972), dalam penelitian pada longsor lereng membuktikan bahwa kuat geser *undrained* yang diperoleh dari uji geser kipas di lapangan terlalu tinggi, Karenanya, beliau

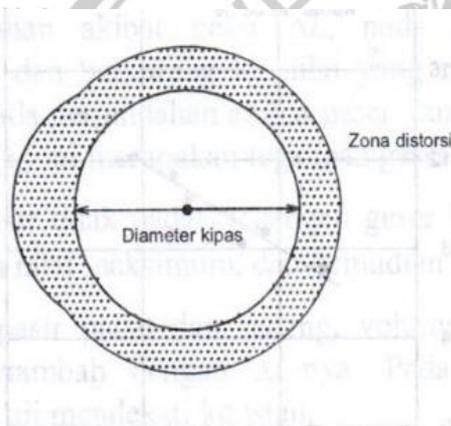
mengusulkan persamaan kuat geser untuk perencanaan dengan menggunakan hasil uji kipas geser di lapangan, yaitu:

$$S_u \text{ (nyata)} = \alpha \times S_u \text{ (lapangan)} \quad (2.30)$$

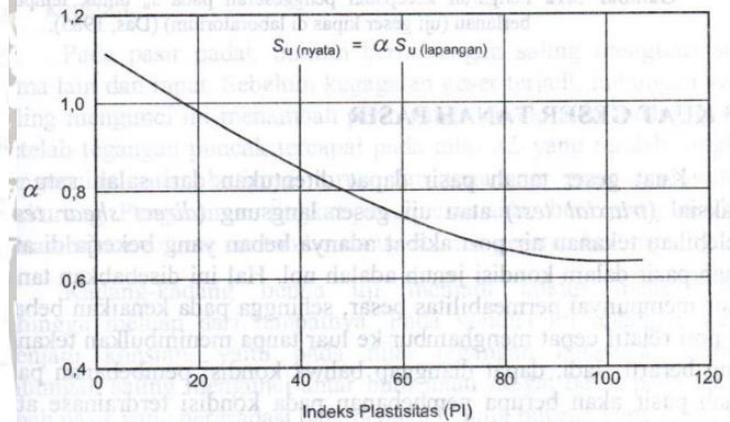
Dengan $S_u \text{ (nyata)} = c_u$ = kuat geser *undrained* yang digunakan dalam perencanaan, $S_u \text{ (lapangan)}$ adalah kuat geser *undrained* dari uji geser kipas di lapangan dan α adalah faktor koreksi yang tergantung pada besarnya indeks plastisitas lempung. Faktor koreksi tersebut ditunjukkan dalam Gambar 2.17 (b).

Kurva koreksi kuat geser *undrained* hasil uji *vane shear* dalam Gambar 2.17 (b), jika ditulis dalam persamaan menjadi:

$$\alpha = 1,7 - 0,54 \log (\pi) \quad (2.31)$$



a) Zona distorsi pada uji kipas geser.



b) Koreksi kuat geser *undrained* dari uji geser kipas di lapangan (Bjerrum, 1972).

Gambar 2.17 Zona Distorsi dan Koreksi Kuat Geser Undrained dari Uji Vane Shear

2.8 Analisis Prosedur Observasi Asaoka

Metode Asaoka (1978) merupakan metode observasi yang selain dapat memprediksi penurunan akhir juga dapat memungkinkan diperolehnya parameter-parameter konsolidasi yang lebih akurat. Umumnya analisis penurunan tanah memerlukan data lapangan dan data laboratorium seperti data koefisien konsolidasi, tekanan air pori, panjang aliran air, dan regangan maksimum tanah. Tetapi dengan menggunakan metode Asaoka, kebutuhan akan data-data tanah tidak diperlukan dan hasil yang diperoleh pun cukup diandalkan. Metode Asaoka ini merupakan suatu alat bantu untuk memprediksi penurunan tanah dengan menggunakan metode *curve fitting*. Pada prosedur observasi Asaoka, hubungan antara

penurunan tanah dan waktu diturunkan melalui persamaan diferensial berdasarkan persamaan dasar konsolidasi dalam publikasi oleh Nawir (2012), yaitu:

$$e = C_v \varepsilon_{zz} \quad (2.32)$$

Dimana:

$e(t,z)$ = regangan vertikal (regangan volum)

$t(\geq 0)$ = waktu

z = kedalaman dari bagian atas lapisan lempung

c_v = koefisien konsolidasi

Walaupun nilai permeabilitas dan koefisien kompresibilitas bervariasi terhadap waktu, persamaan diatas tetap efektif ketika nilai c_v konstan (Mikasa, 1963). Persamaan dasar konsolidasi ini dipilih oleh Asaoka (1978) untuk diturunkan menjadi persamaan diferensial linier biasa karena lebih sederhana daripada persamaan konsolidasi Terzaghi.

Persamaan akhir untuk menentukan nilai penurunan pada interval waktu ke- j dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\rho_j = \frac{\beta_0}{1-\beta_1} - \left\{ \frac{\beta_0}{1-\beta_1} - \rho_0 \right\} (\beta_1)^j \quad (2.33)$$

Dimana ρ_j adalah besarnya penurunan tanah pada waktu $t = t_j$, lalu koefisien β_0 dan β_s ($s = 1, 2, \dots, n$) adalah parameter yang tidak diketahui.

Pengukuran data penurunan tanah di lapangan dilakukan dengan menggunakan instrumen *settlement plate*. Untuk memperoleh prediksi penurunan akhir tanah, maka data-data penurunan ini harus dipilih, sehingga diperoleh nilai penurunan $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$ dengan interval waktu Δt yang konstan seperti dilihat pada Gambar 2.18. Kemudian nilai ρ_n (sumbu-y) dan nilai ρ_{n-1} (sumbu-x) diplot sehingga akan diperoleh titik-titik yang membentuk garis lurus, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.19. β_0 adalah waktu titik plot pertama dari regresi linear ρ_n dan ρ_{n-1} . Penurunan akhir (ρ_f) adalah titik pertemuan antara garis $\rho_n = \rho_{n-1}$ (bersudut 45°) dengan *trendline* dari garis ρ_n vs ρ_{n-1} sebenarnya. Setelah diperoleh penurunan akhir (ρ_f) maka dapat dicari nilai β_1 yang merupakan kemiringan dari garis ρ_n vs ρ_{n-1} sebenarnya, yang memberikan hubungan:

$$\beta_1 = \frac{\rho_f - \beta_0}{\rho_f} \quad (2.34)$$

Berdasarkan metode Asaoka, dapat diperoleh koreksi nilai koefisien konsolidasi arah vertikal (C_v) dan koefisien konsolidasi arah radial/horizontal (C_h). Nilai koreksi koefisien konsolidasi ini berguna untuk mengetahui kecepatan penurunan konsolidasi pada suatu

lapisan tanah lempung yang telah diberi perbaikan tanah berupa timbunan dan PVD. Dengan adanya *vertical drain*, maka disipasi tekanan air pori akan dominan terjadi dalam arah radial/horizontal. Dengan demikian, koreksi koefisien konsolidasi hanya dilakukan untuk parameter konsolidasi horizontal (C_h) saja, yang diberikan melalui persamaan berikut (Hausmann, 1990):

dan penurunan pada waktu t dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\frac{-\ln \beta_1}{\Delta t} = \frac{8Ch'}{dw^2 F(n)} + \frac{\pi^2 C_v}{4H^2} \quad (2.35)$$

$$\frac{S_t}{S_f} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp \left[- \left(\frac{8Ch'}{dw^2 F(n)} + \frac{\pi^2 C_v}{4H^2} \right) t \right] \quad (2.36)$$

dimana:

c_v = koefisien konsolidasi arah vertikal

H = tebal lapisan tanah yang terkonsolidasi

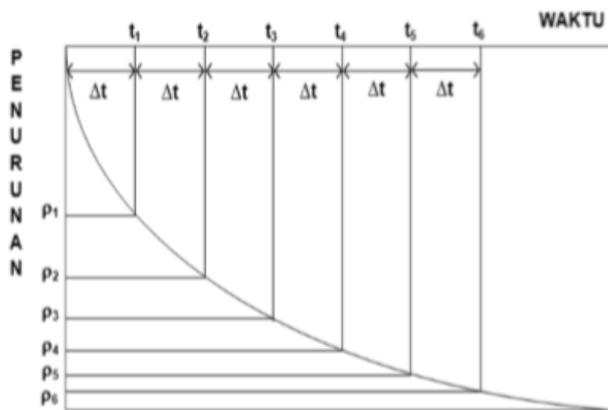
β_1 = kemiringan kurva p_n vs $p_n - 1$

Δt = selang waktu dalam pengamatan penurunan

ch' = koefisien konsolidasi arah radial/horizontal koreksi

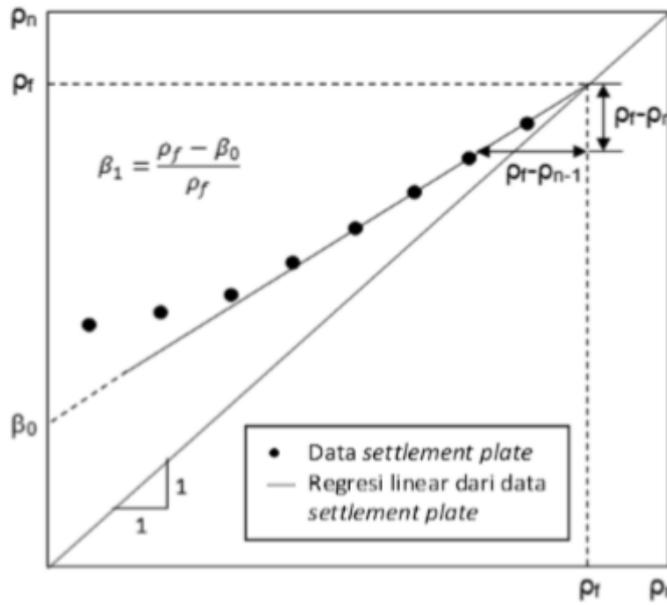
dw = diameter daerah pengaruh PVD

$F(n)$ = fungsi n terhadap waktu akibat PVD



Gambar 2.18 Prosedur Analisis Data Penurunan Dengan Interval Waktu Yang Konstan (Sumber: Magnan dan Deroy, 1980)





Gambar 2.19 Prediksi Penurunan Akhir Dengan Metode Asaoka
 (Sumber: Magnan dan Deroy, 1980)



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Waktu : Februari 2020 sampai dengan Juni 2020

Tempat : Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

3.2 Rencana Penelitian

Penelitian akan dilakukan melalui tiga tahapan, yaitu pekerjaan persiapan, observasi lapangan dan eksperimen laboratorium. Perencanaan penelitian sangat penting agar pelaksanaan penelitian dapat berjalan dengan lancar sehingga didapatkan hasil yang memuaskan dan tepat waktu.

3.3 Persiapan

Tahap persiapan merupakan pekerjaan awal sebagai rangkaian pelaksanaan. Tahap pelaksanaan meliputi studi pendahuluan yaitu dengan mencari referensi baik media cetak atau elektronik mengenai kondisi daerah yang akan ditinjau, berkonsultasi dengan beberapa narasumber seperti kepala dosen, warga sekitar, maupun kepada pihak yang akan menangani pembangunan di daerah tersebut, dan koordinasi untuk pekerjaan lapangan kepada warga sekitar serta pihak Jasa Marga. Lalu, mengajukan proposal ke PT. Geosistem selaku pemilik PVD yang dijadikan alat uji, dan pekerjaan laboratorium kepada pengurus laboratorium Mekanika Tanah Universitas Brawijaya.

3.4 Pekerjaan Lapangan

Pekerjaan lapangan yang dilakukan adalah pengambilan sampel tanah. Sampel tanah yang diambil adalah tanah lunak dari daerah Jalan Tol Pasuruan-Probolinggo, dengan cara pengambilan terganggu (*disturbed soil*).

3.5 Pekerjaan Laboratorium

3.5.1 Percobaan Penelitian

Percobaan yang dilakukan dalam penelitian ini diantaranya:

- a. Uji Konsolidasi (SNI 2812: 2011)
- b. Uji Kadar Air dan Kadar Organik (ASTM D2216-92 (1996) dan ASTM D4427-84 (1989))
- c. Uji *Grain Size* (ASTM D1140-17 (2017))

3.5.2 Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada penelitian ini hanya berasal dari data primer yang didapatkan dari penelitian yang dilakukan di laboratorium.

3.6 Metode Pengujian

Berikut adalah urutan metode pengujian tanah, antara lain:

1. *Disturbed soil* yang sudah diambil kemudian dikeringkan selama 24 jam di bawah sinar matahari dan dihancurkan menjadi bongkahan tanah yang lebih kecil dengan cara manual (tenaga manusia) menggunakan pacul dan sekop.
2. Bongkahan tanah yang sudah kering selanjutnya diubah menjadi *slurry* (lumpur) tanah dengan mencampurkan air dan tanah sebanyak berat yang dibutuhkan untuk mencapai kadar air tertentu berdasarkan hubungan antara kadar air dengan berat air dan berat total, dimana berat air yang diperlukan sebanding dengan kadar air target dikalikan dengan berat tanah yaitu:

$$W_w = w \times W_s$$

Lalu, berat total dapat didefinisikan sebagai berat air ditambah dengan berat tanah. Berat total juga dapat diartikan sebagai volume total benda uji dikalikan dengan berat jenis tanah yang sudah ditetapkan dengan rumus berikut.

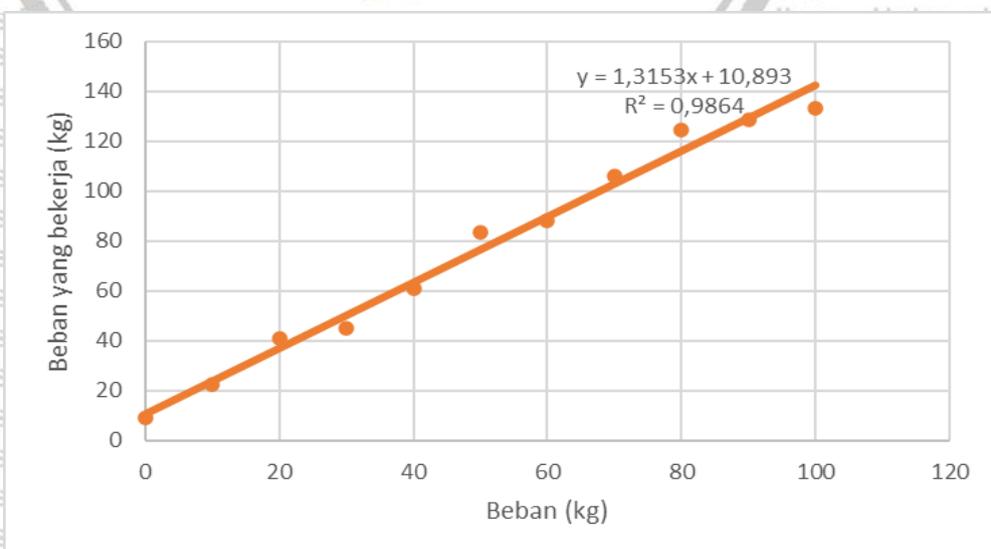
$$W = W_w + W_s = \gamma \times V$$

3. Pengujian konsolidasi dilakukan dengan tinggi sampel 30 cm untuk box dengan kedalaman 60 cm dan 50 cm. Diameter box 60 cm dan 50 cm dipasang PVD dengan jarak dan pola bervariasi seperti pada Tabel 3.1 dibawah ini.

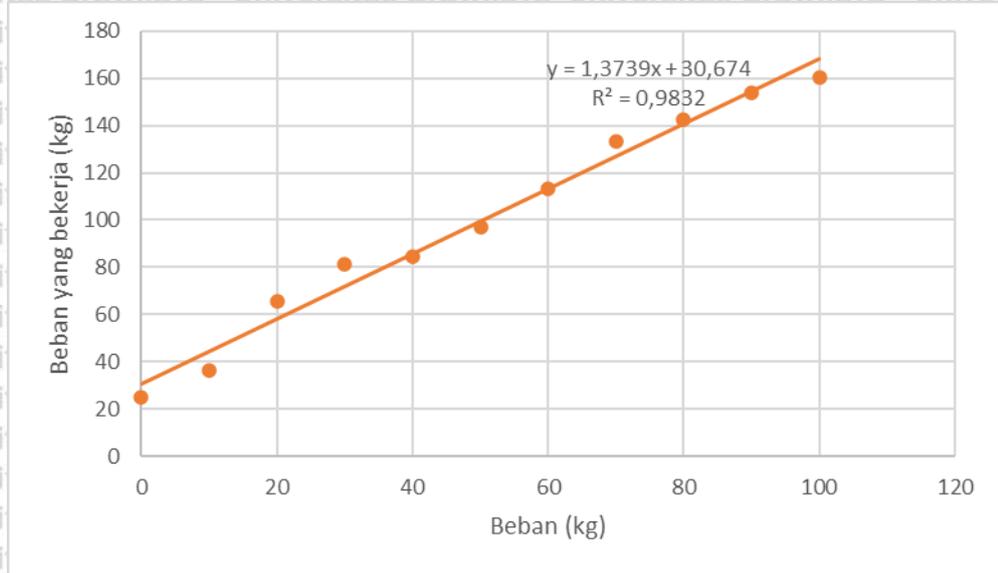
Tabel 3.1 Variasi Jarak dan Kedalaman PVD

Waktu		Jarak		
		20 cm	25 cm	30 cm
Kedalaman	Penurunan			
	25 cm			
	30 cm			
	40 cm			

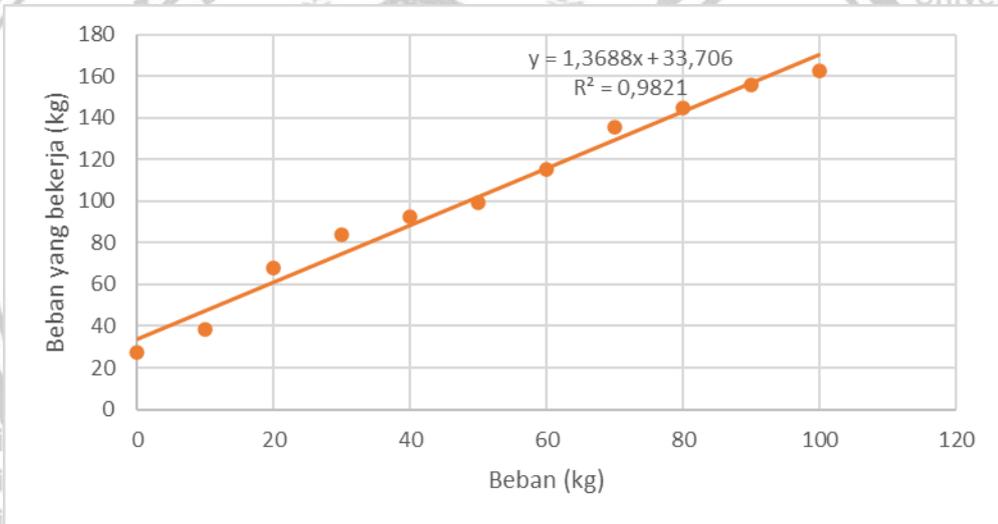
- Setelah itu, dilakukan pembebanan konsolidasi sebanyak 5 kali tahapan. Beban konsolidasi didapatkan dari kalibrasi alat uji dan box yang digunakan. Data kalibrasi didapatkan dari box 60x60x55 cm³ dengan menggunakan alat uji 3 dengan acuan urutan tahapan pembebanan 30 kg, 50 kg, 70 kg, 90 kg, dan 110 kg, dimana untuk mendapatkan urutan plat beban pada ukuran box dan jenis alat uji yang berbeda tentunya tidak sama. Urutan plat beban yang dicari dapat diketahui dengan mengkalibrasi ulang box terhadap pembacaan *dial reading* dari box kosong yang dibebani per interval 10 kg terhadap alat uji yang digunakan diantara alat uji 1, 2, atau 3, dengan data kalibrasi *proving ring* yang dipakai selanjutnya dapat diketahui beban yang bekerja pada box dan kemudian diplot dalam grafik hubungan beban *dial reading* terhadap beban konsolidasi untuk mencari urutan pelat beban yang setara dengan urutan beban 30 kg, 50 kg, 70 kg, 90 kg, dan 110 kg pada box 60x60x55 cm³ dalam alat uji



Gambar 3.1 Kalibrasi Alat Uji 1



Gambar 3.2 Kalibrasi Alat Uji 2



Gambar 3.3 Kalibrasi Alat Uji 3

4. Pengujian kadar air dan kadar organik dilakukan dengan mengambil tanah sampel uji lalu di keringkan dalam oven dan dilakukan penimbangan.
5. Analisis kelebihan tegangan air pori serta derajat konsolidasi gabungan dari semua pola, jarak, dan kedalaman PVD.
6. Analisis penurunan yang terjadi saat proses konsolidasi dengan teori Terzaghi, kemudian nilai yang didapatkan dibandingkan dengan hasil penurunan dengan analisis Asaoka.

3.7 Rancangan Penelitian

Pada percobaan ini tanah diberikan perlakuan, dimana setiap perlakuannya terdiri dari satu sampel. Perilakuannya diantaranya pemberian beban yang disesuaikan dengan faktor lengan dan ukuran box serta variasi jarak dan kedalaman PVD.

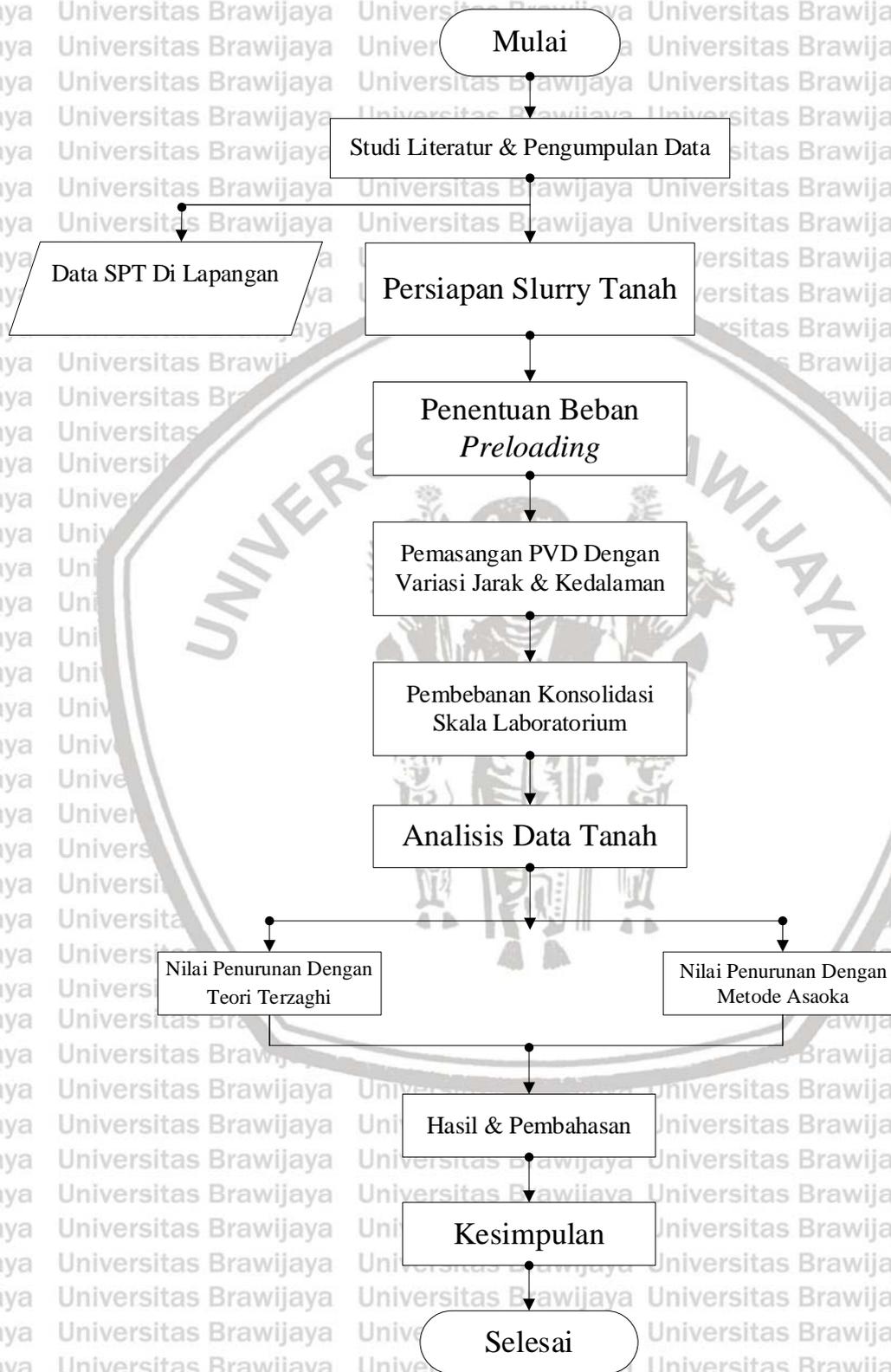


Gambar 3.4 Alat Uji dan Box Konsolidasi 60x60x55 cm³

3.8 Analisis Data

Setelah didapatkan data hasil percobaan konsolidasi dan kadar air maka dilakukan analisis data untuk mengetahui perilaku tanah lunak terhadap daya dukung tanah dengan metode variasi beban prakompresi yang ditentukan dikombinasikan dengan variasi jarak dan kedalaman PVD berdasarkan teori Terzaghi serta besar penurunan pada tanah yang diteliti terhadap fungsi waktu dengan analisis Asaoka.

Diagram Alir



Gambar 3.5 Diagram Alir Metode Penelitian



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

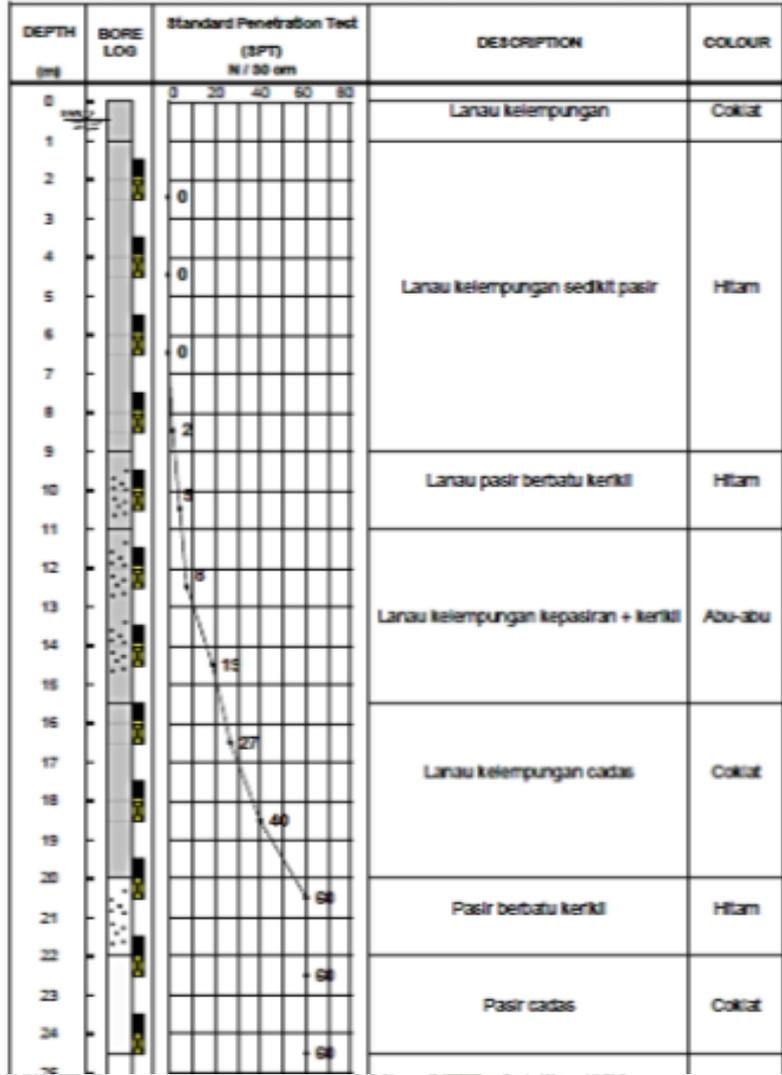
Pada bab ini, akan dibahas mengenai hasil penelitian yang telah dilakukan di laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Sampel yang akan diteliti merupakan tanah yang berada di Kabupaten Pasuruan, Kecamatan Grati, Jawa Timur. Tanah tersebut lalu dibawa ke laboratorium untuk dilakukan pengujian terhadap sifat fisik dan mekanis tanah. Pengujian sifat fisik tanah dilaksanakan untuk mengetahui nilai kadar air, kadar organik, tegangan air pori, berat jenis (*specific gravity*), berat isi, batas Atterberg dan penurunan konsolidasi. Sementara itu, pengujian sifat mekanik tanah dilakukan untuk mengetahui kuat geser tanah dengan percobaan *unconfined*. Lalu, dari hasil penurunan konsolidasi di laboratorium, selanjutnya dilakukan pendekatan hasil berupa analisis penurunan terhadap waktu konsolidasi yang terdiri dari analisis Asaoka dan analisis Terzaghi untuk kemudian dibandingkan hasilnya dengan penurunan konsolidasi di laboratorium.

4.1 Karakteristik Tanah

4.1.1 Sifat Fisis

- Investigasi Tanah

Menurut Zaika (2019), berdasarkan hasil percobaan *Standard Penetration Test* (SPT), diketahui bahwa tanah di lapangan dikelompokkan ke dalam jenis tanah yang sangat lunak dengan kedalaman sekitar 11 hingga 15 meter dari permukaan tanah. Sementara itu, data di lapangan mendukung pernyataan tersebut bahwa pada kedalaman 11 hingga 15 meter tanah tergolong dalam jenis tanah lanau kelempungan kepasiran.



Gambar 4.1 Investigasi Tanah dengan SPT

- Uji Berat Jenis / *Specific Gravity* (GS)

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai berat jenis sampel tanah yang ukuran butirannya lolos saringan nomor 40 dengan piknometer yang merupakan suatu perbandingan antara volume butir dengan berat volume air menggunakan volume yang sama pada temperatur tertentu yaitu 30°C. Nilai-nilai *specific gravity* untuk berbagai jenis tanah terdapat pada Tabel 4.1

Tabel 4.1. Ukuran dan Specific Gravity Untuk Tanah Pasir, Lanau, Lempung, dan Organik

Jenis Tanah	Ukuran (mm)	GS
Pasir	0,05-2	2,64-2,68
Lanau	0,05-0,002	2,58-2,72
Lempung	< 0,002	2,44-2,92
Gambut	0-40	1,26-1,90
Humus	< 0,074	1

Sumber: Ou (2006) dan Venkatramaiah (2006)

Hasil yang didapatkan dari pengujian GS ini adalah 2,565. Nilai tersebut tergolong dalam tanah lanau berdasarkan Tabel 4.1 diatas.

- Uji Kadar Air, Berat Isi, dan Analisis Ukuran Butiran Tanah

Pengujian sampel dalam laboratorium yang meliputi uji kadar air, berat isi dan ukuran butiran tanah menghasilkan beberapa nilai. Untuk kadar air yang didapatkan dari sampel tanah asli adalah sebesar 68,81%. Kemudian, persentase analisis ukuran butiran tanah yang melewati ukuran ayakan nomor #200 (0,075 mm) adalah sebesar 98,47% yang digolongkan dalam jenis tanah berbutir halus menurut *Unified Soil Classification System (USCS)*. Selain itu, dilansir dari Zaika (2019), disebutkan bahwa koefisien permeabilitas tanah sebesar 0,0003786 cm/s dan berat isi jenuh tanah asli sebesar 17,21 kN/m³ yang menunjukkan bahwa tanah tersebut digolongkan ke dalam tanah berlanau.

- Uji Kadar Organik

Berdasarkan percobaan kadar organik dengan metode pembakaran/*Loss on Ignition (LoI)*, didapatkan nilai kadar organik sampel tanah sebesar 2,136%. Harga ini semakin mempertegas klasifikasi tanah yang masuk ke dalam tanah lanau berdasarkan Tabel 4.2 dibawah ini yang menjelaskan hubungan kandungan bahan organik dalam suatu tanah terhadap jenis tanah berdasarkan ASTM D 2487.

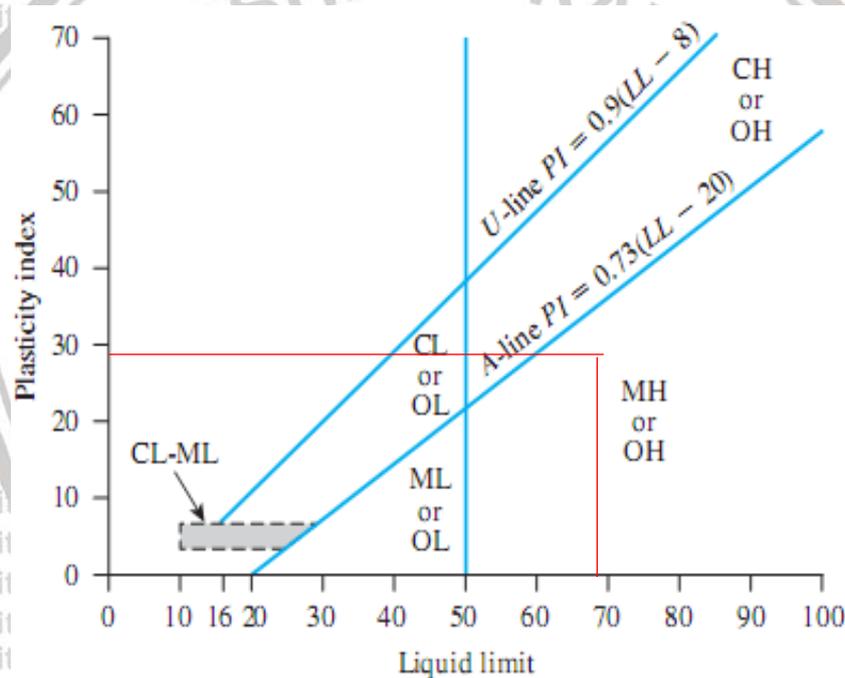
Tabel 4.2 Kandungan Bahan Organik

Basic Soil Type	Description	Symbol	Organic Content (%)
Clay or silt or sand	Slightly organic	O	2-20
Organic soil		O	25-75
Peat		Pt	>75

Sumber: ASTM D 2487

- Uji Batas Atterberg

Batas Atterberg yang diujikan dalam penelitian ini hanyalah uji Plastic Limit (PL) dan *Liquid Limit* (LL) untuk mengetahui nilai *Plasticity Index* (PI) yang akan digunakan dalam pengelompokan jenis tanah berdasarkan sistem *Unified Soil Classification System* (USCS). Berdasarkan hasil pengujian, didapatkan nilai PL sebesar 40,917 dan LL sebesar 69,936 ; sehingga nilai PI adalah 29,019 dimana nilai ini merupakan selisih dari nilai LL terhadap PL. Kemudian, data batas Atterberg tersebut diplot terhadap grafik klasifikasi tanah dengan sistem USCS pada Gambar 4.1 dan dapat disimpulkan bahwa jenis sampel tanah berupa tanah *lanau dengan sifat plastisitas yang tinggi (MH)*.



Gambar 4.2 Grafik Plastisitas Tanah

Sumber: *Unified Soil Classification System* (USCS)

4.1.2 Sifat Mekanis

Berdasarkan hasil riset penelitian yang dipublikasikan oleh Zaika (2019), untuk mendapatkan kuat geser dari sampel tanah asli *undisturbed*, dilakukan pengujian kuat tekan bebas (*unconfined compressive strength*) dan didapatkan kuat geser *undisturbed* sebesar 100 kN/m^2 yang setara dengan 10000 kg/m^2 dan kuat geser *remolded* sebesar $24,7 \text{ kN/m}^2$ yang setara dengan 2470 kg/m^2 .

Menurut ASTM D2166-06, tanah tergolong sangat lunak dan dengan

sensitivitas 4,049 , menjadikan tanah ini sebagai tanah dengan golongan sensitif.

4.2 Perencanaan Slurry Tanah Benda Uji

Disturbed soil yang sudah diambil kemudian dikeringkan selama 24 jam di bawah sinar matahari dan dihancurkan menjadi bongkahan tanah yang lebih kecil dengan cara manual (tenaga manusia) menggunakan pacul dan sekop.

Bongkahan tanah yang sudah kering selanjutnya diubah menjadi *slurry* (lumpur) tanah dengan mencampurkan air dan tanah sebanyak berat yang dibutuhkan untuk mencapai kadar air tertentu berdasarkan hubungan antara kadar air dengan berat air dan berat total, dimana berat air yang diperlukan sebanding dengan kadar air target dikalikan dengan berat tanah yaitu:

$$W_w = w \times W_s$$

Lalu, berat total dapat didefinisikan sebagai berat air ditambah dengan berat tanah. Berat total juga dapat diartikan sebagai volume total benda uji dikalikan dengan berat jenis tanah yang sudah ditetapkan.

$$W = W_w + W_s = \gamma \times V$$

Sebagai contoh, untuk box dengan volume $60 \times 60 \times 40 \text{ cm}^3$ didapatkan berat total seberat 213,83 kg dengan mengalikan volume box dan berat jenis tanah yang telah ditetapkan sebesar 1485 kg/m^3 . Untuk kadar air target 82%, didapatkan berat air (W_w) dan berat tanah (W_s) sebagai berikut.

$$W_w = 0,82W_s$$

$$W = W_w + W_s$$

$$213,83 = W_s + 0,82W_s$$

$$W_s = 117,49 \text{ kg}$$

$$W_w = 213,83 - 117,49 = 96,34 \text{ kg}$$

4.3 Pembebanan Konsolidasi Di Laboratorium

4.3.1 Kalibrasi Alat

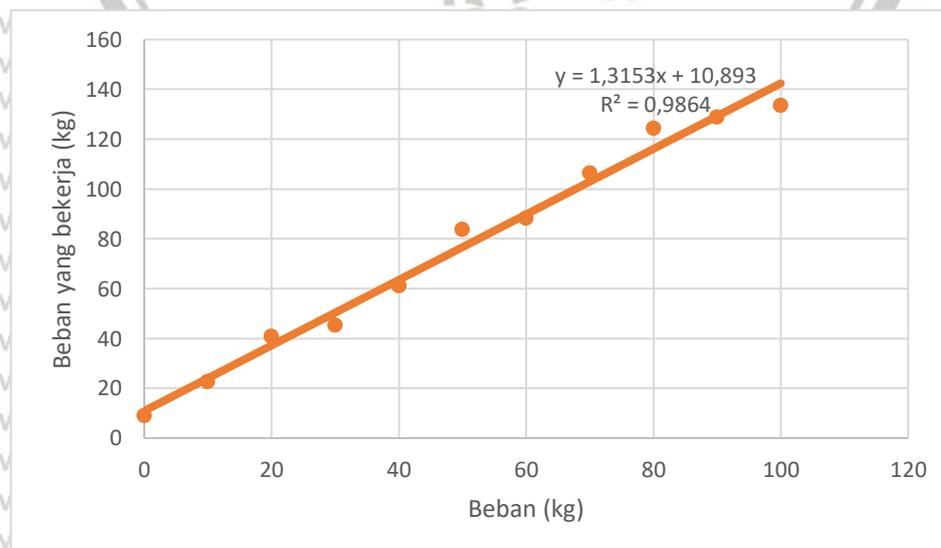
Kalibrasi alat uji dan box yang akan digunakan dilakukan untuk mendapatkan urutan beban rencana yang akan digunakan dalam percobaan konsolidasi selama 5 hari berturut-turut untuk satu penelitian. Data kalibrasi didapatkan dari box $60 \times 60 \times 55 \text{ cm}^3$

dan menggunakan alat uji 3 dengan acuan urutan tahapan pembebanan 30 kg, 50 kg, 70 kg, 90 kg, dan 110 kg, yang setara dengan tegangan berturut-turut 232,35 kg/m², 276,31 kg/m², 376,79 kg/m², 433,31 kg/m², dan 511,87 kg/m² dimana untuk mendapatkan urutan plat beban pada ukuran box dan jenis alat uji yang lainnya tidak sama nilainya dengan alat uji 3. Urutan plat beban yang dicari dapat diketahui dengan mengkalibrasi ulang box terhadap pembacaan *dial reading* dari box kosong yang dibebani per interval 10 kg, dengan data kalibrasi *proving ring* yang dipakai selanjutnya dapat diketahui beban yang bekerja pada box dan kemudian diplot dalam grafik hubungan beban *dial reading* terhadap beban konsolidasi untuk mencari urutan pelat beban yang setara dengan urutan beban 30 kg, 50 kg, 70 kg, 90 kg, dan 110 kg pada box 60x60x55 cm³ dalam alat uji 3.

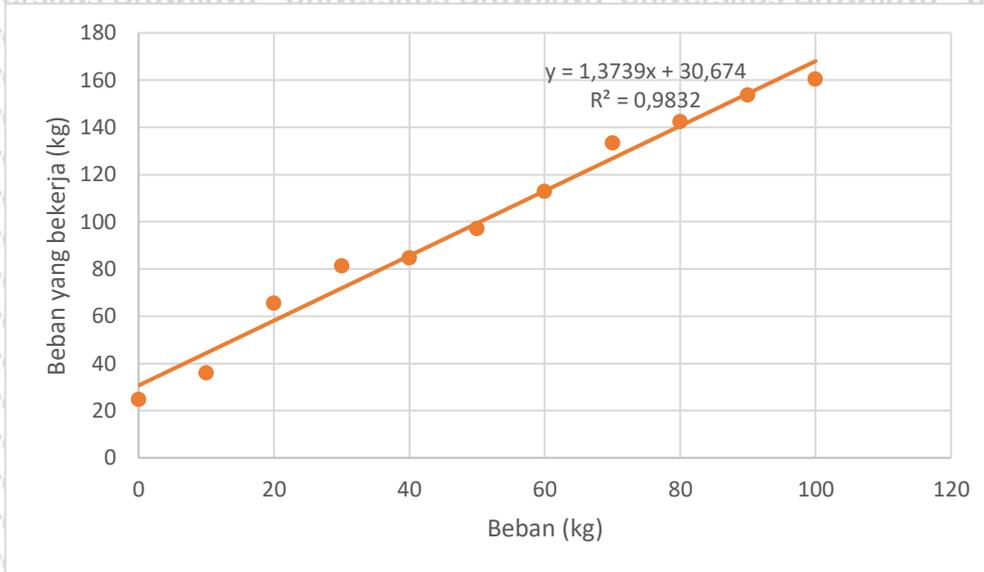
Untuk box yang digunakan terdiri atas ukuran 60x60x55 cm³ dan 50x50x45 cm³, dimana ukuran 60x60x55 cm³ diletakkan berturut-turut pada alat uji 2 dan alat uji 3. Sementara itu, ukuran 50x50x45 cm³ ditempatkan pada alat uji 1 yang posisinya diantara alat uji 2 dan alat uji 3.

Tabel 4.3 Kalibrasi Alat Uji dan Box Konsolidasi

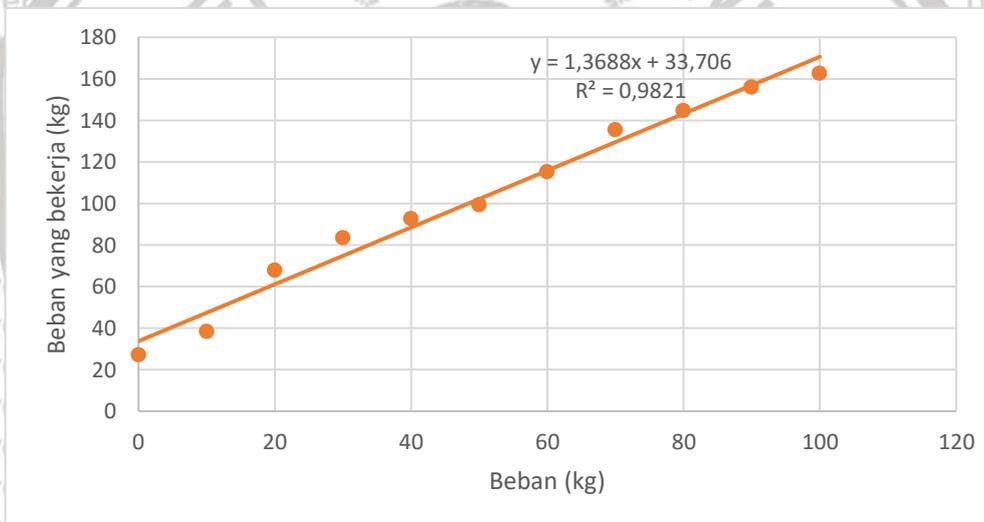
Pembacaan per garis	=	49,796 lbf
1	lbf	= 0,454 kg
49,8	lbf	= 22,607 kg



Gambar 4.3 Kalibrasi Alat Uji 1



Gambar 4.4 Kalibrasi Alat Uji 2



Gambar 4.5 Kalibrasi Alat Uji 3

4.3.2 Beban Rencana

Berdasarkan hasil kalibrasi box dan alat uji, didapatkan urutan beban rencana untuk box 60x60x55 cm³ dengan menggunakan alat uji 2 dan 50x50x45 cm³ pada alat uji 1 adalah sebagai berikut:

Tabel 4.4 Beban Rencana Box 60x60x55 cm³ Pada Alat Uji 2

Hari ke-	Beban Rencana (kg)
1	36,67
2	51,43
3	72,5
4	93,33
5	111,8

Tabel 4.5 Beban Rencana Box 50x50x45 cm³ Pada Alat Uji 1

Hari ke-	Beban Rencana (kg)
1	38,13
2	43,56
3	63,33
4	71,15
5	88,02

4.3.3 Uji Kadar Air

Nilai kadar air yang didapatkan dari slurry adalah sebesar 82% sebelum uji konsolidasi baik dengan PVD maupun tanpa PVD dan 68,47% setelah uji konsolidasi selama 5 hari dengan PVD serta 78,28% setelah uji konsolidasi tanpa PVD dengan ukuran box konsolidasi 60x60x55 cm³. Dari hal tersebut, dapat disimpulkan bahwa PVD dapat mempercepat proses konsolidasi karena kadar air akhir sampel yang menggunakan PVD lebih rendah daripada kadar air akhir sampel tanpa PVD.

4.3.4 Berat Isi Tanah

Sebelum mengalami konsolidasi, berat isi dari 13 sampel tanah yang terdiri dari 12 sampel dengan PVD dan 1 sampel tanpa PVD dalam kondisi jenuh (γ_{sat}) adalah 1485 kg/m³ dan berat isi kering (γ_d) sebesar 816 kg/m³. Tetapi, setelah mengalami konsolidasi, rata-rata nilai γ_{sat} dari 12 sampel PVD turun menjadi 1470 kg/m³ dan 1467 kg/m³ untuk sampel tanpa PVD. Sementara itu, rerataan nilai γ_d 12 sampel PVD naik menjadi 873 kg/m³ dan 823 kg/m³ untuk sampel tanpa PVD. Air dalam tanah telah terdisipasi selama proses konsolidasi sehingga konsekuensinya adalah berat isi jenuh mengalami penurunan sementara berat isi meningkat bila dibandingkan dengan sebelum proses konsolidasi.

4.3.5 Derajat Kejenuhan

Prinsip dalam derajat kejenuhan sama dengan kadar air dan berat isi jenuh, dimana air dalam tanah terdisipasi selama konsolidasi sehingga kejenuhan tanah berkurang. Derajat kejenuhan sampel tanah sebelum mengalami konsolidasi adalah sebesar 98,12% dan setelah konsolidasi derajat kejenuhan rata-rata dari 12 sampel dengan PVD turun menjadi 90,47% dan 94,21% untuk sampel tanpa PVD.

4.4 Hubungan Penurunan dan Waktu

4.4.1 Tanpa PVD

Penurunan Terzaghi merupakan analisis penurunan satu dimensi (arah vertikal) yang dikemukakan oleh Terzaghi pada tahun 1939. Rumus untuk mengetahui penurunan Terzaghi ini sebagai berikut:

$$S_c = C_r \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma_c'}{\sigma_0'} + C_c \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma_1'}{\sigma_c'}$$

Keterangan:

S_c = Penurunan Terzaghi (cm)

C_r = Indeks pemampatan kembali = 0,1 C_c

C_c = Indeks pemampatan

H = Tebal lapisan tanah (cm)

σ_c' = Tegangan prakonsolidasi (kg/cm^2)

σ_0' = Tegangan overburden/tegangan awal sebelum dibebani (kg/cm^2)

σ_1' = Tegangan akhir pembebanan (kg/cm^2)

e_0 = Angka pori awal

Dari hasil analisis terhadap box konsolidasi tanpa PVD, diketahui beberapa nilai untuk:

$$C_c = 0,038;$$

$$C_r = 0,0038;$$

$$H = 40 \text{ cm}$$

$$\sigma_c' = 0,03 \text{ kg}/\text{cm}^2$$

$$\sigma_0' = \gamma_{sat} \times \frac{H}{2} = 1485 \text{ kg}/\text{m}^3 \times \frac{0,4\text{m}}{2} = 297 \text{ kg}/\text{m}^2 = 0,0297 \text{ kg}/\text{cm}^2$$

$$\begin{aligned} \sigma_1' &= \sigma_0' + \sigma_5' \\ &= 0,0297 + 0,0512 \\ &= 0,0809 \text{ kg}/\text{cm}^2 \end{aligned}$$



$$e_0 = 2,143$$

Maka, perhitungan penurunan Terzaghi untuk interval hari kelima adalah sebagai berikut:

$$S_c = 0,0037 \frac{40}{1+2,143} \log \frac{0,03}{0,0297} + 0,037 \frac{40}{1+2,143} \log \frac{0,0809}{0,03} = 6,824 \text{ mm}$$

Selain itu, menurut Hardiyatmo (2017), untuk perhitungan analisis penurunan dengan PVD dan mempertimbangkan efek *smear zone* yaitu:

$$Tv = \frac{Cv t}{Ht^2}; Uv = \sqrt{\frac{4Tv}{\pi}}$$

$$Th = \frac{Ch t}{4D^2}; Uh = 1 - e^{-\frac{8Th}{m}}$$

$$m = \frac{n^2}{n^2 - S^2} \ln \left(\frac{n}{S} \right) - 0,75 + \frac{S^2}{4n^2} + \frac{kh}{ks} \left(\frac{n^2 - S^2}{n^2} \right) \ln S$$

$$kh = Ch \gamma_w mv$$

$$Fs = 3 F(n)$$

$$n = \frac{D}{dw}; D=1,13s \text{ (pola segiempat) dan } D=1,05s \text{ (pola segitiga)}$$

$$F(n) = \ln(n) - 0,75$$

$$dw = \frac{2(a+b)}{\pi}; a = \text{lebar PVD dan } b = \text{tebal penampang PVD}$$

$$S = \frac{rs}{rw}; r_w = \frac{1}{2} d_w \text{ dan } r_s = \frac{1}{2} d_s$$

$$ds = 3 dw$$

$$ks = \frac{kh}{\frac{Fs}{\ln \left(\frac{ds}{dw} \right)} + 1}$$

$$U = 1 - (1 - Uv)(1 - Uh)$$

$$St = U \cdot Sc$$

Dimana:

t = Waktu konsolidasi (hari)

T_v = Faktor waktu drainase vertikal

Ht = Kedalaman PVD

U_v = Derajat konsolidasi vertikal (%)

Th = Faktor waktu drainase horizontal ; Ch=2Cv

Uh = Derajat konsolidasi horizontal (%)

U = Derajat konsolidasi total (%)

- D = Diameter pengaruh PVD (m)
- s = Jarak drainase vertikal (m)
- d_w = Diameter ekuivalen drainase vertikal
- r_w = Jari-jari drainase ekuivalen vertikal
- d_s = Diameter dari pusat drainase vertikal ke titik terjauh *smear zone*
- r_s = Jarak radial dari pusat drainase vertikal ke titik terjauh *smear zone*
- k_s = Koefisien permeabilitas *smear zone*
- k_h = Koefisien permeabilitas arah horizontal
- F_s = Faktor gangguan tanah akibat *smear zone*
- $F(n)$ = Fungsi n terhadap waktu akibat PVD
- St = Penurunan akhir (mm)

Contoh perhitungan dengan PVD pada hari pertama untuk kedalaman PVD 25 cm pola segiempat adalah:

$$Tv = \frac{0,253(365)}{25} = 0,148; Uv = \sqrt{\frac{4(0,148)}{\pi}} = 0,434$$

$$Th = \frac{2(0,253)(365)}{4(40)^2} = 0,361$$

$$m = \frac{2,368^2}{2,368^2 - 3^2} \ln\left(\frac{2,368}{3}\right) - 0,75 + \frac{3^2}{4(2,368)^2} + \frac{0,0057}{0,0044} \left(\frac{2,368^2 - 3^2}{2,368^2}\right) \ln 3 = 11,385$$

$$Uh = 1 - e^{-\frac{8(0,361)}{11,385}} = 0,224$$

$$kh = Ch \gamma_w mv = 2(0,253)(1000)(0,113)(0,0001) = 0,0057 \text{ cm/hari}$$

$$F(n) = \ln(n) - 0,75 = \ln(2,37) - 0,75 = 0,112$$

$$F_s = 3 F(n) = 0,3357$$

$$D = (1,13)(0,2) = 0,226 \text{ m}$$

$$d_w = \frac{2(0,1+0,05)}{\pi} = 0,0955 \text{ m}$$

$$d_s = 3 d_w = 0,2864 \text{ m}$$

$$n = \frac{D}{d_w} = \frac{0,226}{0,0955} = 2,37$$

$$S = \frac{r_s}{r_w} = \frac{0,2864}{\frac{0,0955}{2}} = 3; r_s = \frac{1}{2} d_s \text{ dan } r_w = \frac{1}{2} d_w$$

$$k_s = \frac{kh}{F_s} = \frac{0,0057}{0,3357} = 0,0044$$

$$\ln\left(\frac{d_s}{d_w}\right) + 1 = \frac{0,3357}{\ln\left(\frac{0,2864}{0,0955}\right) + 1}$$

$$U = 1 - (1 - Uv)(1 - Uh) = 1 - (1 - 0,434)(1 - 0,224) = 56,1\%$$



$$St = U.S_c = 56,1\%(2,682) = 1,505 \text{ mm}$$

Lalu, untuk contoh perhitungan analisis penurunan dengan metode Asaoka pada box konsolidasi 60x60x55 cm³ dan kedalaman PVD 25 cm serta berpola segiempat antara lain:

$$C_v \text{ Asaoka} = \frac{\ln b_1 4H^2}{\pi^2 \Delta t} = \frac{4 \ln 0,74 (25)^2}{\pi^2 (86400)} = 0,0009 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$Ch \text{ Asaoka} = \frac{\ln b_1 F(n) dw^2}{8 \Delta t} = \frac{\ln 0,74 (0,112)(0,0955)^2}{8(86400)} = 4,531.10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Penurunan Asaoka

$$St = \sigma_f \left(1 - e^{-\left(\frac{8Ch}{F(n)dw^2} + \frac{\pi^2 C_v}{4H^2} \right) \Delta t} \right) = 4,31 \left(1 - e^{-\left(\frac{8(4,531.10^{-10})}{(0,112)(0,0955)^2} + \frac{\pi^2 (0,0023)}{4(40)^2} \right) 86400} \right)$$

$$= 1,499 \text{ mm}$$

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan penurunan konsolidasi tanah terhadap waktu pengujian tanpa menggunakan PVD.

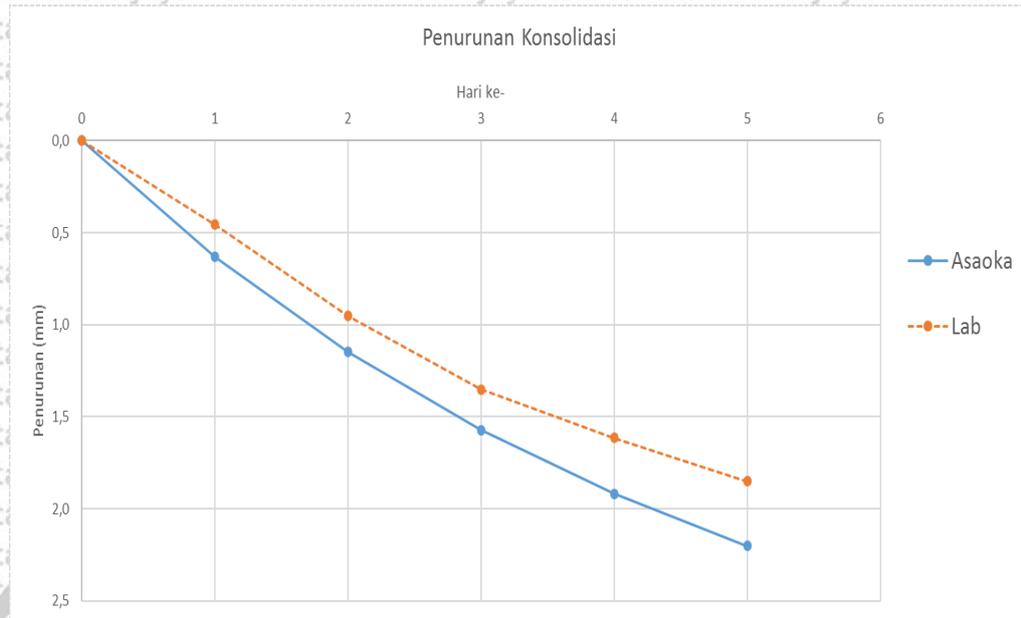
Tabel 4.6 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi Tanpa PVD

Waktu (hari)	Waktu (detik)	Cv (cm2/s)	Ch (cm2/s)	St/pf	St asaoka (mm)
0	0	0	0	0	0
1	86400	1,513,E-03	0	0,183	0,631
2	172800	1,513,E-03	0	0,333	1,148
3	259200	1,513,E-03	0	0,456	1,572
4	345600	1,513,E-03	0	0,556	1,919
5	432000	1,513,E-03	0	0,638	2,202

Tabel 4.7 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi Tanpa PVD

Waktu (hari)	St asaoka (mm)	St lab (mm)	St Terzaghi (mm)
0	0	0	
1	0,631	0,456	
2	1,148	0,952	
3	1,572	1,352	
4	1,919	1,614	
5	2,202	1,851	6,824
Waktu konsolidasi (jam)	194,388	208,480	





Gambar 4.6 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi Tanpa PVD

Jadi, untuk analisis Asaoka, waktu penurunan yang diperlukan untuk mencapai penurunan target 6,824 mm selama 5 hari dari perhitungan Terzaghi adalah selama 194,388 jam dan untuk waktu penurunan laboratorium selama 208,48 jam.

4.4.2 Panjang PVD Pola Segiempat

- Kedalaman 25 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan penurunan konsolidasi tanah terhadap waktu pengujian menggunakan PVD dengan panjang 25 cm.

Tabel 4.8 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segiempat

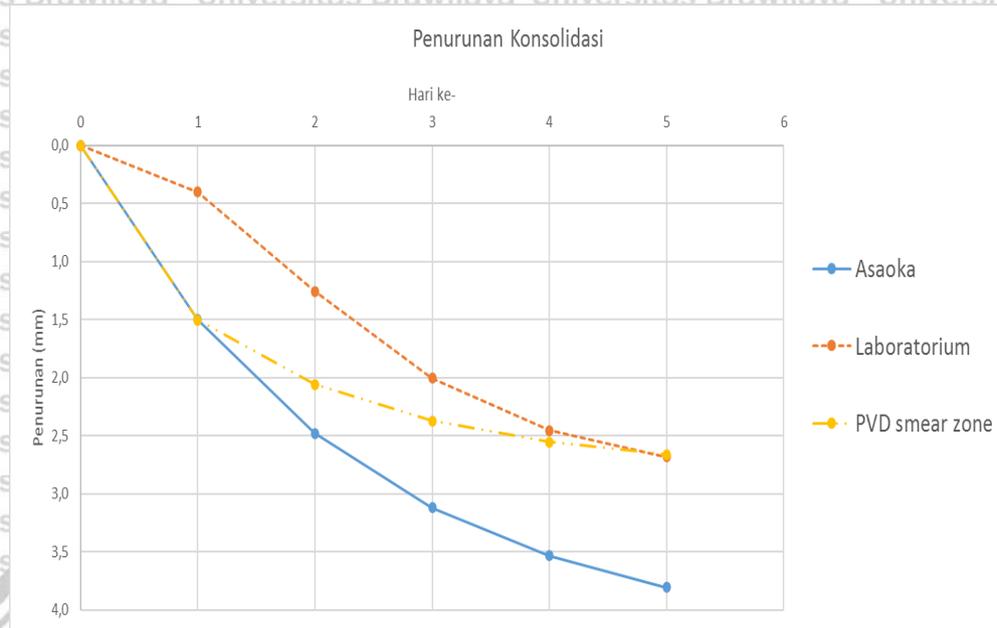
Waktu (hari)	Tv	Uv	Th	x	Uh	U	St (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,148	0,434	0,361	0,254	0,224	56,1%	1,504
2	0,295	0,613	0,723	0,508	0,398	76,7%	2,058
3	0,443	0,751	1,084	0,762	0,533	88,4%	2,370
4	0,591	0,867	1,446	1,016	0,638	95,2%	2,553
5	0,739	0,970	1,807	1,270	0,719	99,1%	2,659

Tabel 4.9 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	Waktu (detik)	Cv (cm ² /s)	Ch (cm ² /s)	St/pf	St asaoka (mm)
0	0	0	0	0	0
1	86400	9,007,E-04	4,531,E-10	0,348	1,499
2	172800	9,007,E-04	4,531,E-10	0,575	2,478
3	259200	9,007,E-04	4,531,E-10	0,723	3,118
4	345600	9,007,E-04	4,531,E-10	0,820	3,534
5	432000	9,007,E-04	4,531,E-10	0,883	3,805

Tabel 4.10 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	St asaoka (mm)	St lab (mm)	St PVD smear zone (mm)
0	0	0	0
1	1,499	0,400	1,504
2	2,478	1,257	2,058
3	3,118	2,002	2,370
4	3,534	2,454	2,553
5	3,805	2,682	2,659
Waktu konsolidasi (jam)	163,046	181,065	181,589



Gambar 4.7 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segiempat

Jadi, untuk analisis Asaoka, waktu penurunan yang diperlukan untuk mencapai penurunan target 6,824 mm selama 5 hari dari perhitungan Terzaghi adalah selama 163,046 jam, waktu penurunan laboratorium selama 181,065 jam, dan waktu penurunan analisis PVD selama 181,589 jam.

- Kedalaman 30 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan penurunan konsolidasi tanah terhadap waktu pengujian menggunakan PVD dengan panjang 30 cm.

Tabel 4.11 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	Tv	Uv	Th	x	Uh	U	St (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,435	0,744	1,532	1,077	0,659	91,3%	29,216
2	0,870	1,052	3,064	2,153	0,884	100,0%	32,008
3	1,304	1,289	4,597	3,230	0,960	100,0%	32,008
4	1,739	1,488	6,129	4,306	0,987	100,0%	32,008
5	2,174	1,664	7,661	5,383	0,995	100,0%	32,008

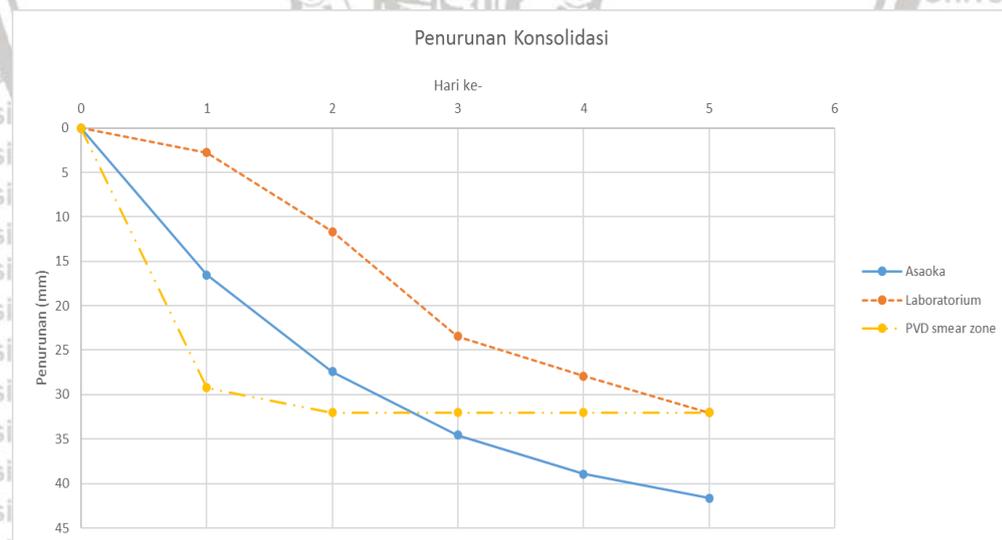
Tabel 4.12 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu

Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	Waktu (detik)	Cv (cm ² /s)	Ch (cm ² /s)	St/pf	St asaoka (mm)
0	0	0	0	0	0
1	86400	1,201,E-03	4,197,E-10	0,360	16,555
2	172800	1,201,E-03	4,197,E-10	0,597	27,425
3	259200	1,201,E-03	4,197,E-10	0,752	34,562
4	345600	1,201,E-03	4,197,E-10	0,847	38,921
5	432000	1,201,E-03	4,197,E-10	0,906	41,644

Tabel 4.13 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	St asaoka (mm)	St lab (mm)	St PVD smear zone (mm)
0	0	0	0
1	16,555	2,775	29,216
2	27,425	11,668	32,008
3	34,562	23,438	32,008
4	38,921	27,908	32,008
5	41,644	32,008	32,008
Waktu konsolidasi (jam)	9,893	33,964	5,606



Gambar 4.8 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segiempat

Jadi, untuk analisis Asaoka, waktu penurunan yang diperlukan untuk mencapai penurunan target 6,824 mm selama 5 hari dari perhitungan Terzaghi adalah

during 9,893 hours, laboratory descent time during 33,964 hours, and
 PVD analysis descent time during 5,606 hours.

- Depth 40 cm

The following is the result of soil consolidation settlement analysis
 against the time of testing using PVD with a length of 40 cm.

Tabel 4.14 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi
 dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Kedalaman PVD 40 cm Pola
 Segiempat

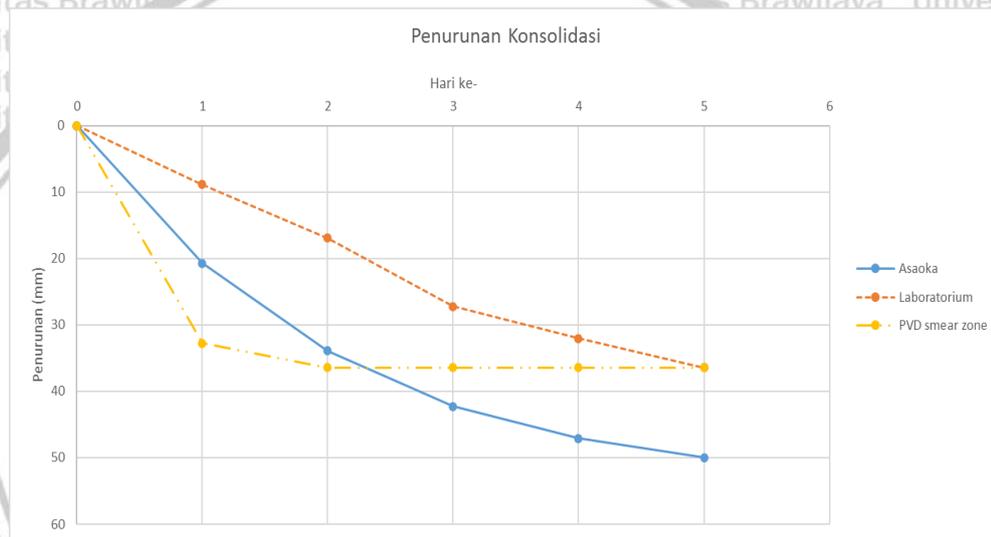
Waktu (hari)	Tv	Uv	Th	x	Uh	U	St (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,527	0,819	0,82604	0,580	0,440	89,9%	32,761
2	1,055	1,159	1,65207	1,161	0,687	100,0%	36,444
3	1,582	1,419	2,47811	1,741	0,825	100,0%	36,444
4	2,110	1,639	3,30414	2,322	0,902	100,0%	36,444
5	2,637	1,832	4,13018	2,902	0,945	100,0%	36,444

Tabel 4.15 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu
 Konsolidasi pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	Waktu (detik)	Cv (cm ² /s)	Ch (cm ² /s)	St/pf	St asaoka (mm)
0	0	0	0	0	0
1	86400	1,778,E-03	3,495,E-10	0,384	20,712
2	172800	1,778,E-03	3,495,E-10	0,628	33,899
3	259200	1,778,E-03	3,495,E-10	0,783	42,241
4	345600	1,778,E-03	3,495,E-10	0,873	47,111
5	432000	1,778,E-03	3,495,E-10	0,927	50,003

Tabel 4.16 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	St Asaoka (mm)	St lab (mm)	St PVD smear zone (mm)
0	0	0	0
1	20,712	8,830	32,761
2	33,899	16,923	36,444
3	42,241	27,191	36,444
4	47,111	32,019	36,444
5	50,003	36,444	36,444
Waktu konsolidasi (jam)	7,907	18,548	4,999



Gambar 4.9 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segiempat

Jadi, untuk analisis Asaoka, waktu penurunan yang diperlukan untuk mencapai penurunan target 6,824 mm selama 5 hari dari perhitungan Terzaghi adalah selama 7,907 jam, waktu penurunan laboratorium selama 18,548 jam, dan waktu penurunan analisis PVD selama 4,999 jam.

4.4.3 Panjang PVD Pola Segitiga

- Kedalaman 25 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan penurunan konsolidasi tanah terhadap waktu pengujian menggunakan PVD dengan panjang 25 cm.

Tabel 4.17 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	Tv	Uv	Th	x	Uh	U	St (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,177	0,474	0,501	0,424	0,345	65,58%	3,231
2	0,353	0,671	1,002	0,847	0,571	85,89%	4,232
3	0,530	0,821	1,502	1,271	0,719	94,99%	4,680
4	0,707	0,949	2,003	1,694	0,816	99,05%	4,880
5	0,883	1,061	2,504	2,118	0,880	100,00%	4,927

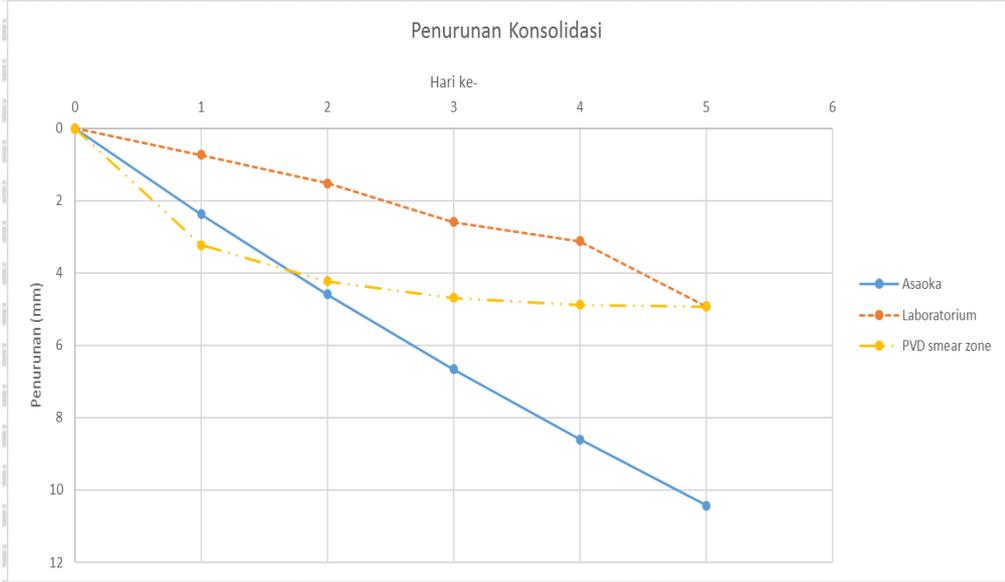
Tabel 4.18 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	Waktu (detik)	Cv (cm ² /s)	Ch (cm ² /s)	St/pf	St asaoka (mm)
0	0	0	0	0	0
1	86400	1,451,E-04	2,508,E-11	0,067	2,371
2	172800	1,451,E-04	2,508,E-11	0,129	4,589
3	259200	1,451,E-04	2,508,E-11	0,187	6,665
4	345600	1,451,E-04	2,508,E-11	0,241	8,603
5	432000	1,451,E-04	2,508,E-11	0,293	10,430

Tabel 4.19 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	St asaoka (mm)	St lab (mm)	St PVD smear zone (mm)
0	0	0	0
1	2,371	0,740	3,231
2	4,589	1,525	4,232
3	6,665	2,595	4,680
4	8,603	3,125	4,880
5	10,430	4,927	4,927
Waktu Konsolidasi (jam)	47,429	153,241	153,241





Gambar 4.10 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segitiga

Jadi, untuk analisis Asaoka, waktu penurunan yang diperlukan untuk mencapai penurunan target 6,824 mm selama 5 hari dari perhitungan Terzaghi adalah selama 47,429 jam, waktu penurunan laboratorium selama 153,241 jam, dan waktu penurunan analisis PVD selama 153,241 jam.

- Kedalaman 30 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan penurunan konsolidasi tanah terhadap waktu pengujian menggunakan PVD dengan panjang 30 cm.

Tabel 4.20 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	Tv	Uv	Th	x	Uh	U	St (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,450	0,757	1,838	1,555	0,789	94,9%	39,295
2	0,901	1,071	3,676	3,110	0,955	100,0%	41,418
3	1,351	1,312	5,515	4,665	0,991	100,0%	41,418
4	1,801	1,514	7,353	6,220	0,998	100,0%	41,418
5	2,252	1,693	9,191	7,775	1,000	100,0%	41,430

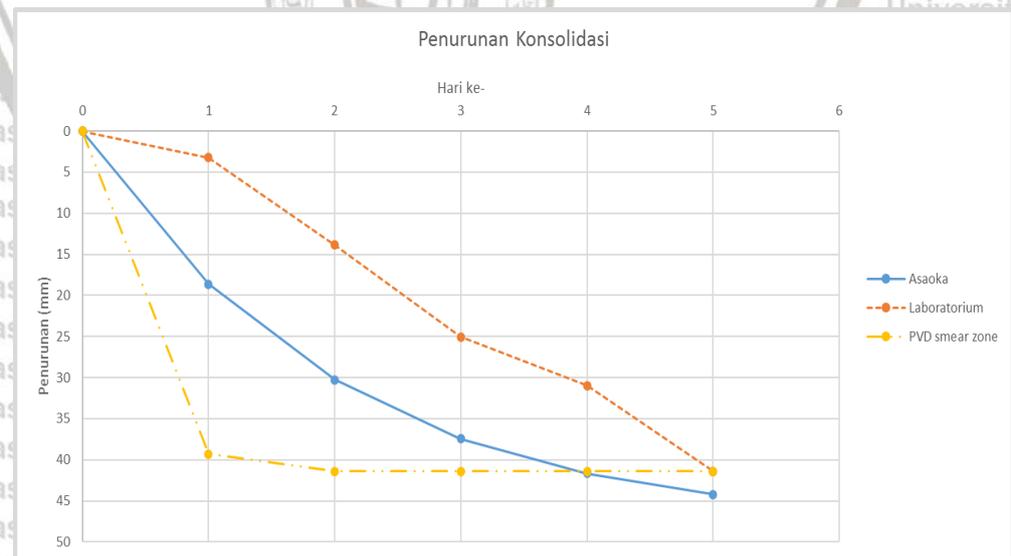
Tabel 4.21 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu

Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	Waktu (detik)	Cv (cm ² /s)	Ch (cm ² /s)	St/pf	St asaoka (mm)
0	0	0	0	0	0
1	86400	1,339,E-03	1,607,E-10	0,392	18,612
2	172800	1,339,E-03	1,607,E-10	0,638	30,273
3	259200	1,339,E-03	1,607,E-10	0,790	37,466
4	345600	1,339,E-03	1,607,E-10	0,878	41,663
5	432000	1,339,E-03	1,607,E-10	0,932	44,232

Tabel 4.22 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	St asaoka (mm)	St lab (mm)	St PVD smear zone (mm)
0	0	0	0
1	18,612	3,210	39,295
2	30,273	13,865	41,418
3	37,466	25,051	41,418
4	41,663	30,968	41,418
5	44,232	41,418	41,430
Waktu konsolidasi (jam)	8,800	35,812	4,168



Gambar 4.11 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segitiga

Jadi, untuk analisis Asaoka, waktu penurunan yang diperlukan untuk mencapai penurunan target 6,824 mm selama 5 hari dari perhitungan Terzaghi adalah selama 8,8 jam, waktu penurunan laboratorium selama 35,812 jam, dan waktu penurunan analisis PVD selama 4,168 jam.

- Kedalaman 40 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan penurunan konsolidasi tanah terhadap waktu pengujian menggunakan PVD dengan panjang 40 cm.

Tabel 4.23 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	Tv	Uv	Th	x	Uh	U	St (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,364	0,681	2,639	2,232	0,893	96,6%	41,455
2	0,727	0,962	5,278	4,465	0,988	99,96%	42,907
3	1,091	1,179	7,918	6,697	0,999	100%	42,935
4	1,455	1,361	10,557	8,930	1,000	100%	42,928
5	1,819	1,522	13,196	11,162	1,000	100%	42,926

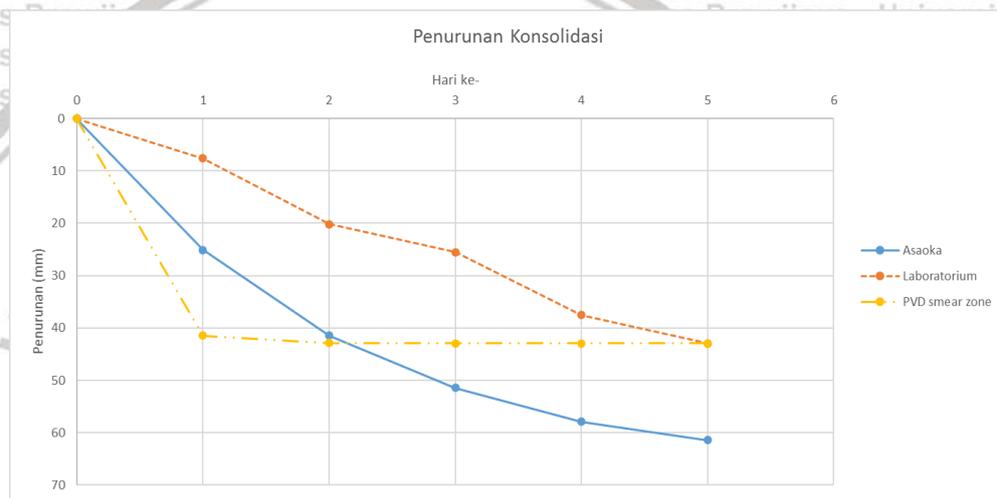
Tabel 4.24 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	Waktu (detik)	Cv (cm ² /s)	Ch (cm ² /s)	St/pf	St asaoka (mm)
0	0	0	0	0	0
1	86400	1,755,E-03	3,448,E-10	0,379	25,093
2	172800	1,755,E-03	3,448,E-10	0,627	41,495
3	259200	1,755,E-03	3,448,E-10	0,777	51,439
4	345600	1,755,E-03	3,448,E-10	0,874	57,870
5	432000	1,755,E-03	3,448,E-10	0,928	61,448



Tabel 4.25 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	St asaoka (mm)	St lab (mm)	St PVD smear zone (mm)
0	0	0	0
1	25,093	7,640	41,455
2	41,495	20,215	42,907
3	51,439	25,526	42,935
4	57,870	37,541	42,928
5	61,448	42,926	42,926
Waktu konsolidasi (jam)	6,527	21,437	3,951



Gambar 4.12 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segitiga

Jadi, untuk analisis Asaoka, waktu penurunan yang diperlukan untuk mencapai penurunan target 6,824 mm selama 5 hari dari perhitungan Terzaghi adalah selama 6,527 jam, waktu penurunan laboratorium selama 21,437 jam, dan waktu penurunan analisis PVD selama 3,951 jam.

4.4.4 Jarak PVD Pola Segiempat

- Jarak 20 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan penurunan konsolidasi tanah terhadap waktu pengujian menggunakan PVD dengan jarak antar PVD 20 cm.

Tabel 4.26 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Jarak PVD 20 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	Tv	Uv	Th	x	Uh	U	St (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,181	0,480	0,637	0,448	0,361	66,7%	19,035
2	0,361	0,678	1,274	0,895	0,591	86,9%	24,772
3	0,542	0,831	1,911	1,343	0,739	95,6%	27,260
4	0,723	0,959	2,548	1,790	0,833	100,0%	28,519
5	0,904	1,073	3,185	2,238	0,893	100,0%	28,519

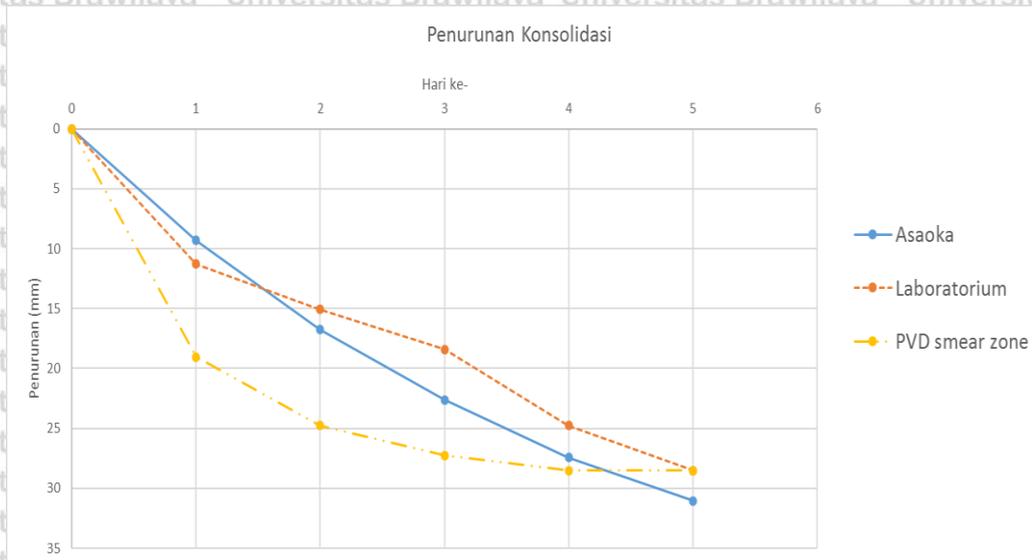
Tabel 4.27 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 20 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	Waktu (detik)	Cv (cm2/s)	Ch (cm2/s)	St/pf	St asaoka (mm)
0	0	0	0	0	0
1	86400	5,092,E-04	1,779,E-10	0,222	9,329
2	172800	5,092,E-04	1,779,E-10	0,399	16,766
3	259200	5,092,E-04	1,779,E-10	0,538	22,632
4	345600	5,092,E-04	1,779,E-10	0,652	27,423
5	432000	5,092,E-04	1,779,E-10	0,738	31,040

Tabel 4.28 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 20 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	St asaoka (mm)	St lab (mm)	St PVD smear zone (mm)
0	0	0	0
1	9,329	11,290	19,035
2	16,766	15,070	24,772
3	22,632	18,405	27,260
4	27,423	24,777	28,519
5	31,040	28,519	28,519
Waktu konsolidasi (jam)	17,556	14,506	8,604





Gambar 4.13 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 20 cm Pola Segiempat

Jadi, untuk analisis Asaoka, waktu penurunan yang diperlukan untuk mencapai penurunan target 6,824 mm selama 5 hari dari perhitungan Terzaghi adalah selama 17,556 jam, waktu penurunan laboratorium selama 14,506 jam, dan waktu penurunan analisis PVD selama 8,604 jam.

- Jarak 25 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan penurunan konsolidasi tanah terhadap waktu pengujian menggunakan PVD dengan jarak antar PVD 25 cm.

Tabel 4.29 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Jarak PVD 25 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	Tv	Uv	Th	x	Uh	U	St (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,091	0,340	0,205	0,084	0,081	39,3%	5,898
2	0,181	0,481	0,409	0,169	0,155	56,1%	8,418
3	0,272	0,589	0,614	0,253	0,224	68,1%	10,208
4	0,363	0,680	0,818	0,338	0,287	77,1%	11,570
5	0,454	0,760	1,023	0,422	0,344	84,3%	12,636

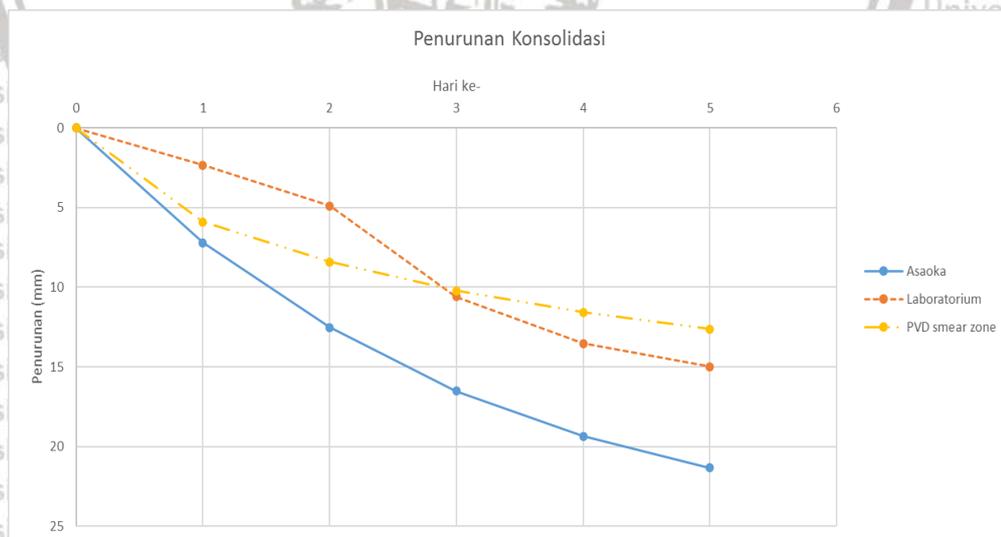
Tabel 4.30 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu

Konsolidasi pada Jarak PVD 25 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	Waktu (detik)	Cv (cm ² /s)	Ch (cm ² /s)	St/pf	St asaoka (mm)
0	0	0	0	0	0
1	86400	6,745,E-04	7,056,E-10	0,275	7,213
2	172800	6,745,E-04	7,056,E-10	0,478	12,519
3	259200	6,745,E-04	7,056,E-10	0,630	16,508
4	345600	6,745,E-04	7,056,E-10	0,738	19,341
5	432000	6,745,E-04	7,056,E-10	0,814	21,340

Tabel 4.31 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 25 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	St asaoka (mm)	St lab (mm)	St PVD smear zone (mm)
0	0	0	0
1	7,213	2,330	5,898
2	12,519	4,910	8,418
3	16,508	10,589	10,208
4	19,341	13,520	11,570
5	21,340	14,997	12,636
Waktu konsolidasi (jam)	22,705	56,533	28,544



Gambar 4.14 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 25 cm Pola Segiempat

Jadi, untuk analisis Asaoka, waktu penurunan yang diperlukan untuk mencapai penurunan target 6,824 mm selama 5 hari dari perhitungan Terzaghi adalah



during 22,705 hours, laboratory time during 56,533 hours, and consolidation analysis time during 28,544 hours.

- Distance 30 cm

The following is the result of consolidation analysis against time using PVD with a distance of 30 cm.

Tabel 4.32 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Jarak PVD 30 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	Tv	Uv	Th	x	Uh	U	St (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,104	0,365	0,164	0,045	0,044	39,3%	3,574
2	0,209	0,516	0,327	0,090	0,086	55,8%	5,073
3	0,313	0,632	0,491	0,135	0,127	67,8%	6,172
4	0,418	0,729	0,654	0,181	0,165	77,4%	7,044
5	0,522	0,815	0,818	0,226	0,202	85,3%	7,760

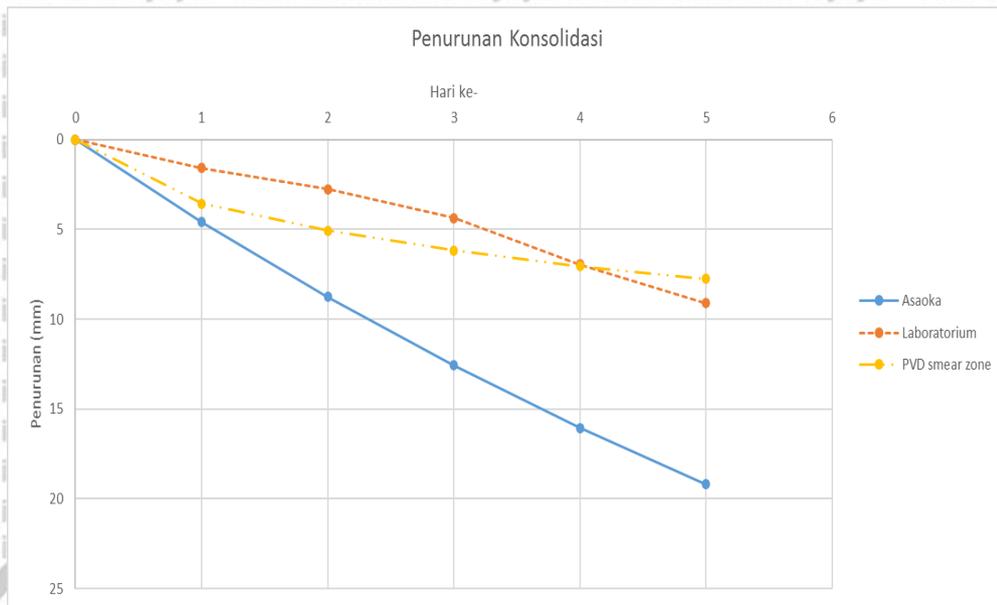
Tabel 4.33 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 30 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	Waktu (detik)	Cv (cm ² /s)	Ch (cm ² /s)	St/pf	St asaoka (mm)
0	0	0	0	0	0
1	86400	2,218,E-04	3,583,E-10	0,100	4,601
2	172800	2,218,E-04	3,583,E-10	0,191	8,771
3	259200	2,218,E-04	3,583,E-10	0,274	12,566
4	345600	2,218,E-04	3,583,E-10	0,350	16,052
5	432000	2,218,E-04	3,583,E-10	0,418	19,206

Tabel 4.34 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 30 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	St asaoka (mm)	St lab (mm)	St PVD smear zone (mm)
0	0	0	0
1	4,601	1,580	3,574
2	8,771	2,757	5,073
3	12,566	4,377	6,172
4	16,052	6,955	7,044
5	19,206	9,100	7,760
Waktu konsolidasi (jam)	42,671	95,548	95,251





Gambar 4.15 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi Jarak PVD 30 cm Pola Segiempat

Jadi, untuk analisis Asaoka, waktu penurunan yang diperlukan untuk mencapai penurunan target 6,824 mm selama 5 hari dari perhitungan Terzaghi adalah 42,671 jam, waktu penurunan laboratorium selama 95,548 jam, dan waktu penurunan analisis PVD selama 95,251 jam.

4.4.5 Jarak PVD Pola Segitiga

- Jarak 20 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan penurunan konsolidasi tanah terhadap waktu pengujian menggunakan PVD dengan jarak antar PVD 20 cm.

Tabel 4.35 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Jarak PVD 20 cm Pola Segitiga

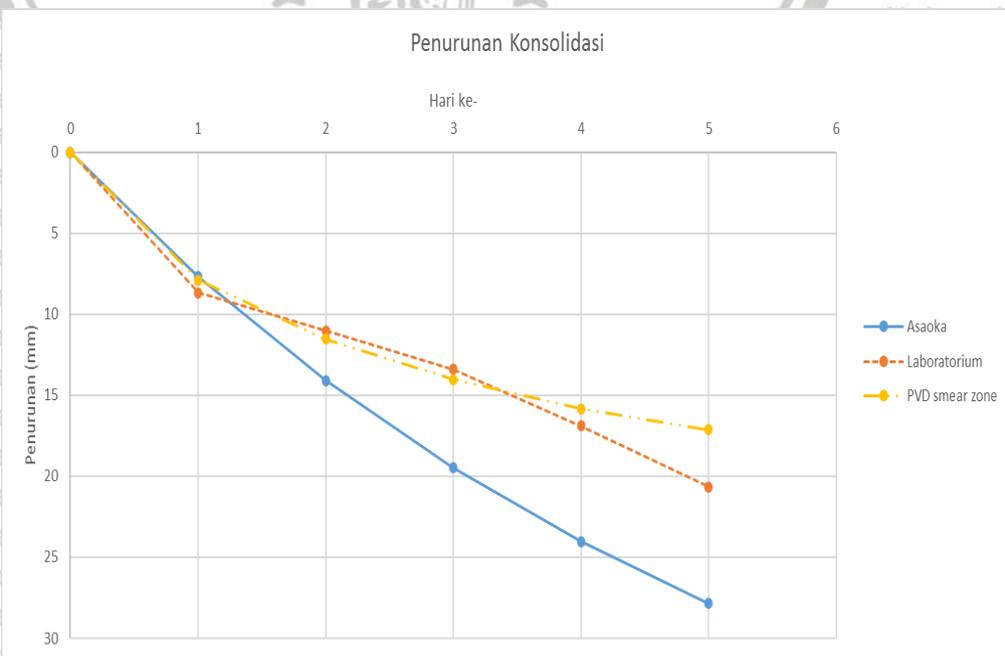
Waktu (hari)	Tv	Uv	Th	x	Uh	U	St (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,053	0,259	0,215	0,182	0,166	38,2%	7,883
2	0,105	0,366	0,429	0,363	0,305	55,9%	11,541
3	0,158	0,448	0,644	0,545	0,420	68,0%	14,037
4	0,210	0,518	0,859	0,727	0,516	76,7%	15,826
5	0,263	0,579	1,074	0,908	0,597	83,0%	17,134

Tabel 4.36 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 20 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	Waktu (detik)	Cv (cm ² /s)	Ch (cm ² /s)	St/pf	St asaoka (mm)
0	0	0	0	0	0
1	86400	3,929,E-04	4,718,E-11	0,174	7,674
2	172800	3,929,E-04	4,718,E-11	0,321	14,106
3	259200	3,929,E-04	4,718,E-11	0,443	19,483
4	345600	3,929,E-04	4,718,E-11	0,546	24,027
5	432000	3,929,E-04	4,718,E-11	0,633	27,836

Tabel 4.37 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 20 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	St asaoka (mm)	St lab (mm)	St PVD smear zone (mm)
0	0	0	0
1	7,674	8,680	7,883
2	14,106	11,025	11,541
3	19,483	13,415	14,037
4	24,027	16,879	15,826
5	27,836	20,641	17,134
Waktu konsolidasi (jam)	21,342	18,868	20,775



Gambar 4.16 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 20 cm Pola Segitiga

Jadi, untuk analisis Asaoka, waktu penurunan yang diperlukan untuk mencapai penurunan target 6,824 mm selama 5 hari dari perhitungan Terzaghi adalah selama 21,342 jam, waktu penurunan laboratorium selama 18,868 jam, dan waktu penurunan analisis PVD selama 20,775 jam.

- Jarak 25 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan penurunan konsolidasi tanah terhadap waktu pengujian menggunakan PVD dengan jarak antar PVD 25 cm.

Tabel 4.38 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Jarak PVD 25 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	Tv	Uv	Th	x	Uh	U	St (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,113	0,380	0,003	0,001	0,001	38,0%	7,293
2	0,226	0,537	0,006	0,003	0,003	53,8%	10,315
3	0,339	0,657	0,009	0,004	0,000	60,0%	11,502
4	0,453	0,759	0,012	0,006	0,006	70,0%	13,419
5	0,566	0,849	0,015	0,007	0,007	80,0%	15,336

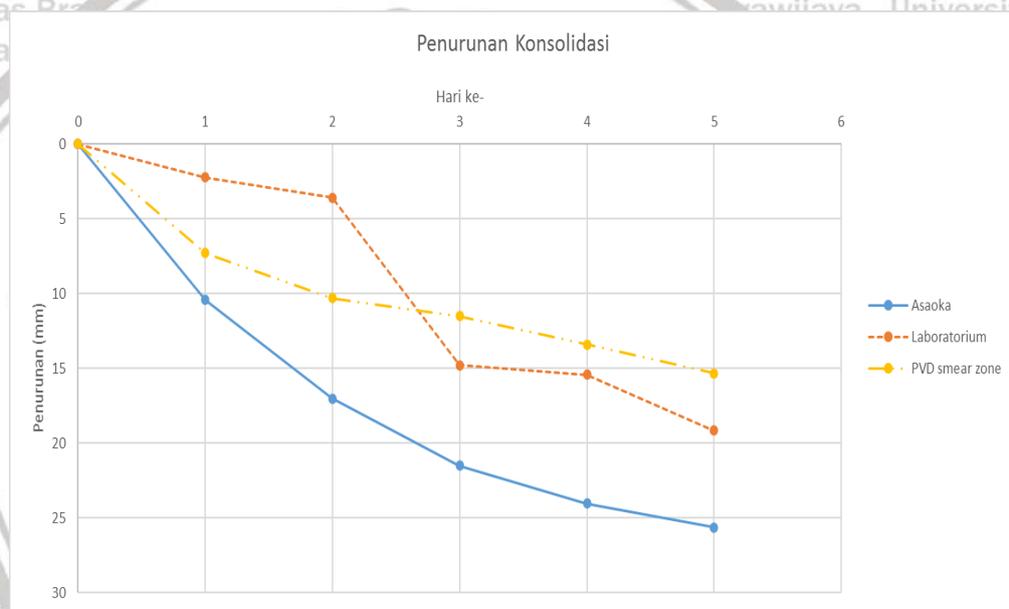
Tabel 4.39 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 25 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	Waktu (detik)	Cv (cm ² /s)	Ch (cm ² /s)	St/pf	St asaoka (mm)
0	0	0	0	0	0
1	86400	9,761,E-04	7,973,E-10	0,372	10,424
2	172800	9,761,E-04	7,973,E-10	0,608	17,015
3	259200	9,761,E-04	7,973,E-10	0,768	21,500
4	345600	9,761,E-04	7,973,E-10	0,858	24,023
5	432000	9,761,E-04	7,973,E-10	0,916	25,641



Tabel 4.40 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 25 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	St asaoka (mm)	St lab (mm)	St PVD smear zone (mm)
0	0	0	0
1	10,424	2,240	7,293
2	17,015	3,602	10,315
3	21,500	14,801	11,502
4	24,023	15,428	13,419
5	25,641	19,170	15,336
Waktu konsolidasi (jam)	15,711	56,899	22,456



Gambar 4.17 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 25 cm Pola Segitiga

Jadi, untuk analisis Asaoka, waktu penurunan yang diperlukan untuk mencapai penurunan target 6,824 mm selama 5 hari dari perhitungan Terzaghi adalah selama 15,711 jam, waktu penurunan laboratorium selama 56,899 jam, dan waktu penurunan analisis PVD selama 22,456 jam.

- Jarak 30 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan penurunan konsolidasi tanah terhadap waktu pengujian menggunakan PVD dengan jarak antar PVD 30 cm.

Tabel 4.41 Analisis Hubungan Penurunan PVD Terhadap Waktu Konsolidasi dengan Mempertimbangkan Smear Zone pada Jarak PVD 30 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	Tv	Uv	Th	x	Uh	U	St (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,202	0,507	0,367	0,119	0,112	56,2%	10,085
2	0,404	0,717	0,733	0,237	0,211	77,7%	13,935
3	0,606	0,878	1,100	0,356	0,299	91,5%	16,408
4	0,808	1,014	1,466	0,474	0,378	100,0%	17,935
5	1,010	1,134	1,833	0,593	0,447	100,0%	17,935

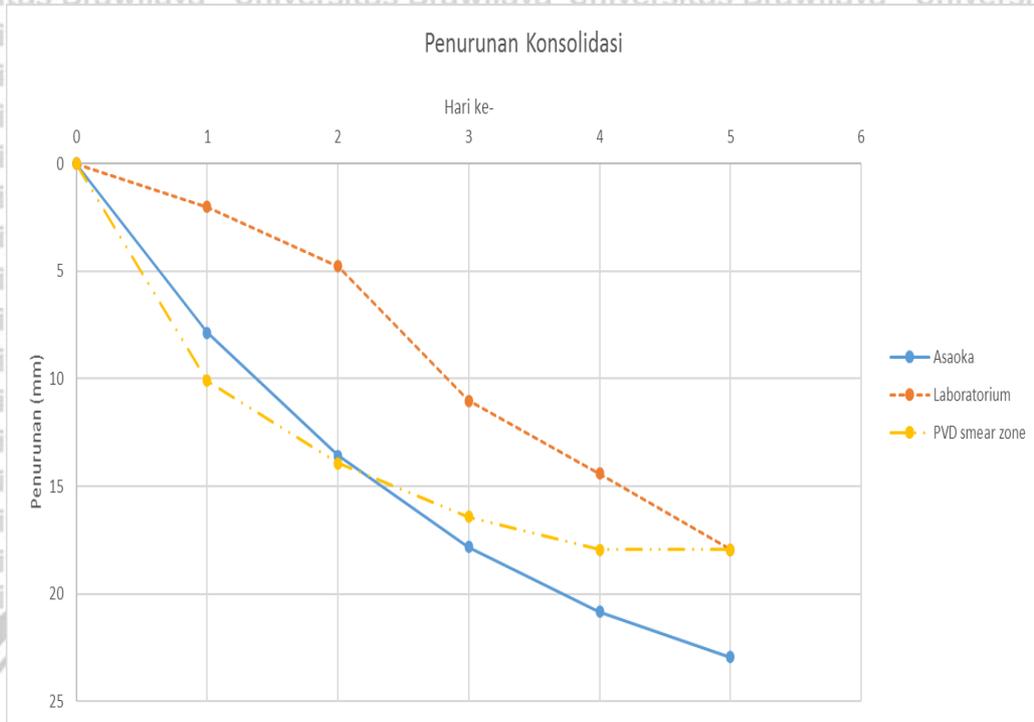
Tabel 4.42 Analisis Hubungan Penurunan Asaoka Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 30 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	Waktu (detik)	Cv (cm ² /s)	Ch (cm ² /s)	St/pf	St asaoka (mm)
0	0	0	0	0	0
1	86400	7,001,E-04	9,705,E-10	0,284	7,855
2	172800	7,001,E-04	9,705,E-10	0,490	13,570
3	259200	7,001,E-04	9,705,E-10	0,644	17,829
4	345600	7,001,E-04	9,705,E-10	0,752	20,817
5	432000	7,001,E-04	9,705,E-10	0,829	22,947

Tabel 4.43 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 30 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	St asaoka (mm)	St lab (mm)	St PVD smear zone (mm)
0	0	0	0
1	7,855	2,020	10,085
2	13,570	4,780	13,935
3	17,829	11,024	16,408
4	20,817	14,415	17,935
5	22,947	17,935	17,935
Waktu konsolidasi (jam)	20,850	57,144	16,240



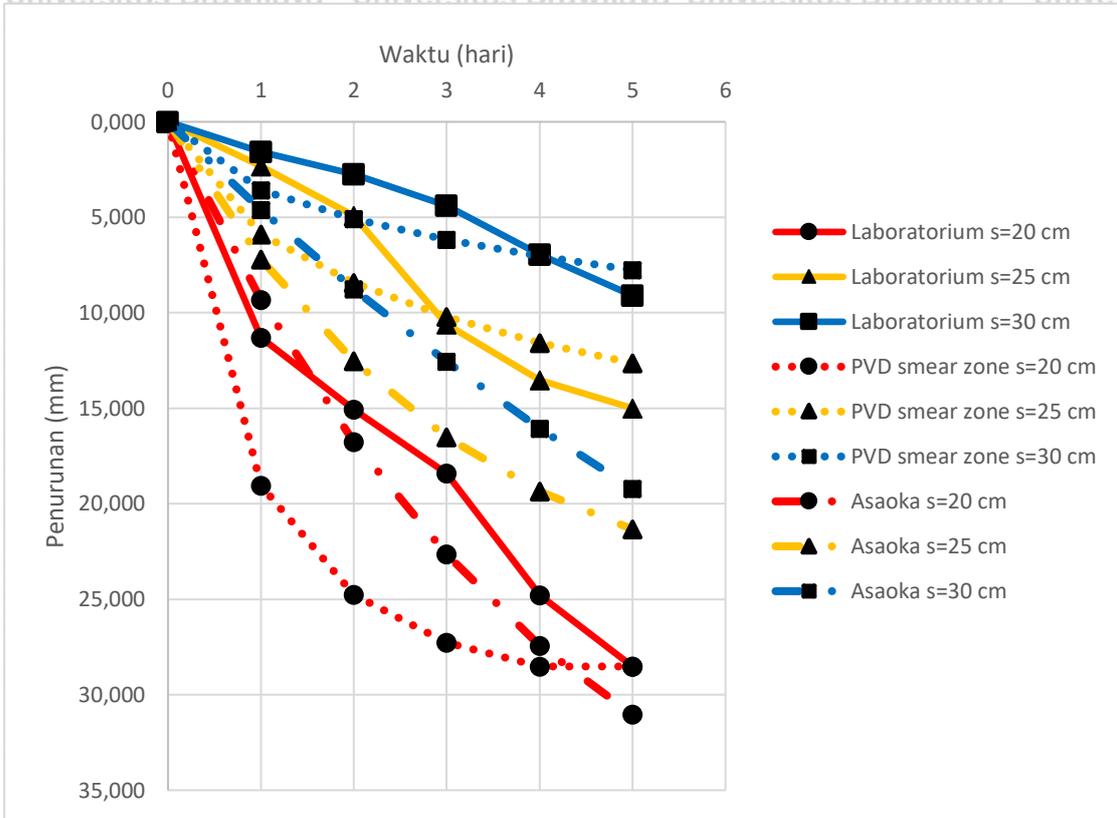


Gambar 4.18 Perbandingan Nilai Penurunan Terhadap Waktu Konsolidasi Jarak PVD 30 cm Pola Segitiga

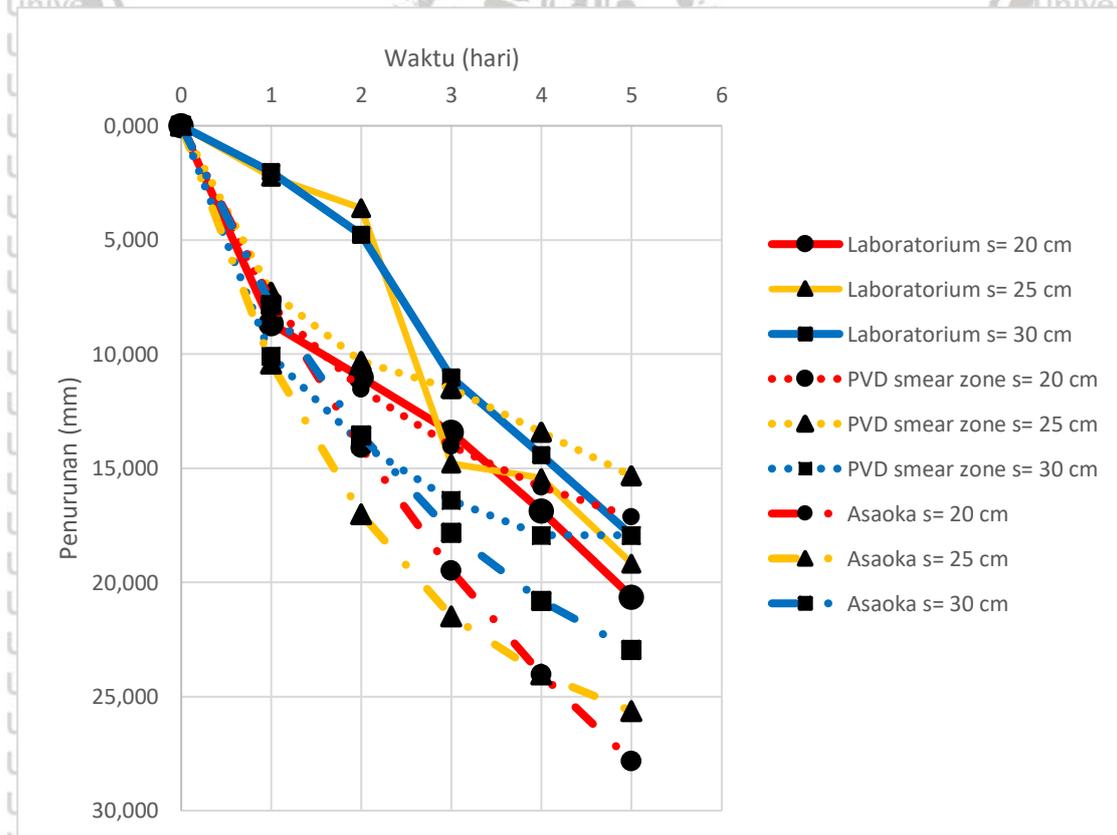
Jadi, untuk analisis Asaoka, waktu penurunan yang diperlukan untuk mencapai penurunan target 6,824 mm selama 5 hari dari perhitungan Terzaghi adalah selama 20,85 jam, waktu penurunan laboratorium selama 57,144 jam, dan waktu penurunan analisis PVD selama 16,24 jam.

4.4.6 Perbandingan Penurunan Beda Pola

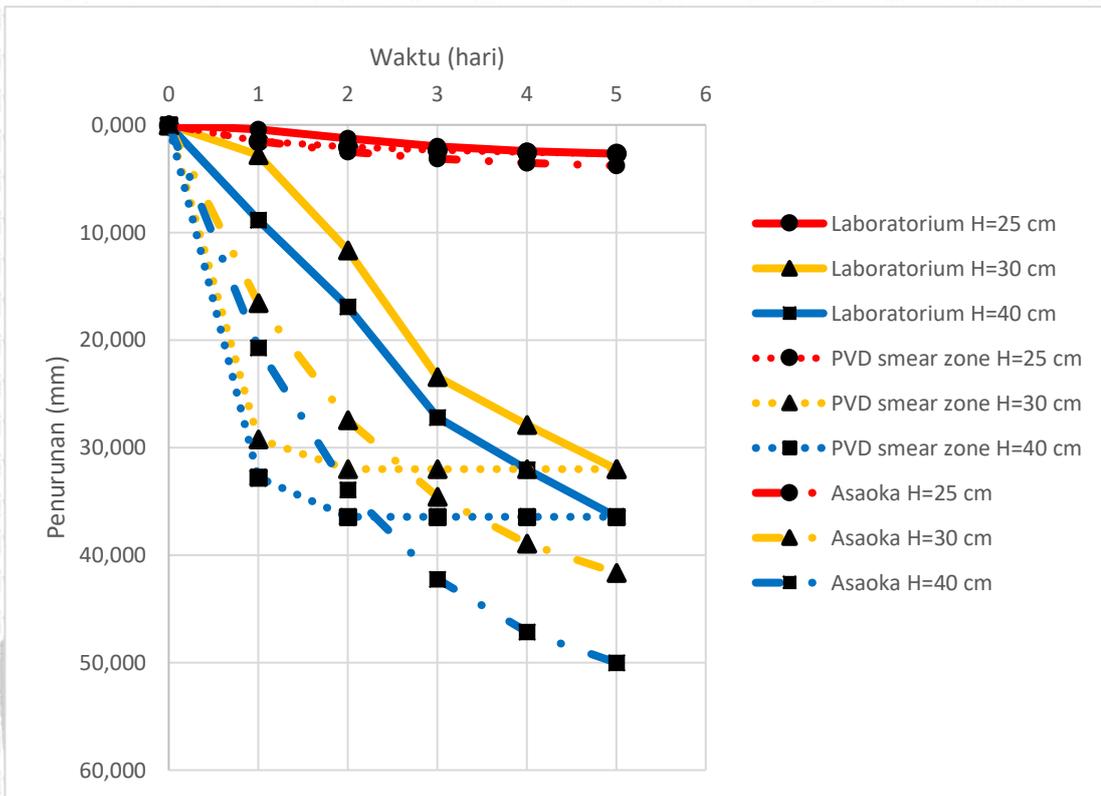
Berikut ini merupakan perbandingan hasil analisis antara penurunan laboratorium, penurunan PVD dengan memperhitungkan *smear zone*, dan penurunan Asaoka yang ditinjau terhadap perbedaan variasi pola PVD yang digunakan.



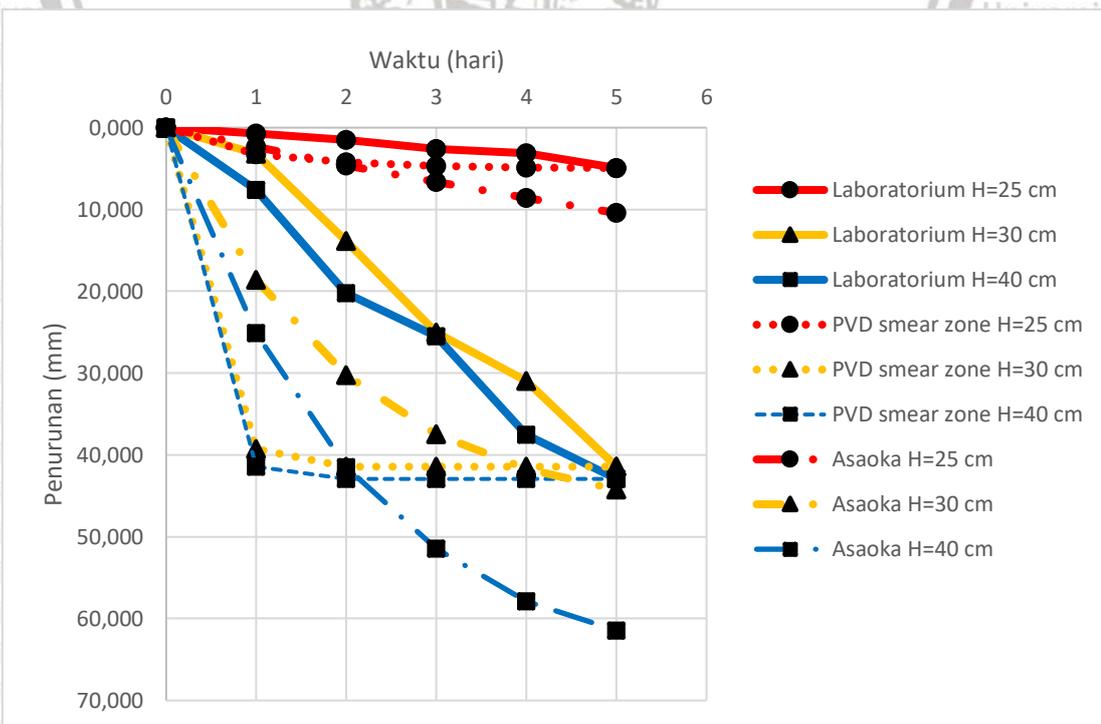
Gambar 4.19 Perbandingan Nilai Penurunan Dengan Variasi Jarak dan Pola Segiempat



Gambar 4.20 Perbandingan Nilai Penurunan Dengan Variasi Jarak dan Pola Segitiga



Gambar 4.21 Perbandingan Nilai Penurunan Dengan Variasi Kedalaman dan Pola Segiempat



Gambar 4.22 Perbandingan Nilai Penurunan Dengan Variasi Kedalaman dan Pola Segitiga



Kemudian, dilakukan rekapitulasi terhadap keseluruhan nilai penurunan dan waktu konsolidasi sebagai berikut:

Tabel 4.44 Rekapitulasi Nilai Penurunan Seluruh Box Uji Konsolidasi

No	Box Konsolidasi	Penurunan lab (mm)	Penurunan PVD smear zone (mm)	Penurunan Asaoka (mm)
1	60x60 tanpa PVD	1,851	6,824 (Acuan Terzaghi)	2,202
2	50x50 H=25 segiempat	2,682	2,659	3,805
3	60x60 H=30 segiempat	32,008	32,008	41,644
4	60x60 H=40 segiempat	36,444	36,444	50,003
5	50x50 H=25 segitiga	4,927	4,927	10,430
6	60x60 H=30 segitiga	41,418	41,430	44,232
7	60x60 H=40 segitiga	42,926	42,926	61,448
8	60x60 s=20 segiempat	28,519	28,519	31,040
9	50x50 s=25 segiempat	14,997	12,636	21,340
10	60x60 s=30 segiempat	9,100	7,760	19,206
11	60x60 s=20 segitiga	20,641	17,134	27,836
12	50x50 s=25 segitiga	19,170	15,336	25,641
13	60x60 s=30 segitiga	17,935	17,935	22,947

Dari Tabel di atas, dapat diketahui bahwa waktu penurunan terkecil serta penurunan terbesar dari keseluruhan box uji konsolidasi adalah box konsolidasi 60x60x55 cm³ dengan PVD berpola segitiga serta variasi kedalaman 40 cm, dimana waktu penurunan yang dibutuhkan untuk menyelesaikan nilai penurunan konsolidasi sampel acuan Terzaghi sebesar 3,945 jam. Lalu, besarnya penurunan saat akhir konsolidasi adalah sebesar 42,926 mm untuk penurunan PVD dengan analisis *smear zone* dan penurunan aktual di laboratorium serta 61,448 mm untuk penurunan dengan analisis Asaoka.

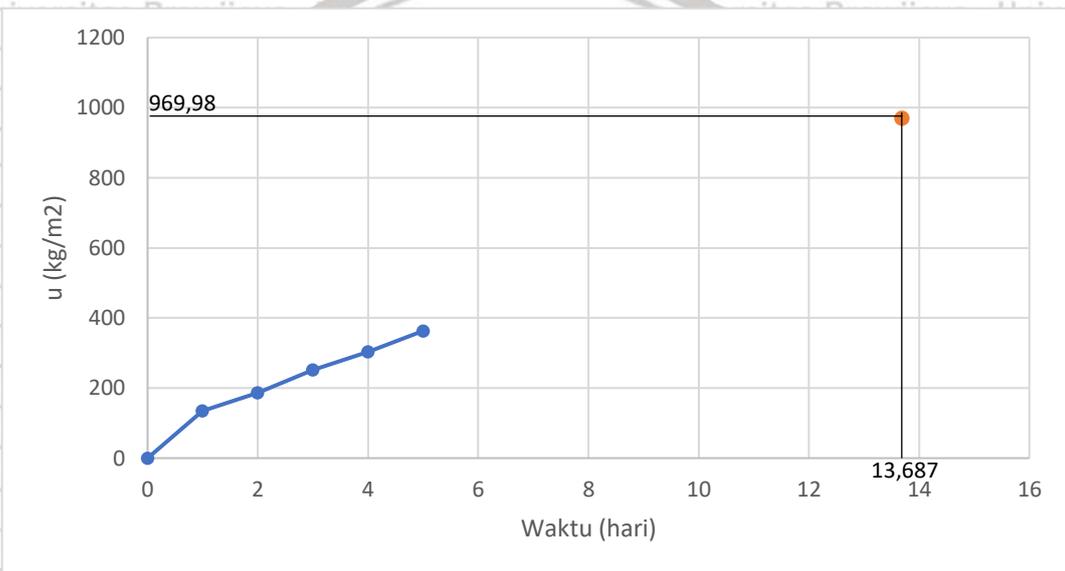
4.5 Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu

4.5.1 Tanpa PVD

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan penurunan konsolidasi tanah terhadap waktu pengujian tanpa PVD.

Tabel 4.45 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Tanpa PVD

Waktu (hari)	Tinggi Piezometer (m)	u_i (kg/m ²)	u (kg/m ²)	U
0	0,136	0	0	0,00%
1	0,19	136	134,226	1,30%
2	0,257	190	186,491	1,85%
3	0,312	257	251,182	2,26%
4	0,374	312	303,839	2,62%
5	0,338	374	363,055	2,93%



Gambar 4.23 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi Tanpa PVD

Jadi, saat penurunan acuan dari perhitungan rumus Terzaghi sebesar 6,824 mm terjadi, tegangan air pori berada pada posisi 969,98 kg/m² dengan waktu penurunan sebesar 13,867 hari.

4.5.2 Panjang PVD Pola Segiempat

- Kedalaman 25 cm

Rumus perhitungan tegangan air pori adalah sebagai berikut:

$$u_i = h \gamma_w$$

$$u = (1-U)u_i$$

Keterangan:

h= tinggi air di piezometer (m)



γ_w = berat isi air (kg/m^3)

u_i = kelebihan tegangan air pori tepat setelah tegangan diberikan pada tanah (kg/m^2)

u = kelebihan tegangan air pori pada waktu tertentu saat konsolidasi masih berlangsung (kg/m^2)

U = derajat konsolidasi (%)

Berdasarkan perhitungan untuk hari pertama pada kedalaman PVD 25 cm, didapatkan:

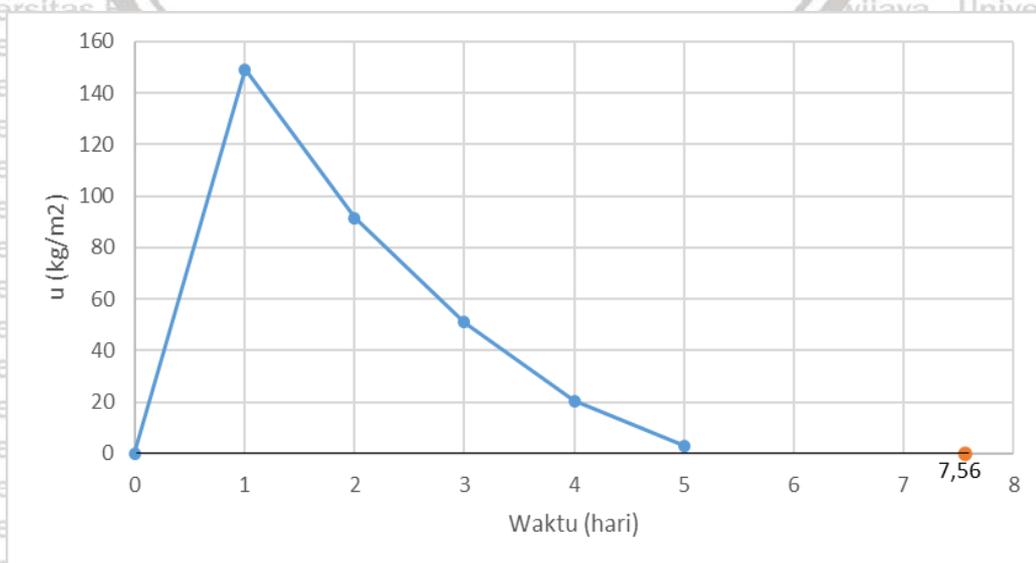
$$u_i = h\gamma_w = 0,34(1000) = 340 \text{ kg/m}^2$$

$$u = (1-U)u_i = (1-56,12\%)(340) = 149,181 \text{ kg/m}^2$$

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan tegangan air pori tanah terhadap waktu konsolidasi menggunakan PVD dengan panjang PVD 25 cm.

Tabel 4.46 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	Tinggi Piezometer (m)	u_i (kg/m^2)	u (kg/m^2)	U
0	0	0	0	0,00%
1	0,34	340	149,364	56,07%
2	0,396	396	92,143	76,73%
3	0,45	450	52,272	88,38%
4	0,455	455	21,856	95,20%
5	0,545	545	4,639	99,15%



Gambar 4.24 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segiempat

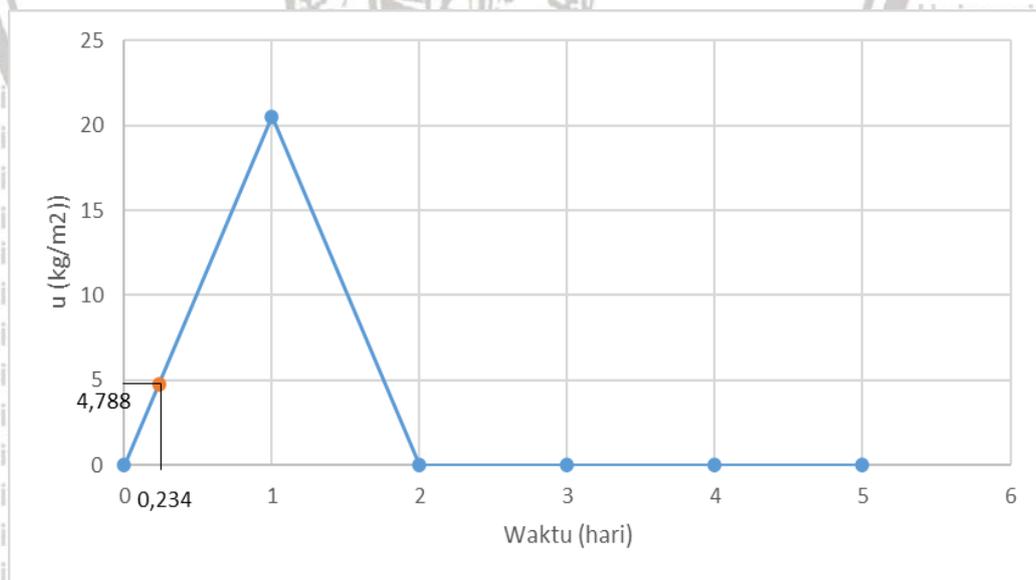
Jadi, saat penurunan acuan dari perhitungan rumus Terzaghi sebesar 6,824 mm terjadi, tegangan air pori berada pada posisi 0 kg/m² dengan waktu penurunan sebesar 7,56 hari.

- Kedalaman 30 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan tegangan air pori tanah terhadap waktu konsolidasi menggunakan PVD dengan kedalaman PVD 30 cm.

Tabel 4.47 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	Tinggi Piezometer (m)	u _i (kg/m ²)	u (kg/m ²)	U
0	0	0	0	0,00%
1	0,269	235	20,498	91,28%
2	0,36	275	0	100,00%
3	0,495	355	0	100,00%
4	0,535	415	0	100,00%
5	0,49	440	0	100,00%



Gambar 4.25 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segiempat

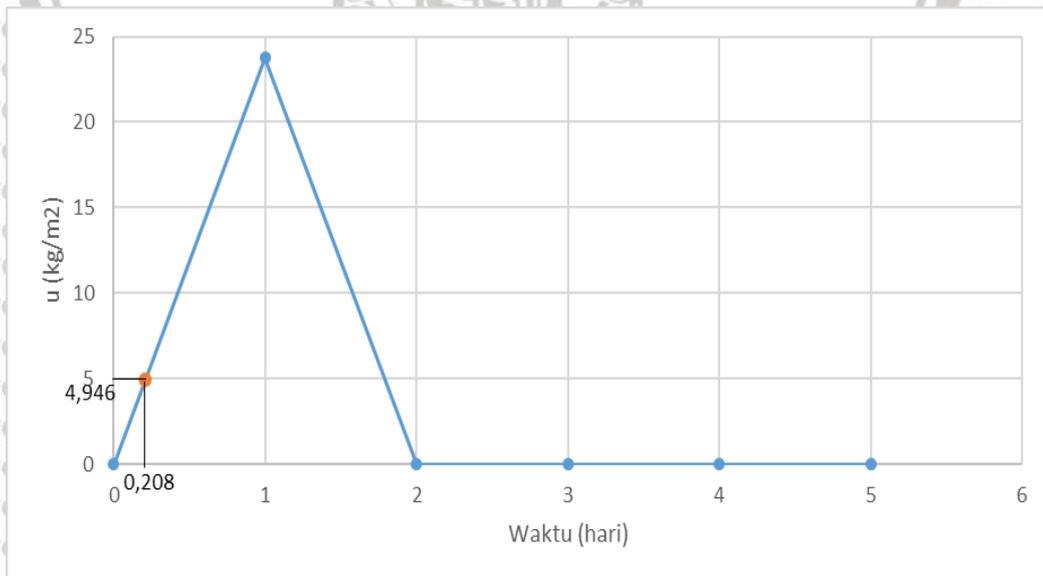
Jadi, saat penurunan acuan dari perhitungan rumus Terzaghi sebesar 6,824 mm terjadi, tegangan air pori berada pada posisi 4,788 kg/m² dengan waktu penurunan sebesar 0,234 hari.

- Kedalaman 40 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan tegangan air pori tanah terhadap waktu konsolidasi menggunakan PVD dengan kedalamanr PVD 40 cm.

Tabel 4.48 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	Tinggi Piezometer (m)	ui (kg/m2)	u (kg/m2)	U
0	0	0	0	0,0%
1	0,235	235	23,747	89,9%
2	0,275	275	0	100,0%
3	0,355	355	0	100,0%
4	0,415	415	0	100,0%
5	0,440	440	0	100,0%



Gambar 4.26 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segiempat

Jadi, saat penurunan acuan dari perhitungan rumus Terzaghi sebesar 6,824

mm terjadi, tegangan air pori berada pada posisi 4,946 kg/m² dengan waktu penurunan sebesar 0,208 hari.

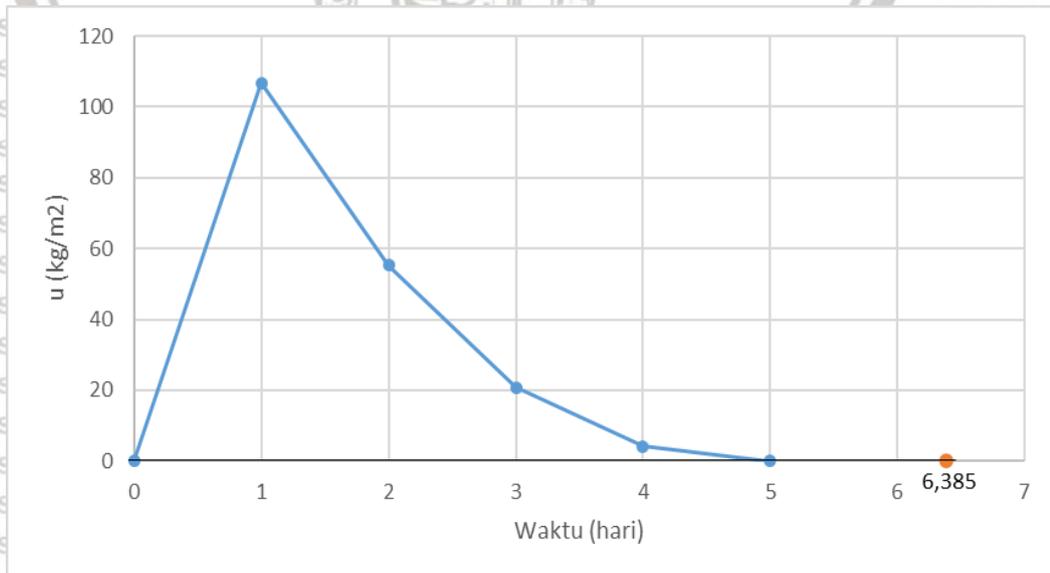
4.5.3 Panjang PVD Pola Segitiga

- Kedalaman 25 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan tegangan air pori tanah terhadap waktu konsolidasi menggunakan PVD dengan panjang PVD 25 cm.

Tabel 4.49 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	Tinggi Piezometer (m)	ui (kg/m ²)	u (kg/m ²)	U
0	0	0	0	0%
1	0,31	310	106,698	65,58%
2	0,3915	391,5	55,254	85,89%
3	0,416	416	20,841	94,99%
4	0,45	450	4,253	99,05%
5	0,48	480	0	100%



Gambar 4.27 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 25 cm Pola Segitiga



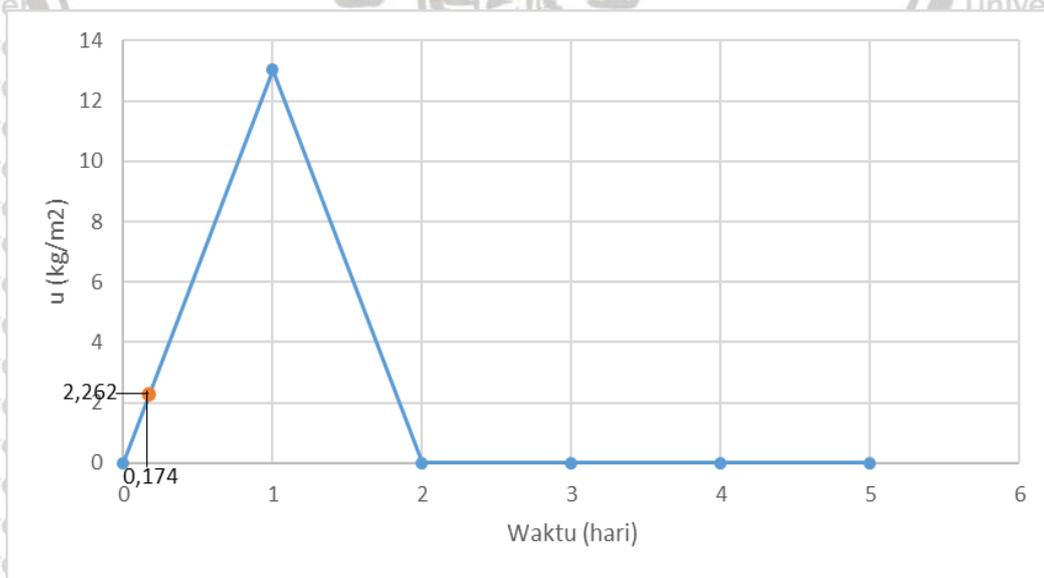
Jadi, saat penurunan acuan dari perhitungan rumus Terzaghi sebesar 6,824 mm terjadi, tegangan air pori berada pada posisi 0 kg/m² dengan waktu penurunan sebesar 6,385 hari.

- Kedalaman 30 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan tegangan air pori tanah terhadap waktu konsolidasi menggunakan PVD dengan panjang PVD 30 cm.

Tabel 4.50 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	Tinggi Piezometer (m)	u _i (kg/m ²)	u (kg/m ²)	U
0	0	0	0	0%
1	0,254	254	13,023	94,87%
2	0,345	345	0	100,00%
3	0,465	465	0	100%
4	0,555	555	0	100%
5	0,51	510	0	100%



Gambar 4.28 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segitiga

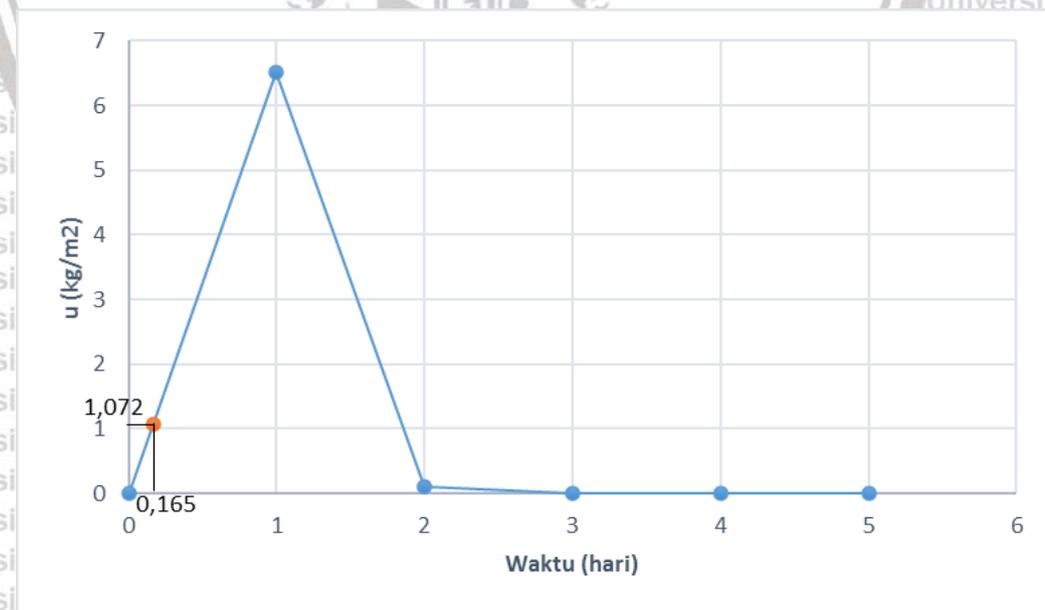
Jadi, saat penurunan acuan dari perhitungan rumus Terzaghi sebesar 6,824 mm terjadi, tegangan air pori berada pada posisi 2,262kg/m² dengan waktu penurunan sebesar 0,174 hari.

- Kedalaman 40 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan tegangan air pori tanah terhadap waktu konsolidasi menggunakan PVD dengan panjang PVD 40 cm.

Tabel 4.51 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	Tinggi Piezometer (m)	u _i (kg/m ²)	u (kg/m ²)	U
0	0	0	0	0,000%
1	0,19	190	6,5111	96,573%
2	0,23	230	0,0995	99,957%
3	0,325	325	0	100%
4	0,415	415	0	100%
5	0,49	490	0	100%



Gambar 4.29 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 40 cm Pola Segitiga

Jadi, saat penurunan acuan dari perhitungan rumus Terzaghi sebesar 6,824 mm terjadi, tegangan air pori berada pada posisi 1,072 kg/m² dengan waktu penurunan sebesar 0,165 hari.

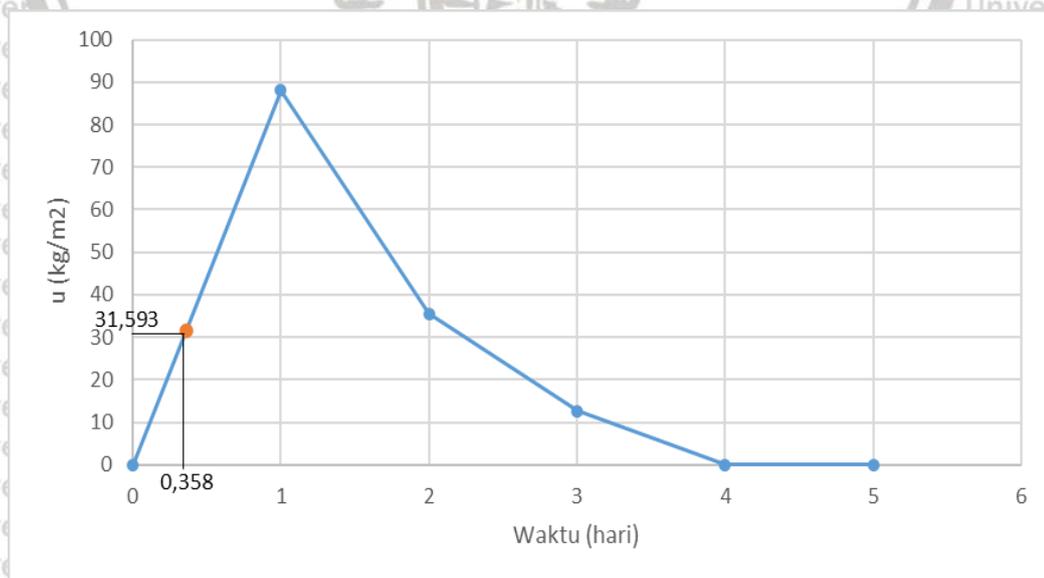
4.5.4 Jarak PVD Pola Segiempat

- Jarak 20 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan tegangan air pori tanah terhadap waktu konsolidasi menggunakan PVD dengan jarak antar PVD 20 cm.

Tabel 4.52 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Jarak PVD 20 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	Tinggi Piezometer (m)	u _i (kg/m ²)	u (kg/m ²)	U
0	0	0	0	0,00%
1	0,265	265	88,126	66,74%
2	0,27	270	35,472	86,86%
3	0,285	285	12,585	95,58%
4	0,4	400	0	100,00%
5	0,495	495	0	100,00%



Gambar 4.30 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 20 cm Pola Segiempat



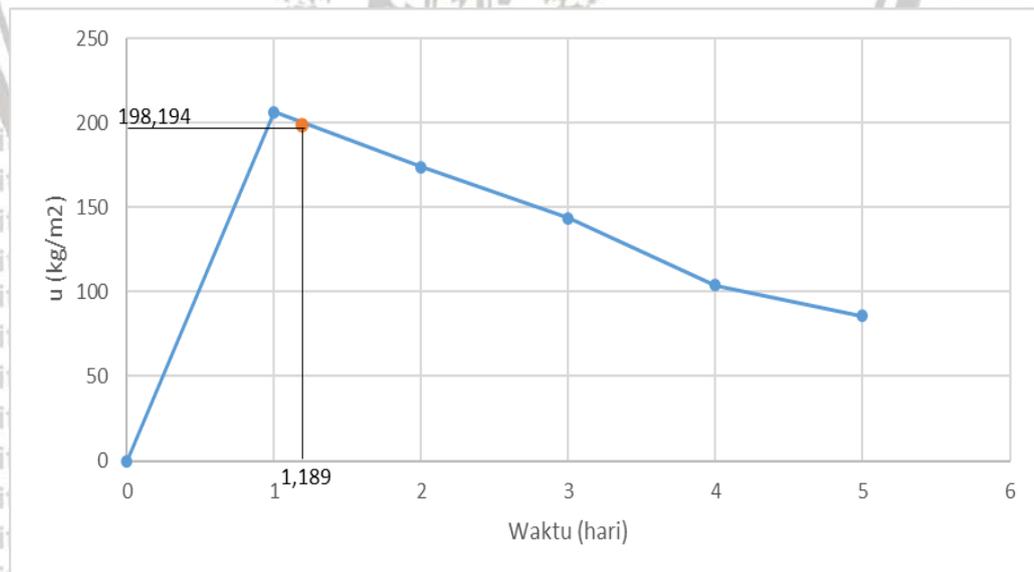
Jadi, saat penurunan acuan dari perhitungan rumus Terzaghi sebesar 6,824 mm terjadi, tegangan air pori berada pada posisi 31,593 kg/m² dengan waktu penurunan sebesar 0,358 hari.

- Jarak 25 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan tegangan air pori tanah terhadap waktu konsolidasi menggunakan PVD dengan jarak antar PVD 25 cm.

Tabel 4.53 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Jarak PVD 25 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	Tinggi Piezometer (m)	u _i (kg/m ²)	u (kg/m ²)	U
0	0	0	0	0,00%
1	0,31	340	206,280	39,33%
2	0,3915	396	173,721	56,13%
3	0,416	450	143,697	68,07%
4	0,45	455	103,971	77,15%
5	0,48	545	85,785	84,26%



Gambar 4.31 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 25 cm Pola Segiempat

Jadi, saat penurunan acuan dari perhitungan rumus Terzaghi sebesar 6,824 mm terjadi, tegangan air pori berada pada posisi 198,194 kg/m² dengan waktu penurunan sebesar 1,189 hari.

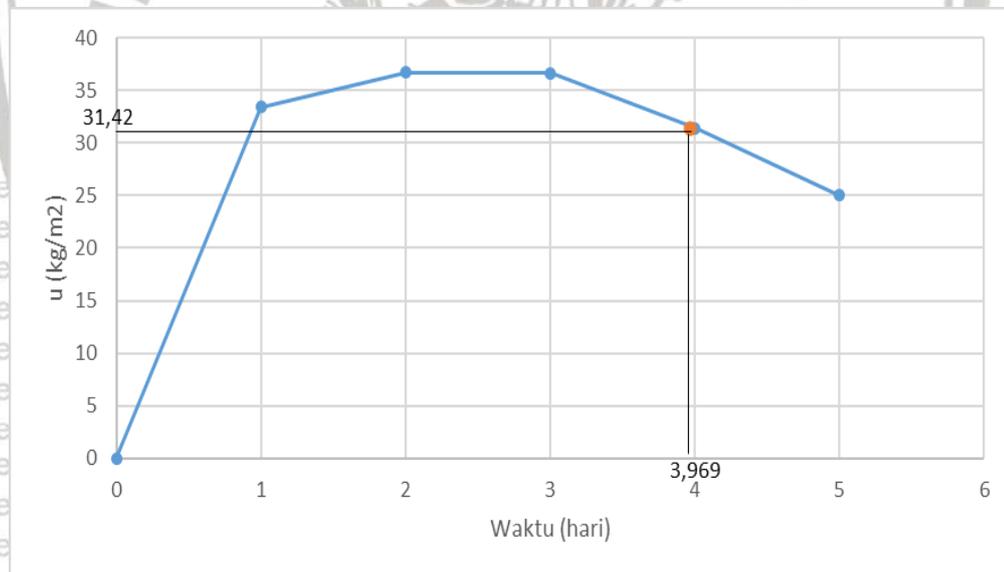


- Jarak 30 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan penurunan konsolidasi tanah terhadap waktu pengujian menggunakan PVD dengan jarak antar PVD 30 cm.

Tabel 4.54 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Jarak PVD 30 cm Pola Segiempat

Waktu (hari)	Tinggi Piezometer (m)	u_i (kg/m ²)	u (kg/m ²)	U
0	0	0	0	0,00%
1	0,055	55	33,401	39,27%
2	0,083	83	36,726	55,75%
3	0,114	114	36,677	67,83%
4	0,139	139	31,408	77,40%
5	0,17	170	25,041	85,27%



Gambar 4.32 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Kedalaman PVD 30 cm Pola Segiempat

Jadi, saat penurunan acuan dari perhitungan rumus Terzaghi sebesar 6,824 mm terjadi, tegangan air pori berada pada posisi 31,42 kg/m² dengan waktu penurunan sebesar 3,969 hari.



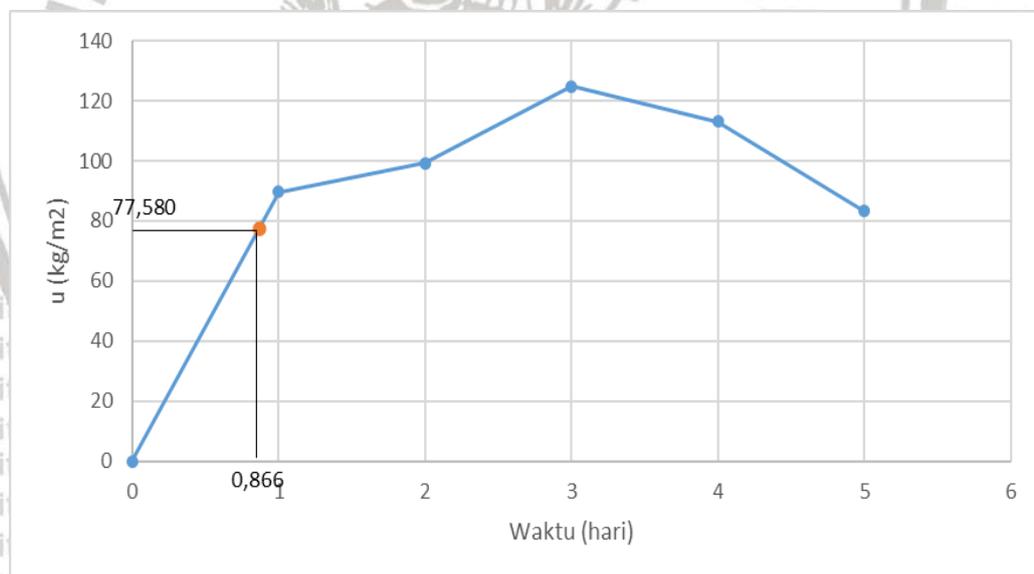
4.5.5 Jarak PVD Pola Segitiga

- Jarak 20 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan tegangan air pori tanah terhadap waktu konsolidasi menggunakan PVD dengan jarak antar PVD 20 cm.

Tabel 4.55 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Jarak PVD 20 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	Tinggi piezometer (m)	ui (kg/m ²)	u (kg/m ²)	U
0	0	0	0	0,00%
1	0,145	145	89,622	38,19%
2	0,225	225	99,196	55,91%
3	0,39	390	124,778	68,01%
4	0,485	485	113,134	76,67%
5	0,49	490	83,243	83,01%



Gambar 4.33 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 20 cm Pola Segitiga

Jadi, saat penurunan acuan dari perhitungan rumus Terzaghi sebesar 6,824 mm terjadi, tegangan air pori berada pada posisi 77,58 kg/m² dengan waktu penurunan sebesar 0,866 hari.

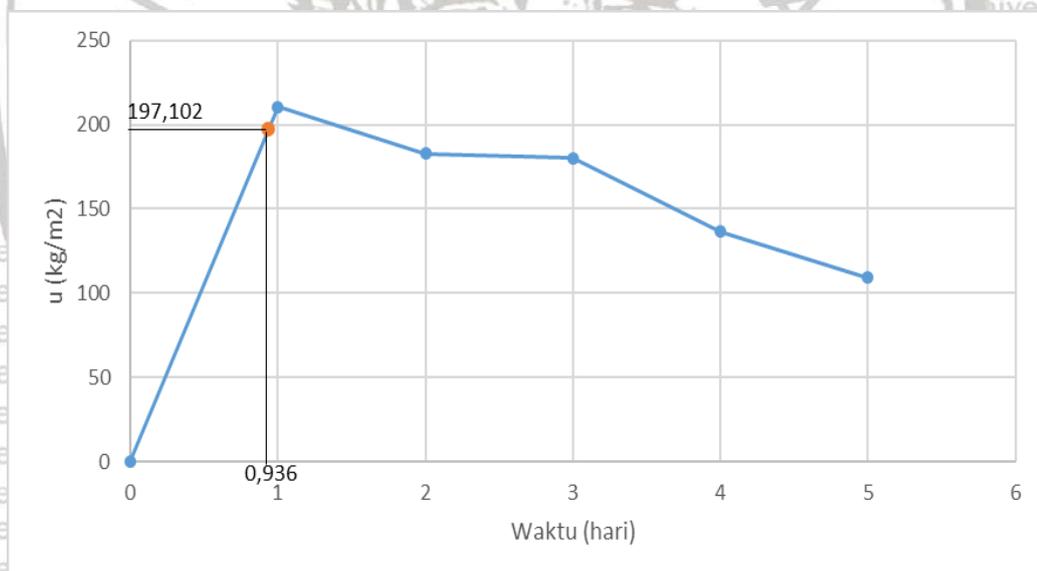


- Jarak 25 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan tegangan air pori tanah terhadap waktu konsolidasi menggunakan PVD dengan jarak antar PVD 25 cm.

Tabel 4.56 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Jarak PVD 25 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	Tinggi piezometer (m)	ui (kg/m ²)	u (kg/m ²)	U
0	0	0	0	0,00%
1	0,34	340	210,650	38,04%
2	0,396	396	182,914	53,81%
3	0,45	450	180,000	60,00%
4	0,455	455	136,500	70,00%
5	0,545	545	109,000	80,00%



Gambar 4.34 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 25 cm Pola Segitiga

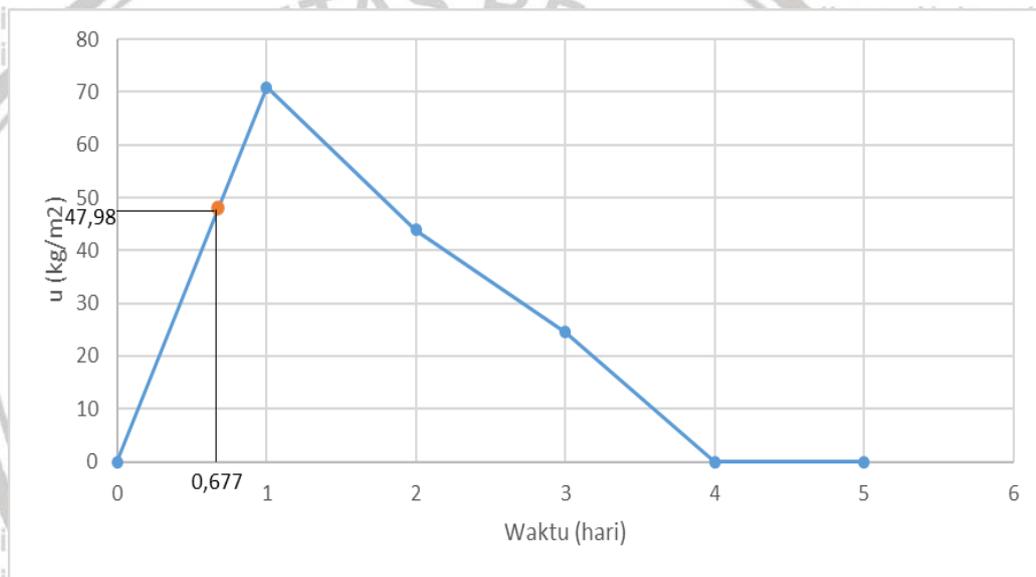
Jadi, saat penurunan acuan dari perhitungan rumus Terzaghi sebesar 6,824 mm terjadi, tegangan air pori berada pada posisi 197,102 kg/m² dengan waktu penurunan sebesar 0,936 hari.

- Jarak 30 cm

Berikut ini adalah hasil analisis hubungan penurunan konsolidasi tanah terhadap waktu pengujian menggunakan PVD dengan jarak antar PVD 30 cm.

Tabel 4.57 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu pada Jarak PVD 30 cm Pola Segitiga

Waktu (hari)	Tinggi Piezometer (m)	ui (kg/m ²)	u (kg/m ²)	U
0	0	0	0	0,00%
1	0,162	162	70,907	56,23%
2	0,197	197	43,936	77,70%
3	0,288	288	24,520	91,49%
4	0,373	373	0	100,00%
5	0,485	485	0	100,00%



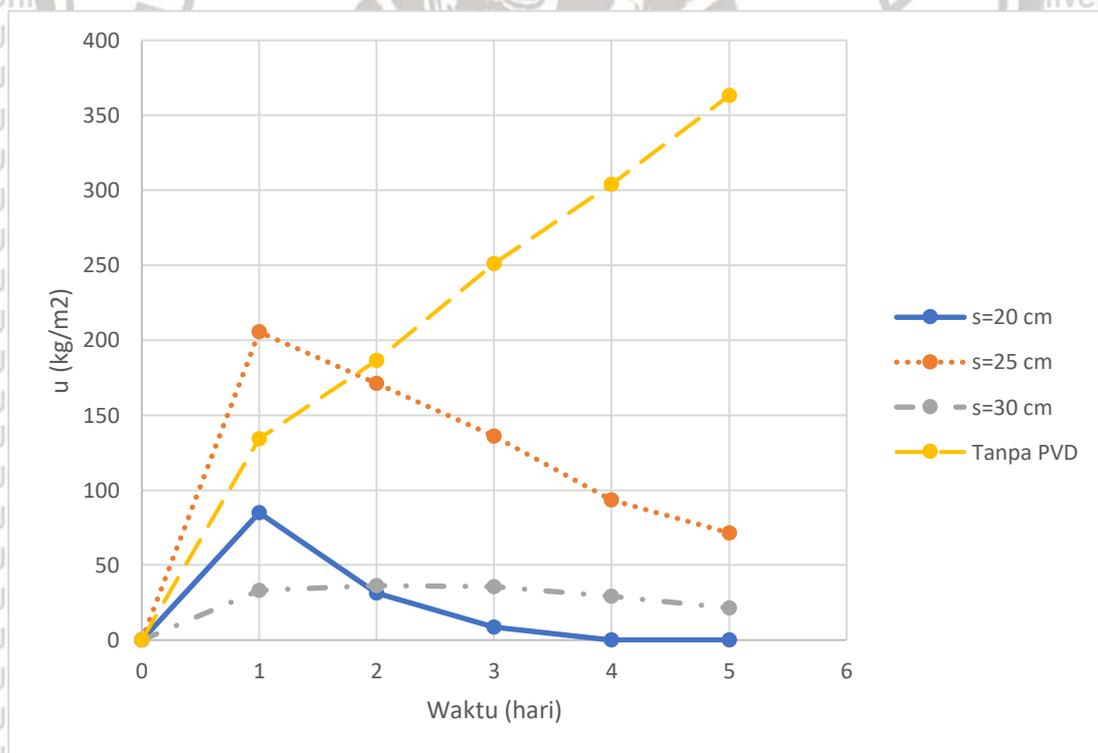
Gambar 4.35 Analisis Hubungan Tegangan Air Pori dan Waktu Konsolidasi pada Jarak PVD 30 cm Pola Segitiga

Jadi, saat penurunan acuan dari perhitungan rumus Terzaghi sebesar 6,824 mm terjadi, tegangan air pori berada pada posisi 47,98 kg/m² dengan waktu penurunan sebesar 0,677 hari.

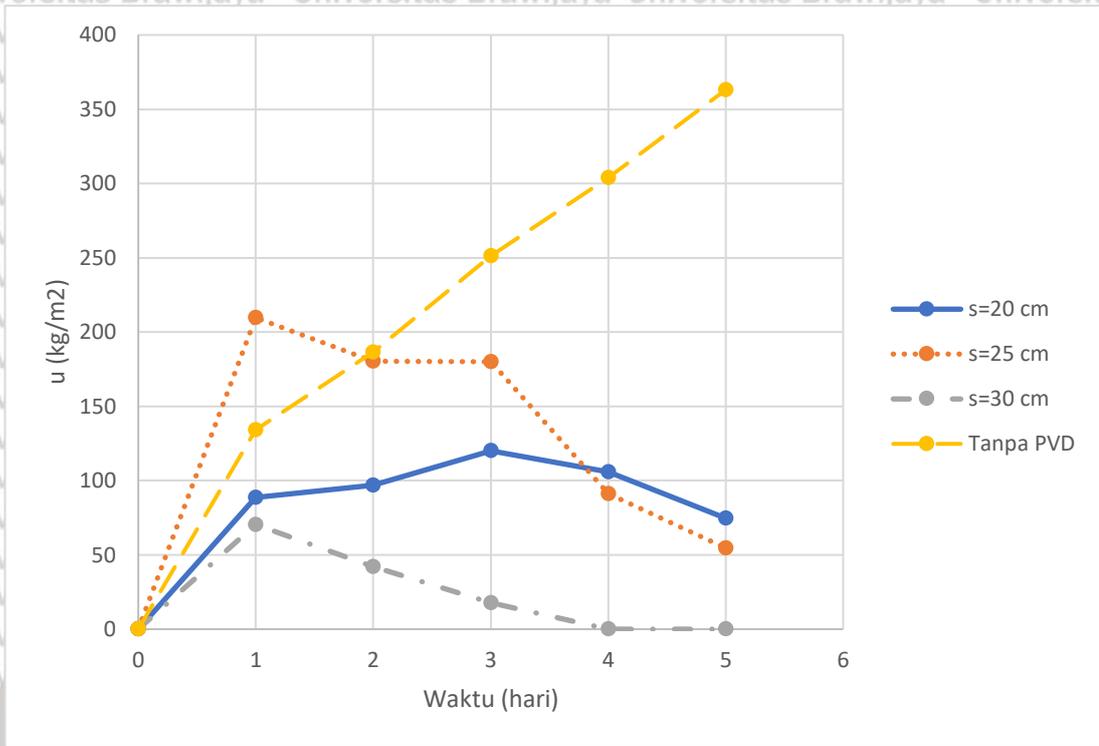
4.5.6 Perbandingan Tegangan Air Pori Beda Pola

Pengukuran tegangan air pori ini bertujuan untuk mengamati proses konsolidasi yang dilakukan dengan memasang piezometer di sepanjang kedalaman tanah. Tinggi air dalam piezometer menandakan nilai tegangan air pori di lokasi piezometer terpasang. Pada awal pembebanan, tegangan air pori seketika naik dikarenakan tegangan diseluruh bagian tanah bertambah, dan tanah akan mengalami penurunan segera. Saat proses konsolidasi terjadi, air akan mengalir keluar melalui piezometer sehingga tegangan air pori ini berangsur-angsur berkurang hingga akhirnya menjadi nol. Saat tegangan air pori ini nol konsolidasi dianggap telah selesai (dengan derajat konsolidasi 100%).

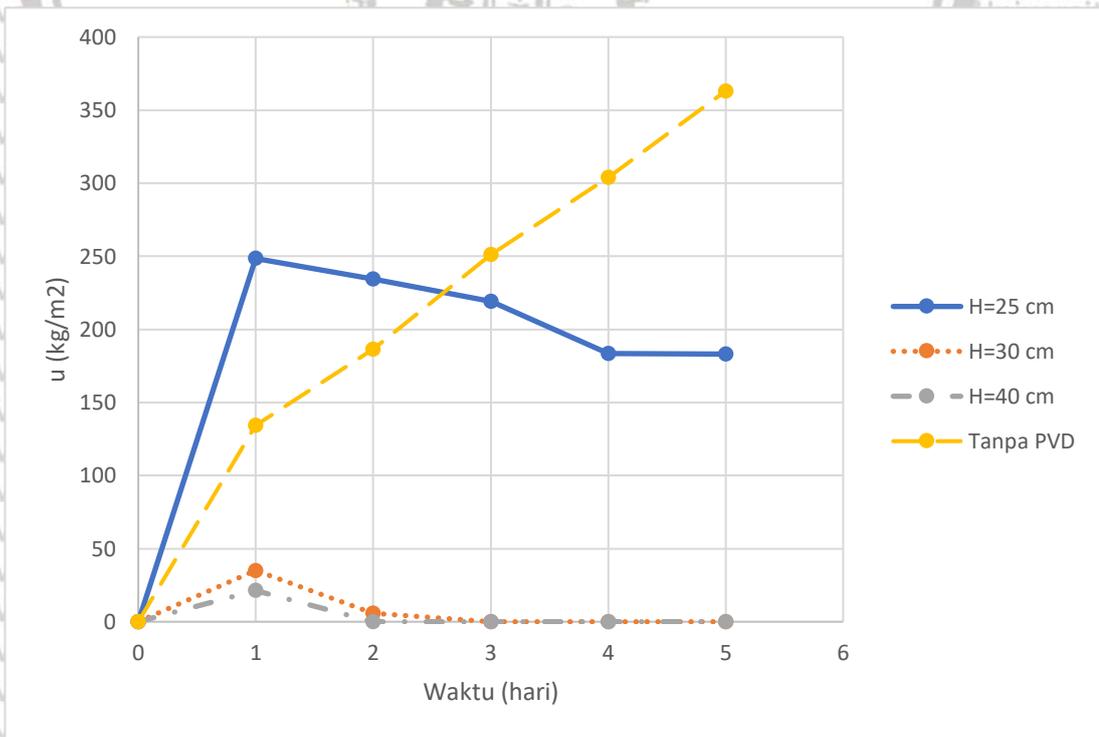
Berikut ini merupakan perbandingan hasil analisis tegangan air pori terhadap waktu konsolidasi yang ditinjau terhadap perbedaan variasi pola PVD yang digunakan.



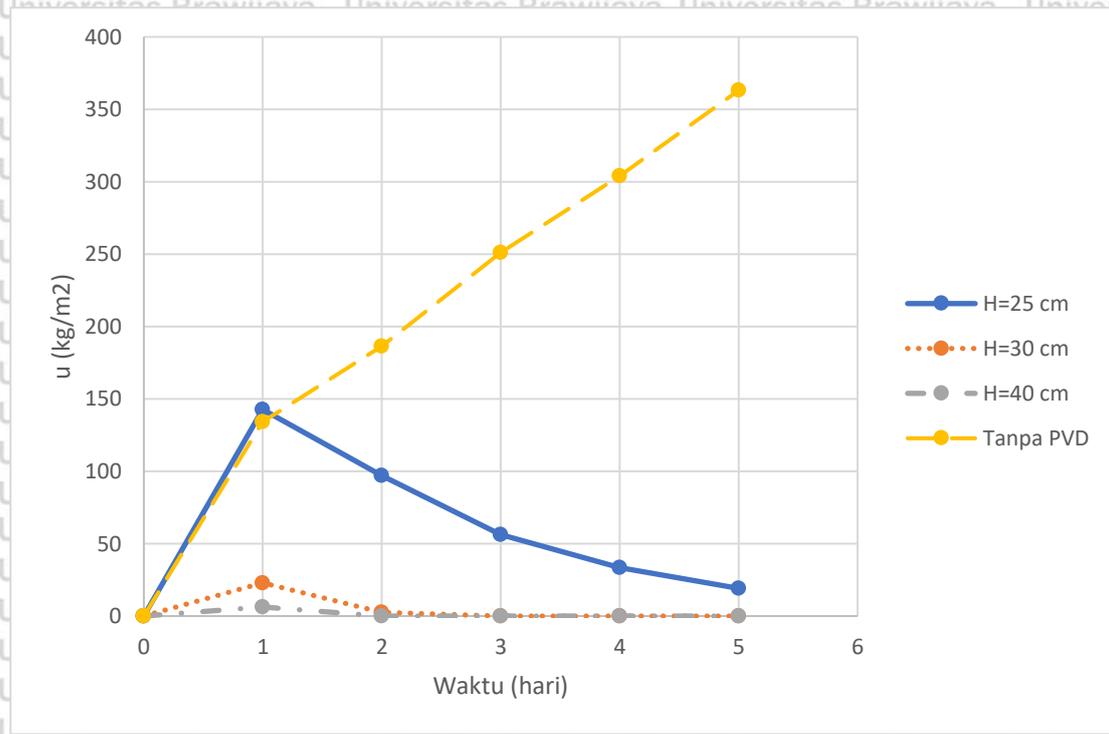
Gambar 4.36 Perbandingan Nilai Tegangan Air Pori Terhadap Waktu Konsolidasi Dengan Variasi Jarak dan Pola Segiempat



Gambar 4.37 Perbandingan Nilai Tegangan Air Pori Terhadap Waktu Konsolidasi Dengan Variasi Jarak dan Pola Segitiga



Gambar 4.38 Perbandingan Nilai Tegangan Air Pori Terhadap Waktu Konsolidasi Dengan Variasi Kedalaman dan Pola Segiempat



Gambar 4.39 Perbandingan Nilai Tegangan Air Pori Terhadap Waktu Konsolidasi Dengan Variasi Kedalaman dan Pola Segitiga

Dari keseluruhan data tegangan air pori, terlihat bahwa grafik tegangan air pori sampel tanpa PVD masih mengalami kenaikan, sementara grafik pada keseluruhan benda uji dengan penambahan PVD mulai mengalami penurunan pada rata-rata hari pertama hingga hari kedua pengujian. Hal ini disebabkan karena konsolidasi primer belum terjadi pada sampel tanpa PVD sehingga penurunannya dikategorikan ke dalam penurunan segera yang diakibatkan karena penambahan beban, sementara pada sampel dengan PVD konsolidasi primer sudah terjadi sehingga air dapat keluar dari rongga tanah dan tegangan air pori berkurang.

BAB V

PENUTUP

Pada bab ini, akan dipaparkan beberapa hasil penelitian serta diambil kesimpulan dan saran sebagai berikut:

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakteristik tanah yang berada di daerah Jalan Tol Pasuruan-Probolinggo adalah sebagai berikut.
 - Untuk data pengujian SPT, tanah bersifat sangat lunak dengan kedalaman tanah lunak sekitar 11 hingga 15 meter dari permukaan tanah dan berjenis tanah lanau kelempungan kepasiran.
 - Dari pengujian berat jenis (*specific gravity*/GS), didapatkan nilai sebesar 2,565 dimana tanah tergolong dalam tanah lanau menurut sistem klasifikasi *Unified Soil Classification System* (USCS).
 - Dari data batas Atterberg disimpulkan bahwa jenis sampel tanah berupa tanah lanau dengan sifat plastisitas yang tinggi.
2. Setelah pengujian konsolidasi, diketahui bahwa besar penurunan *benchmark* dengan metode Terzaghi pada box konsolidasi tanpa PVD setelah 5 hari pembebanan adalah sebesar 6,824 mm. Kemudian, dalam perhitungan penurunan dengan PVD mempertimbangkan *smear zone*, didapatkan bahwa variasi PVD dengan nilai penurunan terbesar serta waktu konsolidasi tercepat terhadap *benchmark* adalah variasi kedalaman PVD 40 cm berpola segitiga, dimana besar penurunan sebesar 42,926 mm dan waktu penurunan yang dibutuhkan untuk mencapai *benchmark* penurunan selama 3,945 jam.
3. Dari hasil pengujian konsolidasi, dapat disimpulkan bahwa nilai penurunan terbesar dan waktu penurunan tercepat pada tanah yang diteliti terhadap fungsi waktu menggunakan analisis Asaoka adalah pada variasi kedalaman PVD 40 cm berpola segitiga, dengan nilai penurunan Asaoka sebesar 61,448 mm dimana untuk mencapai penurunan *benchmark* hanya dalam kurun waktu 6,527 jam.

4. Berdasarkan hasil pengolahan data, didapatkan bahwa diantara perbedaan variasi PVD, nilai penurunan terbesar setelah 5 hari pembebanan adalah pada variasi kedalaman PVD 40 cm berpola segitiga. Hal tersebut dibuktikan dengan capaian penurunan aktual skala laboratorium sebesar 42,926 mm, kemudian penurunan dengan analisis PVD mempertimbangkan efek *smear zone* sebesar 42,926 mm, dan terakhir nilai penurunan dengan analisis Asaoka sebesar 61,448 mm.

5.2 Saran

Setelah dilakukan pembahasan terhadap hasil penelitian ini, maka dapat diusulkan beberapa saran sebagai wadah untuk penelitian lebih lanjut, diantaranya:

1. Dengan penambahan beban preloading serta jarak dan kedalaman PVD, maka dapat dihasilkan penurunan tanah yang lebih besar dan lebih cepat.
2. Perlu diadakannya penelitian preloading dengan PVD dan penelitian kuat geser tanah di lapangan agar dapat dibandingkan hasil di laboratorium dengan di lapangan.



DAFTAR PUSTAKA

- Arianto, T. 2010. *Studi Kuat Geser Tanah Lunak Dengan Metode Uji Geser Sudu Lapangan Dan Uji Geser Sudu Laboratorium*. Depok: Universitas Indonesia
- Asaoka, A., 1978, *Observational Procedure of Settlement Prediction, Soils and Foundation, No.4*
- Aspar, W., dan Fitriani, E. 2016. *Pengaruh Jarak dan Pola Prefabricated Vertical Drain (PVD) Pada Perbaikan Tanah Lempung Lunak*
- Bo et al., 2003. *Discharge capacity of prefabricated vertical drain and their field measurements, geotextiles and geomembranes*, 22 (1-2). Special Issue on Prefabricated Vertical Drains: 37-48
- Carrillo, N., "Simple Two and Threedimensional Cases in the Theory of Consolidation of Soils", *Journal of Mathematical Physics*, Vol. 21, hal. 1-5, 1942.
- Das, B.M. 2011. *Principles of Foundation Engineering Edisi Ke Tujuh*. USA: Cengage Learning
- Dunn, S. 1980. *Dasar-dasar Analisis Geoteknik*. Ikip Semarang Press. Semarang
- Fauziyyah, Ulfah. (2016, 5 Agustus). *Uji Triaksial*. Diakses pada 8 Januari 2020, dari <https://www.scribd.com/document/320278849/Uji-Triaxial>
- Hakim, Arief Rahman. 2014. *Studi Modifikasi Alat Vane Shear Berdasarkan Variasi Tinggi Kipas*. Lampung: Universitas Lampung
- Hardiyatmo, Hary Christady. 2017. *Mekanika Tanah 1 Edisi Ke Tujuh*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press
- Hardiyatmo, Hary Christady. 2018. *Mekanika Tanah 2 Edisi Ke Enam*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press
- Hausmann, M.R., 1990, *Engineering Principles of Ground Modification*, McGraw-Hill.
- Indraratna, B., dan Bamunawita, C. 2002. *Soft Clay Stabilisation by Mandrel Driven Geosynthetic Vertical Drains*. Sydney: University of Wollongong

Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., dan Wolski, W., "Precompression and Speeding Up Consolidation," Proceedings of the 8th. European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3., hal. 1201-1226, Helsinki, 1983.

M. Das, Braja. 2011. *Mekanika Tanah Jilid I (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*. PT. Glora Aksara Pratama. Jakarta.

Magnan, J.P. dan Deroy, J.M. 1980. *Analyse Graphique Des Tassements Observes Sous Les Ouvrages*, Bull. Liaison Labo. P.&Ch., 109.

Nawir, H., dan Apoji, D. 2012. *Prediksi Penurunan Tanah Menggunakan Prosedur Observasi Asaoka Studi Kasus: Timbunan di Bontang, Kalimantan Timur*. Bandung: Institut Teknologi Bandung

Schaefer, V.R. 1997. *Full Scale Field Test Of Prefabricated Vertical Drain (PVD) On Soft Bangkok Clay and Subsiding Environmental*. ASCE: Geotechnical Special Publication 69: 372-393

Sivaram, B., dan Swamee, P. 1977. *A Computational Method for Consolidation Coefficient*. Tokyo: Soils and Foundations

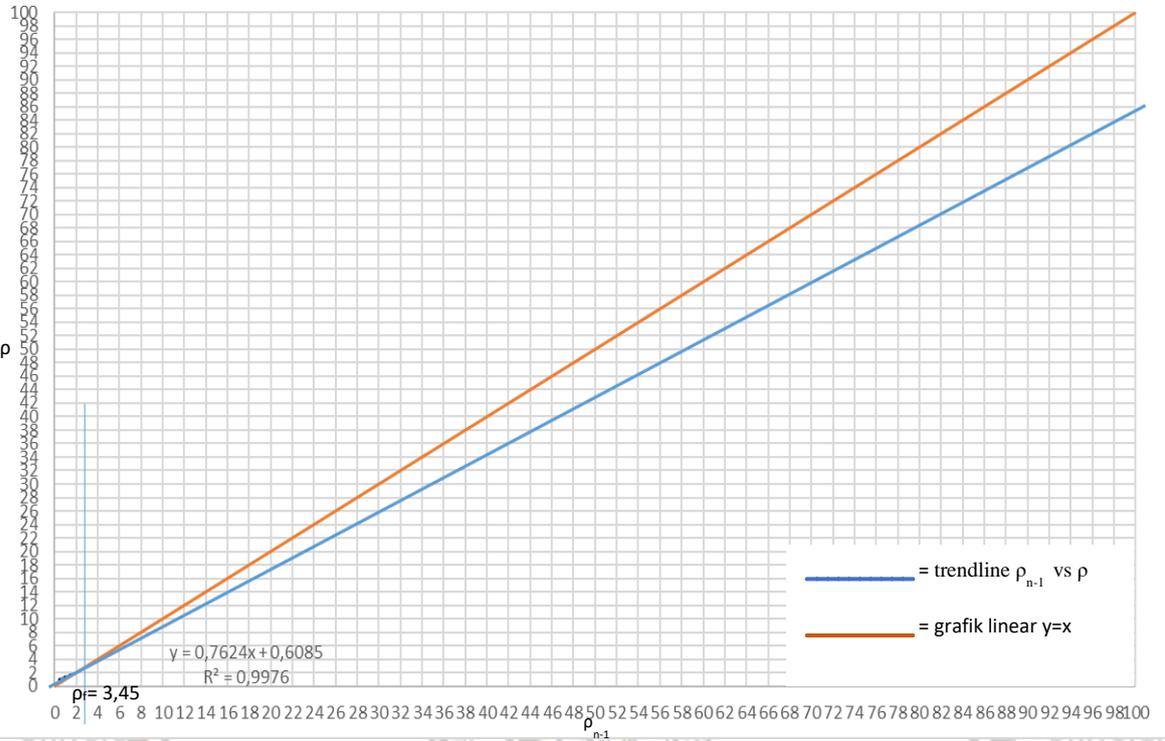
Verhoef, P.N.W. 1994. *Geologi Untuk Teknik Sipil*. Erlangga. Jakarta.

Zaika, Y., dan Suroso, H. 2011. *Mekanika Tanah II*. Malang: Bargie Media

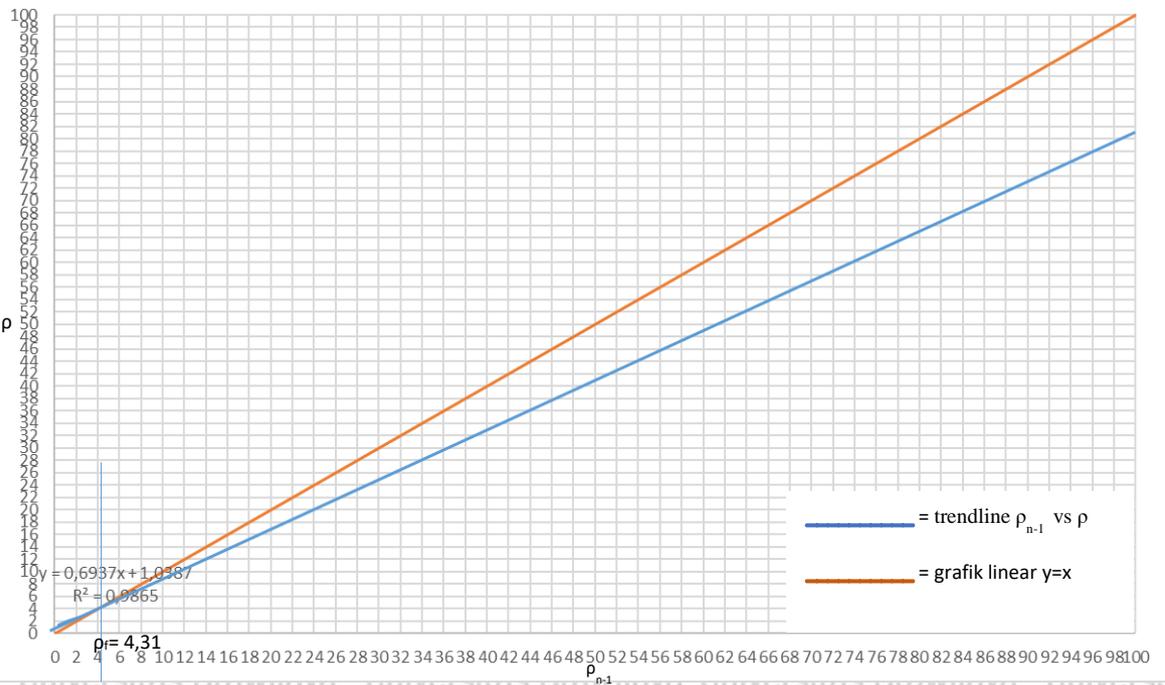
Zaika, Y., Rachmansyah, A., dan Harimurti. 2019. *Geotechnical Behaviour of Soft Soil In East Java, Indonesia*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 615 (2019) 012043

LAMPIRAN
 LAMPIRAN 1
 Grafik Asaoka

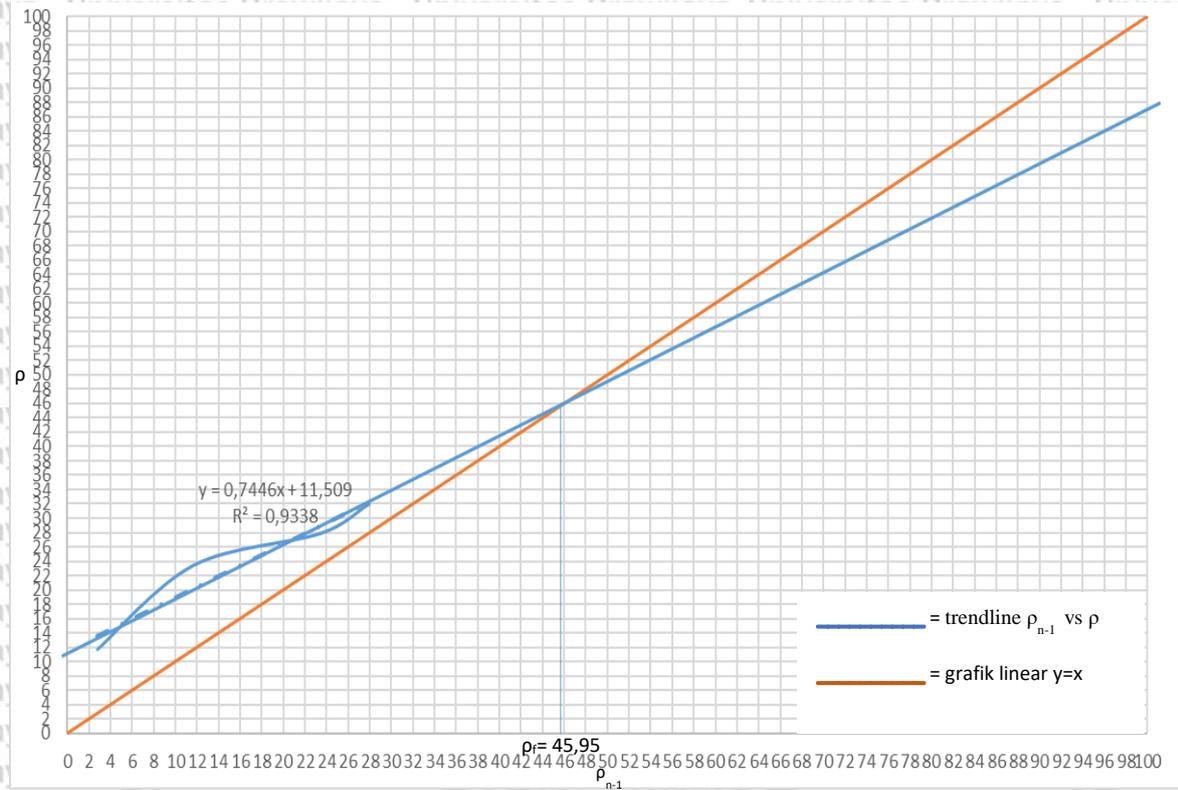
- Box Tanpa PVD



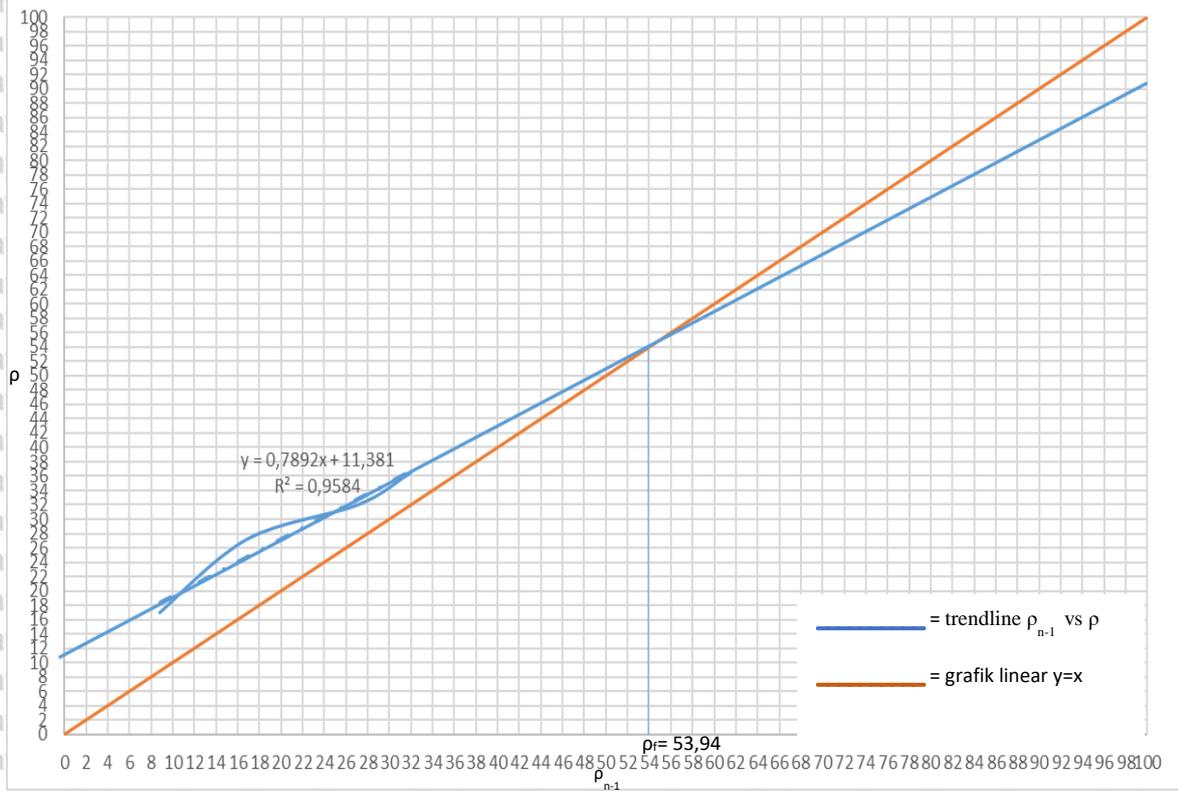
- Box 50x50x45 cm³ Kedalaman 25 cm Pola Segiempat



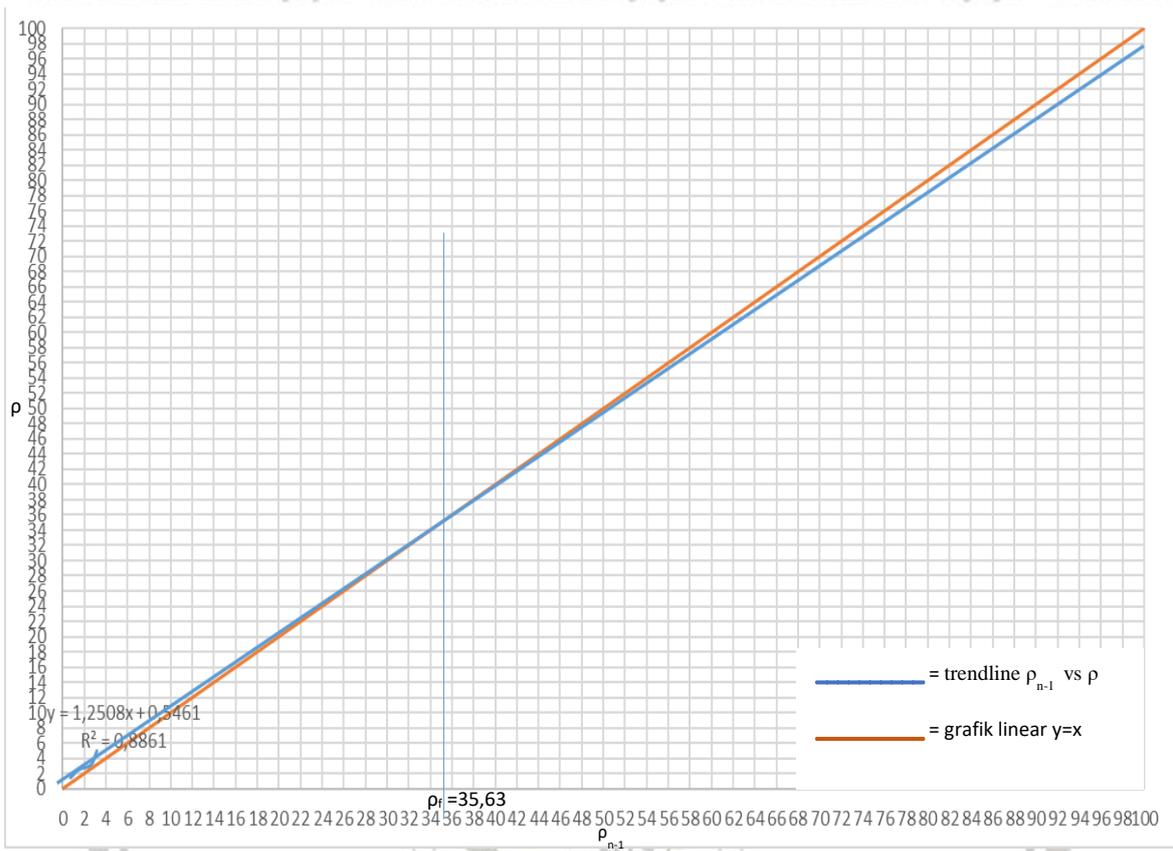
- Box 60x60x55 cm³ Kedalaman 30 cm Pola Segiempat



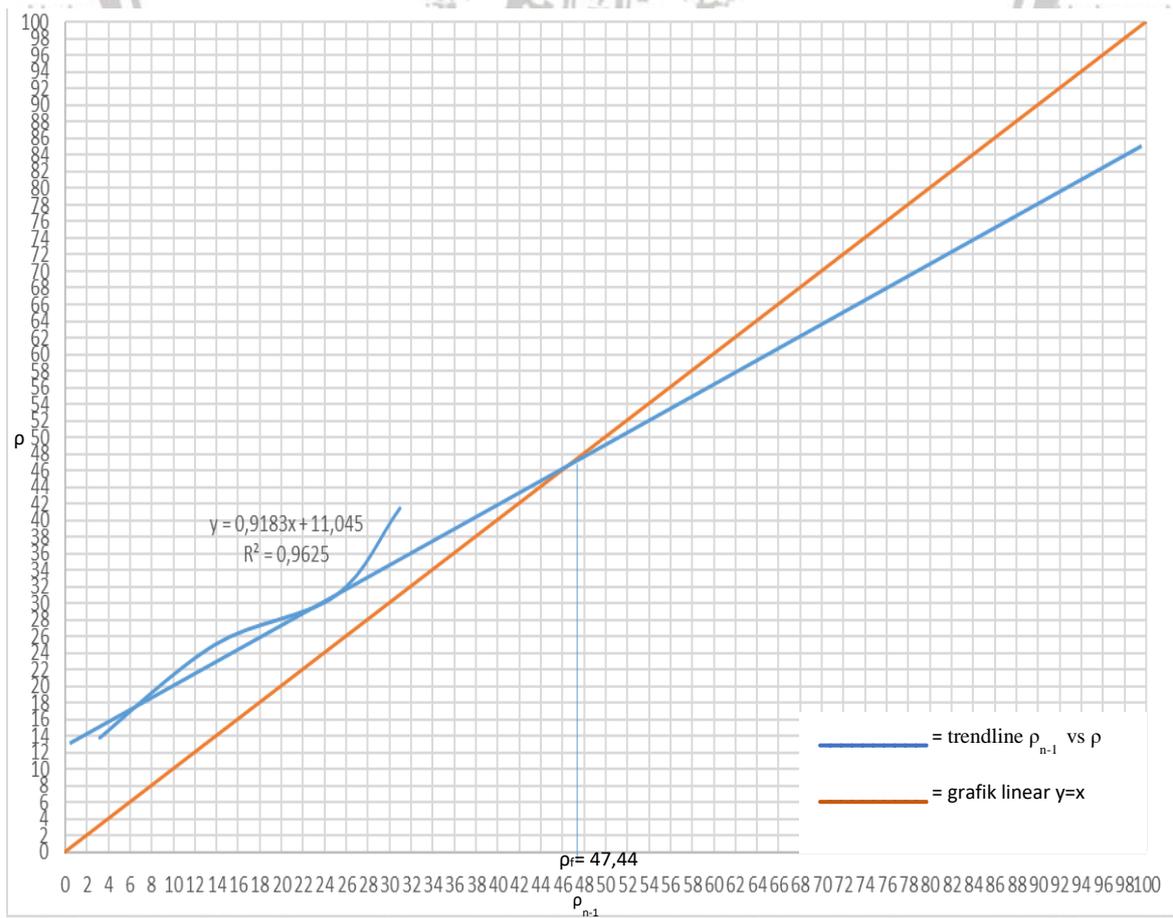
- Box 60x60x55 cm³ Kedalaman 40 cm Pola Segiempat



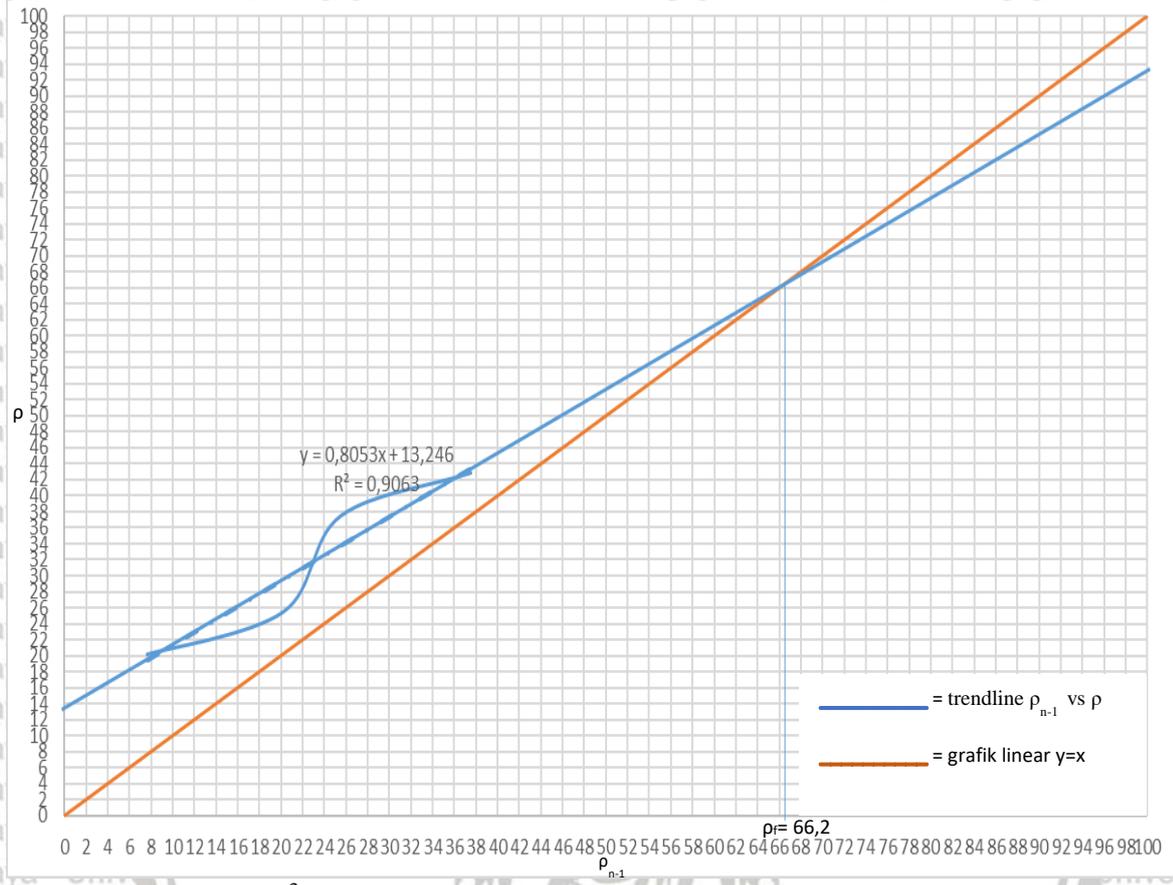
- Box 50x50x45 cm³ Kedalaman 25 cm Pola Segitiga



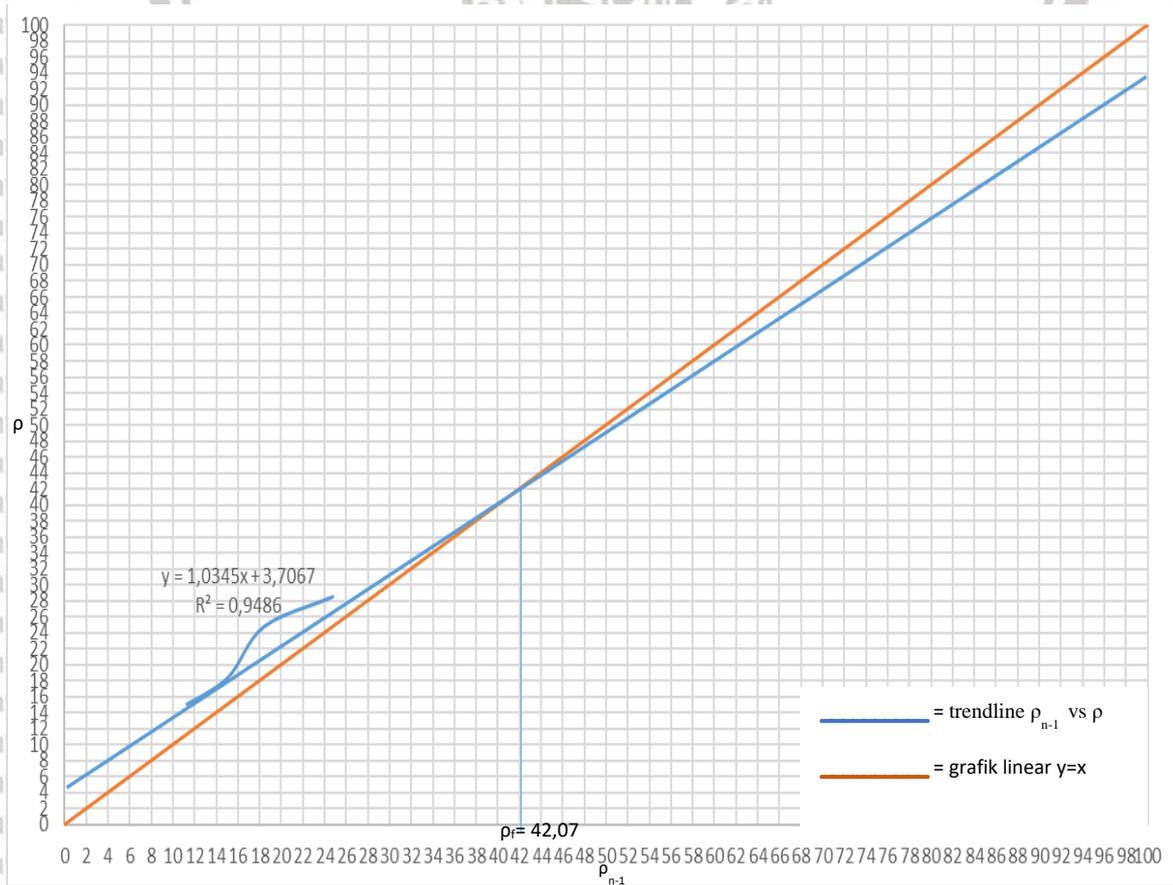
- Box 60x60x55 cm³ Kedalaman 30 cm Pola Segitiga



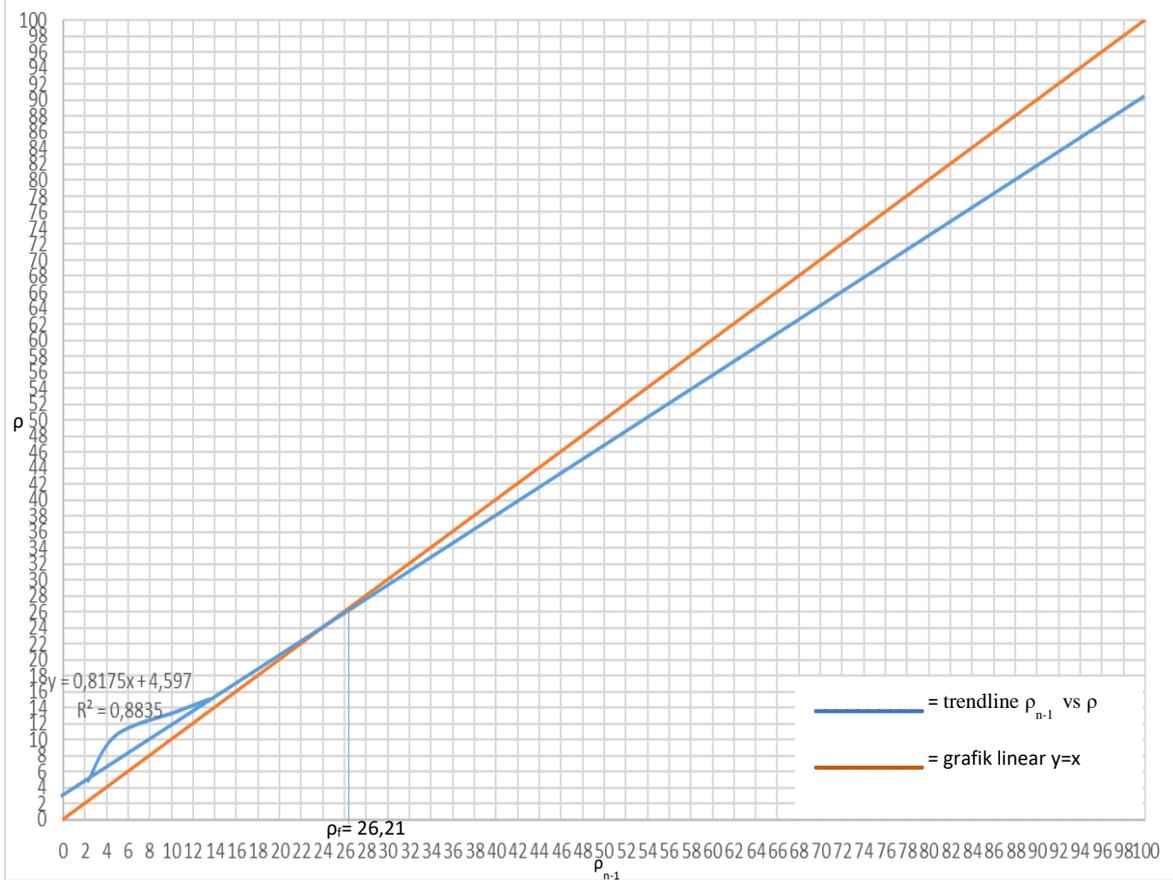
- Box 60x60x55 cm³ Kedalaman 40 cm Pola Segitiga



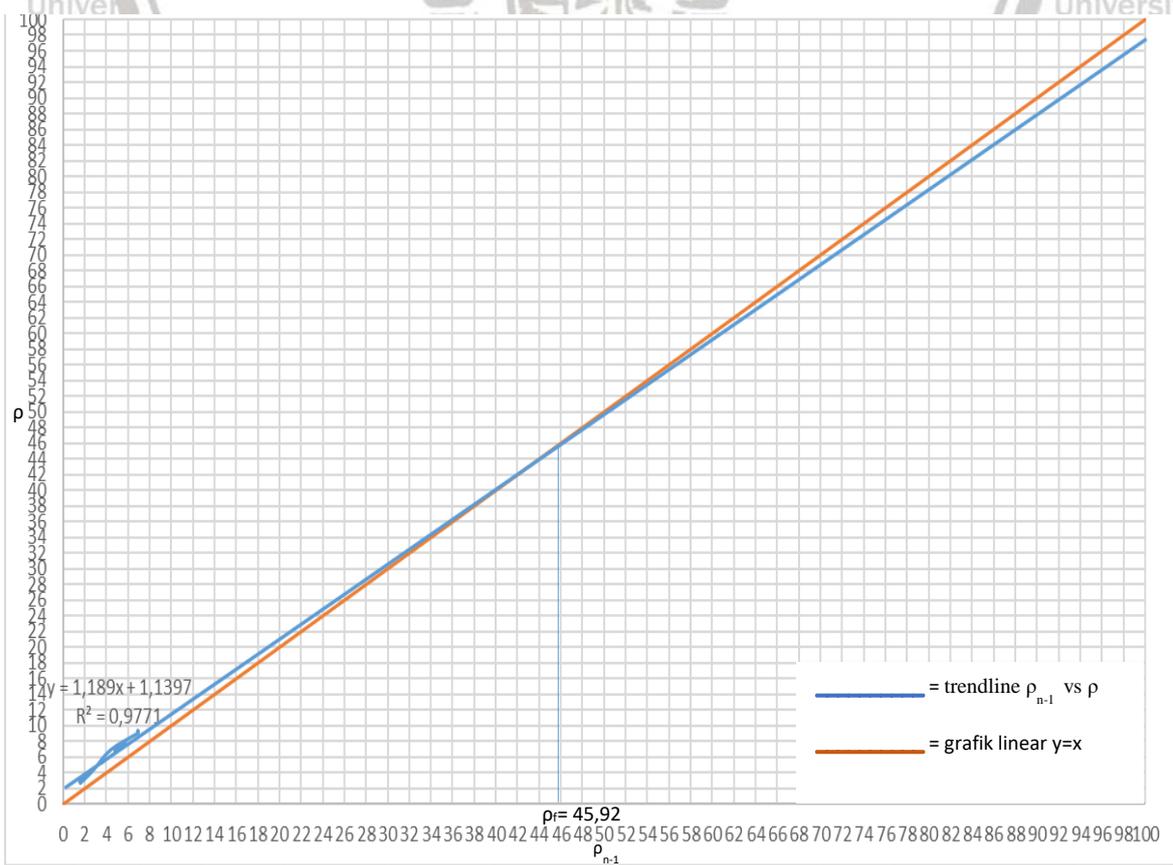
- Box 60x60x55 cm³ Jarak 20 cm Pola Segiempat



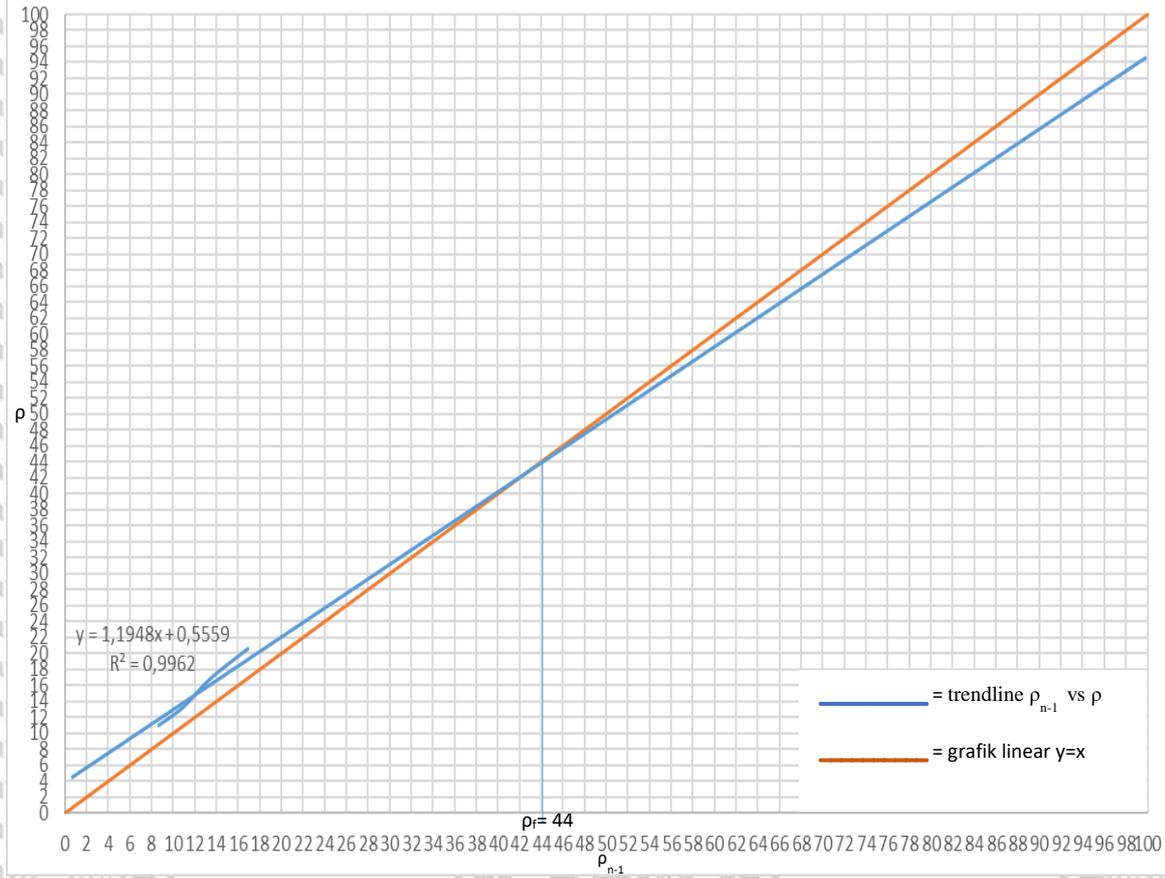
- Box 50x50x45 cm³ Jarak 25 cm Pola Segiempat



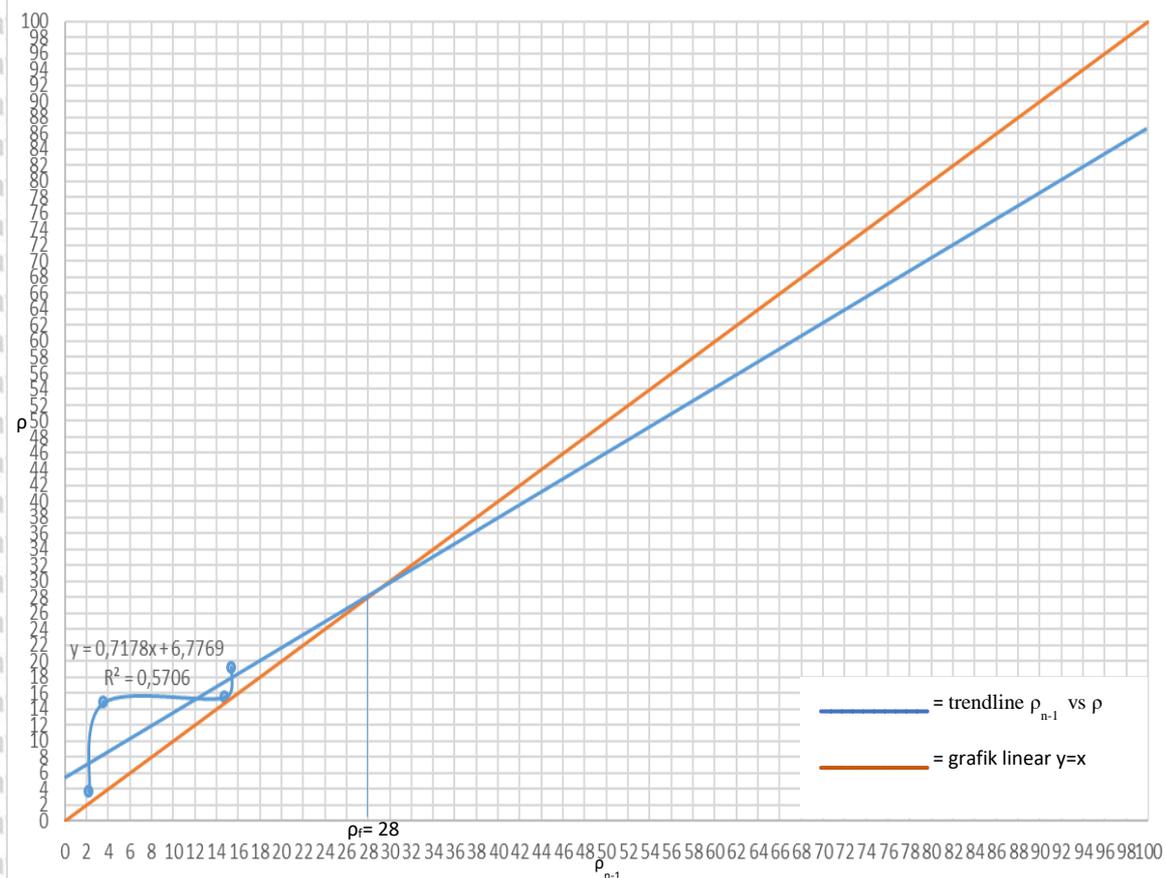
- Box 60x60x55 cm³ Jarak 30 cm Pola Segiempat



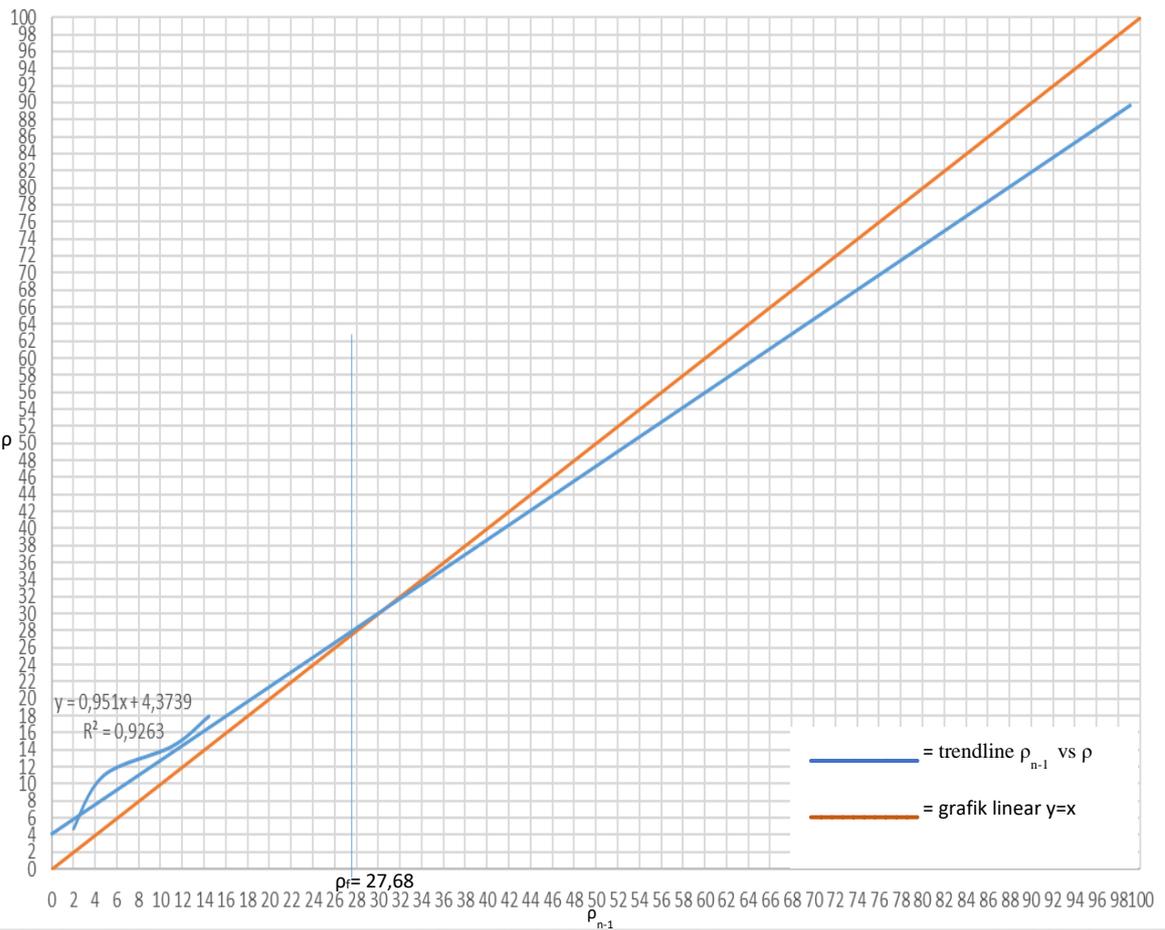
- Box 60x60x55 cm³ Jarak 20 cm Pola Segitiga



- Box 50x50x45 cm³ Jarak 25 cm Pola Segitiga



- Box 60x60x55 cm³ Jarak 30 cm Pola Segitiga



LAMPIRAN 2

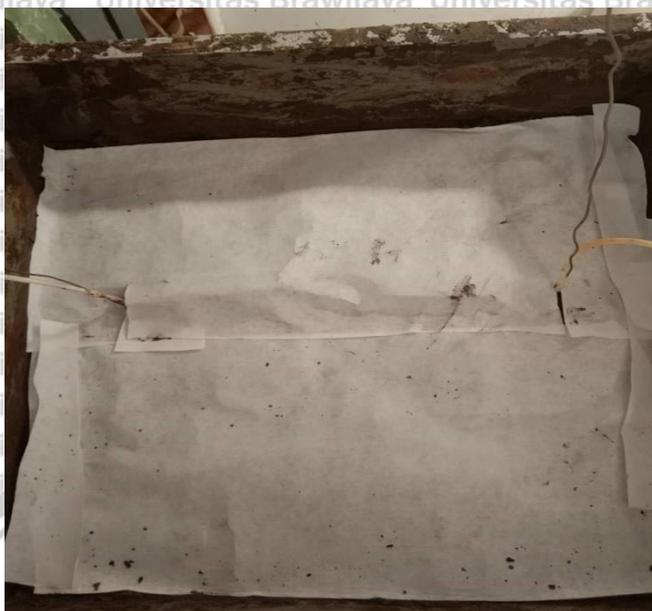
Foto Dokumentasi



Gambar 1. Pembuatan Slurry (Benda Uji)



Gambar 2. Pemasangan PVD Pola Segitiga



Gambar 3. Pemasangan Kertas Pori dan Piezometer



Gambar 4. Pemasangan Plat dan Lengan



Gambar 5. Pembebanan Konsolidasi



Gambar 6. Pembebanan Selesai



Gambar 7. Mengeluarkan Air di Permukaan

