

TESIS

**KAJIAN PONDASI DANGKAL
PADA TANAH EKSPANSIF
(STUDI KASUS TANAH BOJONEGORO)**

“Disusun dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Persyaratan
Guna Mencapai Gelar Magister Teknik”



Oleh :

EDI SUPRAPTO

NIM : 20202300175

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
2025**

HALAMAN PERSETUJUAN TESIS

KAJIAN PONDASI DANGKAL PADA TANAH EKSPANSIF (STUDI KASUS TANAH BOJONEGORO)

Ditulis oleh :

EDI SUPRPTO

NIM. 20202300175



Tanggal November 2025

Tanggal November 2025

Pembimbing I

Pembimbing II

Prof. Ir. H. Pratikso, MST., Ph.D

NIK. 210288012

Dr. Abdul Rockim, S.T., M.T.

NIK. 210200031

HALAMAN PENGESAHAN TESIS
KAJIAN PONDASI DANGKAL PADA TANAH EKSPANSIF
(STUDI KASUS TANAH BOJONEGORO)

Disusun oleh :

EDI SUPRAPTO

NIM : 20202300175

Dipertahankan di Depan Tim Penguji Tanggal:

31 Oktober 2025

Tim Penguji :

1. Ketua

Prof. Dr. H. Pradono, ST., MT.

2. Anggota

Dr. Ir. Karimul Mubtadi, MM., MT.

3. Anggota

Ir. Rachmat Studyono, MT., PhD.

Ketua Program Studi

Prof. Dr. Ir. Antonius, MT.

NIK. 210202033

Mengesahkan

Dekan Fakultas Teknik

Dr. Abdul Rochim, ST., MT.

NIK. 210200031

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : EDI SUPRAPTO

NIM : 20202300175

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tesis yang berjudul :

“KAJIAN PONDASI DANGKAL PADA TANAH EKSPANSIF (STUDI KASUS TANAH BOJONEGORO)”

Adalah benar hasil karya saya dan dengan penuh kesadaran bahwa saya tidak melakukan Tindakan plagiasi atau mengambil alih seluruh atau Sebagian besar karya tulis orang lain tanpa menyebutkan sumbernya, jika saya terbukti melakukan tindakan plagiasi, saya bersedia menerima saksi dengan aturan yang berlaku.

Semarang, November 2025



(EDI SUPRAPTO)

MOTTO

“ Khairu Ummah”

“Kamu adalah umat terbaik yang dilahirkan untuk manusia, menyuruh kepada yang ma`ruf, dan mencegah dari yang munkar, dan beriman kepada Allah.”

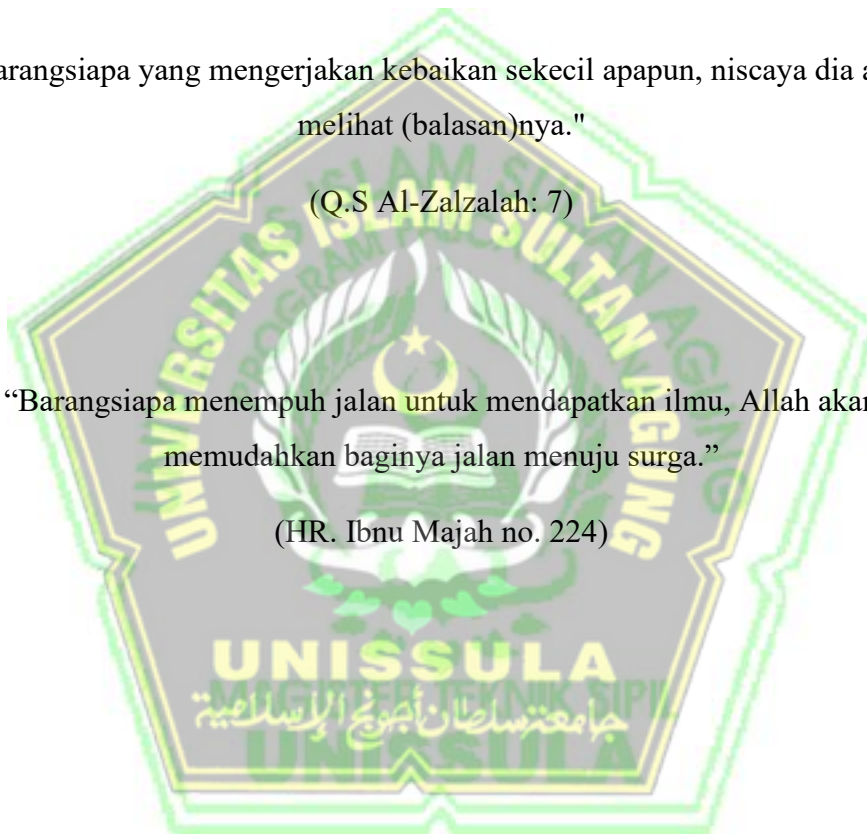
(Q.S Ali Imron: 110)

"Barangsiapa yang mengerjakan kebaikan sekecil apapun, niscaya dia akan melihat (balasan)nya."

(Q.S Al-Zalzalah: 7)

“Barangsiapa menempuh jalan untuk mendapatkan ilmu, Allah akan memudahkan baginya jalan menuju surga.”

(HR. Ibnu Majah no. 224)



HALAMAN PERSEMBAHAN

Puji syukur saya panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala, atas segala limpahan rahmat, karunia, dan inayah-Nya, sehingga karya ilmiah ini dapat terselesaikan dengan seizin dan ridha-Nya.

Dengan penuh rasa hormat dan ketulusan, karya ini saya persembahkan kepada:

1. Allah SWT, Dzat yang Maha Mengetahui, tempat bergantung segala harapan dan tujuan utama dalam menuntut ilmu.
2. Baginda Nabi Muhammad SAW, suri teladan umat, yang ajaran dan perjuangannya menjadi cahaya penuntun hidup.
3. Kedua orang tua tercinta, yang dengan doa, kasih sayang, dan pengorbanan tiada henti, menjadi sumber kekuatan dalam setiap langkah.
4. Para pendidik, dosen, dan pembimbing, khususnya untuk dosen pembimbing tesis saya, Prof. Ir. H. Pratikso, MST., Ph.D. dan Dr. Abdul Rochim, ST., MT.. yang telah membagikan ilmu, membimbing dengan tulus, serta memberi arahan dalam proses akademik ini.
5. Keluarga dan sahabat seperjuangan, atas segala dukungan moral, spiritual, dan motivasi yang begitu berarti.
6. Seluruh pihak yang turut berkontribusi, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam penyelesaian tesis ini.

Semoga karya ini menjadi amal jariyah yang bermanfaat, serta mendapat ridha dari Allah SWT. *"Hasbunallahu wa ni'mal wakeel."* (Cukuplah Allah menjadi penolong kami dan Allah adalah sebaik-baik pelindung.)

ABSTRAK

Tanah memiliki peran penting sebagai penopang utama dalam struktur bangunan. Namun, jenis tanah lempung ekspansif kerap menjadi tantangan dalam dunia konstruksi karena karakteristiknya yang berubah-ubah tergantung kadar air. Ketika basah, tanah ini mengembang, sedangkan saat kering, mengalami penyusutan, sehingga berpotensi menyebabkan keretakan pada pondasi maupun elemen struktural bangunan lainnya. Studi ini bertujuan untuk jenis tanah di wilayah Bojonegoro serta dampak terhadap penyebaran tegangan pada pondasi dangkal terhadap tanah ekspansif. Pengujian dilakukan dengan pengujian laboratorium seperti analisis indeks plastisitas, batas Atterberg, uji pemadatan, dan uji kuat geser. Fokus kajian meliputi identifikasi tingkat potensi pengembangan, klasifikasi aktivitas tanah, serta pola distribusi tegangan vertikal dan horizontal di bawah pondasi, apakah sesuai dengan pendekatan teoritis 2V:1H. Berdasarkan hasil analisis, tanah di kawasan Bojonegoro tergolong sangat ekspansif dengan parameter indeks plastisitas (PI) sebesar 53,92%, batas cair (LL) 84,60%, dan batas plastis (PL) 30,68%, berdasarkan klasifikasi USCS tanah Bojonegoro termasuk tanah lempung dengan kategori CH (*High Plasticity*). Pengamatan terhadap model pondasi menunjukkan penurunan sebesar 103,36 mm dan pengangkatan (*unloading*) sebesar 6,05 mm. Distribusi tegangan yang teramati mengikuti pola 6V:3H, yang secara teoritis ekuivalen dengan perbandingan 2V:1H. Temuan ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam merancang pondasi yang lebih adaptif dan aman pada kondisi tanah yang bersifat ekspansif.

Kata kunci : Tanah lempung ekspansif, pondasi dangkal, distribusi tegangan, 2V :1H.

ABSTRACT

Soil plays a vital role as the primary support in structural foundations. However, expansive clay soils often present challenges in construction due to their water-dependent characteristics. When wet, these soils expand; when dry, they shrink, potentially causing cracks in foundations and other structural elements. This study aims to identify the type of soil in the Bojonegoro area and evaluate its impact on stress distribution beneath shallow foundations placed on expansive soils. Laboratory tests were conducted, including plasticity index analysis, Atterberg limits, compaction test, and shear strength test. The focus of the study includes identifying the level of expansion potential, soil activity classification, and analyzing the pattern of vertical and horizontal stress distribution beneath the foundation, particularly in relation to the theoretical 2V:1H approach. Based on the analysis results, the soil in Bojonegoro is classified as highly expansive, with a plasticity index (PI) of 53.92%, a liquid limit (LL) of 84.60%, and a plastic limit (PL) of 30.68%. According to the USCS classification, the soil falls into the CH category (Clay with High Plasticity). Observations on the foundation model showed a settlement of 103.36 mm and an uplift (unloading) of 6.05 mm. The observed stress distribution followed a 6V:3H pattern, which theoretically corresponds to the 2V:1H ratio. These findings are expected to serve as a reference for designing more adaptive and safe foundations in expansive soil conditions.

Keywords: Expansive clay soil, shallow foundation, stress distribution, 2V:1H.



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk menyelesaikan laporan Tesis yang diberi judul "**Kajian Pondasi Dangkal Pada Tanah Ekspansif (Studi Kasus Tanah Bojonegoro)**" Tesis ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik untuk memperoleh gelar Magister Teknik Sipil, Program Pascasarjana Universitas Islam Sultan Agung Semarang

Selesainya Tesis ini tidak terlepas dari dukungan berbagai pihak yang telah memberikan kontribusi yang berarti bagi penulis dalam menyelesaikan Tesis ini. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada alamat berikut:

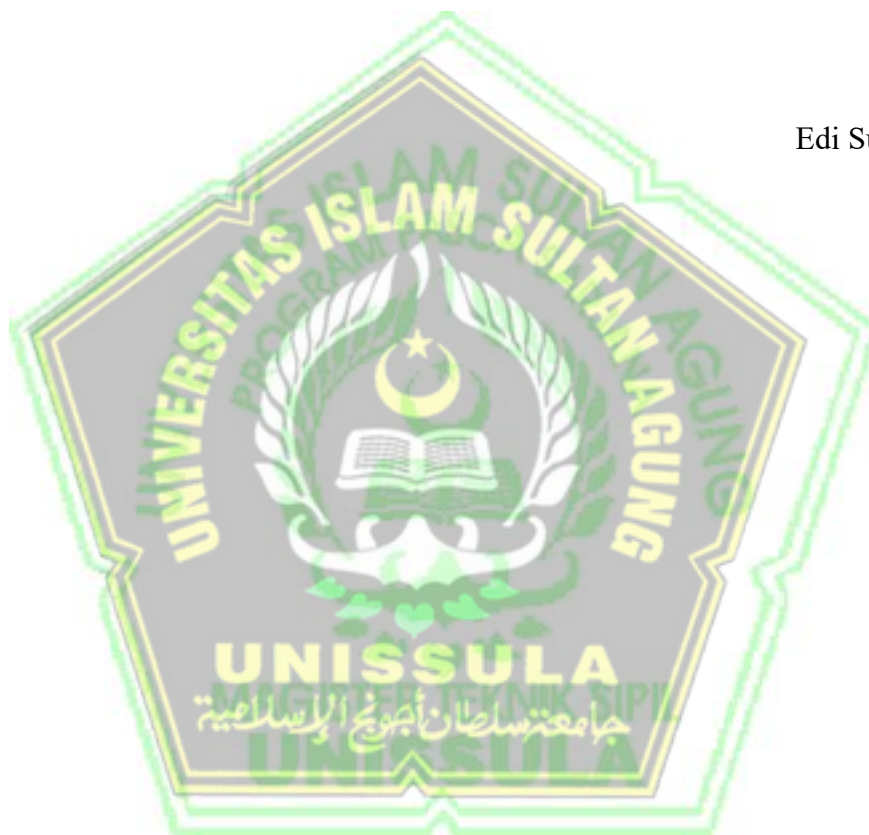
1. Allah SWT, Dzat yang Maha Mengetahui, tempat bergantung segala harapan dan tujuan utama dalam menuntut ilmu.
2. Baginda Nabi Muhammad SAW, suri teladan umat, yang ajaran dan perjuangannya menjadi cahaya penuntun hidup.
3. Kedua orang tua tercinta, yang dengan doa, kasih sayang, dan pengorbanan tiada henti, menjadi sumber kekuatan dalam setiap langkah.
4. Para pendidik, dosen, dan pembimbing, khususnya untuk dosen pembimbing tesis saya, Prof. Ir. H. Pratikso, MST., Ph.D. dan Dr. Abdul Rochim, ST., MT., yang telah membagikan ilmu, membimbing dengan tulus, serta memberi arahan dalam proses akademik ini.
5. Keluarga dan sahabat seperjuangan, atas segala dukungan moral, spiritual, dan motivasi yang begitu berarti.
6. Seluruh pihak yang turut berkontribusi, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam penyelesaian tesis ini.

Penulis telah berusaha semaksimal mungkin untuk menyelesaikan tesis ini, namun penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan. Oleh karenanya, penulis berharap kritik dan saran yang membangun untuk menyempurnakan isi dan penyajian dimasa yang akan datang. Penulis berharap tesis ini dapat

bermanfaat bagi berbagai pihak yang memerlukan khususnya bagi pengembangan ilmu-ilmu Teknik sipil.

Semarang, November 2025

Edi Suprpto



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN TUGAS AKHIR	ii
HALAMAN PERSETUJUAN TESIS	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN PENGESAHAN TESIS	Error! Bookmark not defined.
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN	iii
MOTTO	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
ABSTRAK	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
ARTI SIMBOL DAN SINGKATAN.....	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Tanah	5
2.2 Klasifikasi Tanah.....	6
2.3 Tanah Ekspansif	12
2.4 Sifat Fisik Tanah	14
2.5 Sifat Mekanis Tanah.....	20
2.6 Pengembangan dan Aktivitas Tanah	26
2.7 Tekanan Pengembangan (<i>Swelling Pressure</i>)	29
2.8 Konsolidasi	30
2.9 Dasar Konsolidasi.....	31
2.10 Pondasi	32

2.11	Macam-macam Pondasi	32
2.12	Keruntuhan Pondasi	33
2.13	Penurunan	43
2.14	Penelitian Terdahulu.....	46
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		48
3.1	Bahan Penelitian.....	48
3.2	Alat dan Langkah Pengujian	48
3.2.1	Kadar air.....	48
3.2.2	Berat Jenis	49
3.2.3	Analisis Ukuran Butiran.....	50
3.2.4	Batas Cair/ <i>Liquid Limit</i> (LL)	52
3.2.5	Batas Plastis/ <i>Plastic Limit</i> (PL)	53
3.2.6	Batas Susut/ <i>Shrinkage Limit</i> (SL).....	54
3.2.7	<i>Free Swelling</i>	54
3.2.8	Pengujian <i>Proctor Standart</i>	55
3.2.9	<i>California Bearing Ratio</i> (CBR).....	56
3.2.10	Triaksial UU.....	58
3.2.11	Konsolidasi Konvensional (<i>Oedometer</i>).....	59
3.2.12	Distriusi Tegangan Permodelan Box	60
3.3	Metode Pengumpulan Data	61
3.4	Metode Analisis Data	61
3.5	Alur Penelitian.....	62
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		63
4.1	Sifat Fisik	63
4.1.1	Kadar Air.....	63
4.1.2	Berat Jenis	64
4.1.3	Analisis Ukuran Butiran.....	65
4.1.4	<i>Atterberg Limit</i>	68
4.1.5	<i>Free Swelling</i>	71
4.2	Sifat Mekanis.....	72
4.2.1	<i>Proctor Standart</i>	73
4.2.2	<i>California Bearing Ratio</i> (CBR).....	75
4.2.3	Triaksial UU.....	81
4.2.4	Konsolidasi Konvensional (<i>Oedometer</i>)	85

4.3	Klasifikasi Tanah.....	88
4.4	Klasifikasi Potensi Pengembangan dan Aktifitas Tanah.....	89
4.4.1	Teori Van De Merve	89
4.4.2	Teori Seed At al	90
4.5	Tekanan Pengembangan.....	91
4.6	Distribusi Tegangan Permodelan Box Uji.....	96
4.6.1	Hubungan Beban dengan Penurunan	99
4.6.2	Hubungan Waktu dengan Penurunan.....	100
4.6.3	Perbandingan Dengan Penelitian Terdahulu	100
BAB V KESIMPULAN		102
5.1	Kesimpulan.....	102
5.2	Saran	103
DAFTAR PUSTAKA.....		105



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO.....	9
Tabel 2. 2 Klasifikasi Tanah Sistem Unified.....	11
Tabel 2. 3 Kelompok Tanah Sistem Klasifikasi Unfied (USCS)	12
Tabel 2.4 Nilai Berat Tennis Tanah	15
Tabel 2. 5 Nilai Indeks Plastis.....	19
Tabel 2. 6 Nilai Potensi Pengembangan.....	27
Tabel 2. 7 Potensi Pengembangan.....	29
Tabel 2. 8 Faktor Daya Dukung Terzaghi untuk Kondisi Keruntuhan Geser Umum (general shear failure).....	41
Tabel 2. 9 Faktor-faktor daya dukung Terzaghi Faktor faktor daya dukung Terzaghi modifikasi untuk kondisi keruntuhan kondisi keruntuhan geser setempat (locall shear failure failure).....	42
Tabel 2. 10 Tahanan gesek dinding, f_s	43
Tabel 2. 11 Penelitian terdahulu.....	46
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Kadar Air	64
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Berat Jenis.....	65
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Sieve Analisis	66
Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Hidrometer Analisis.....	67
Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Liquid Limit (LL)	69
Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Plastic Limit (PL).....	70
Tabel 4. 7 Nilai Plastic Indeks (PI)	70
Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Shrinkage Limit (SL)	71
Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Free Swelling	72
Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Kepadatan Ringan.....	73
Tabel 4. 11 CBR Unsoaked 10 Tumbukan.....	76
Tabel 4. 12 CBR Unsoaked 30 Tumbukan.....	77
Tabel 4. 13 CBR Unsoaked 65 Tumbukan.....	78
Tabel 4. 14 CBR Soaked 10 Tumbukan.....	79
Tabel 4. 15 CBR Soaked 30 Tumbukan.....	80
Tabel 4. 16 CBR Soaked 65 Tumbukan.....	81

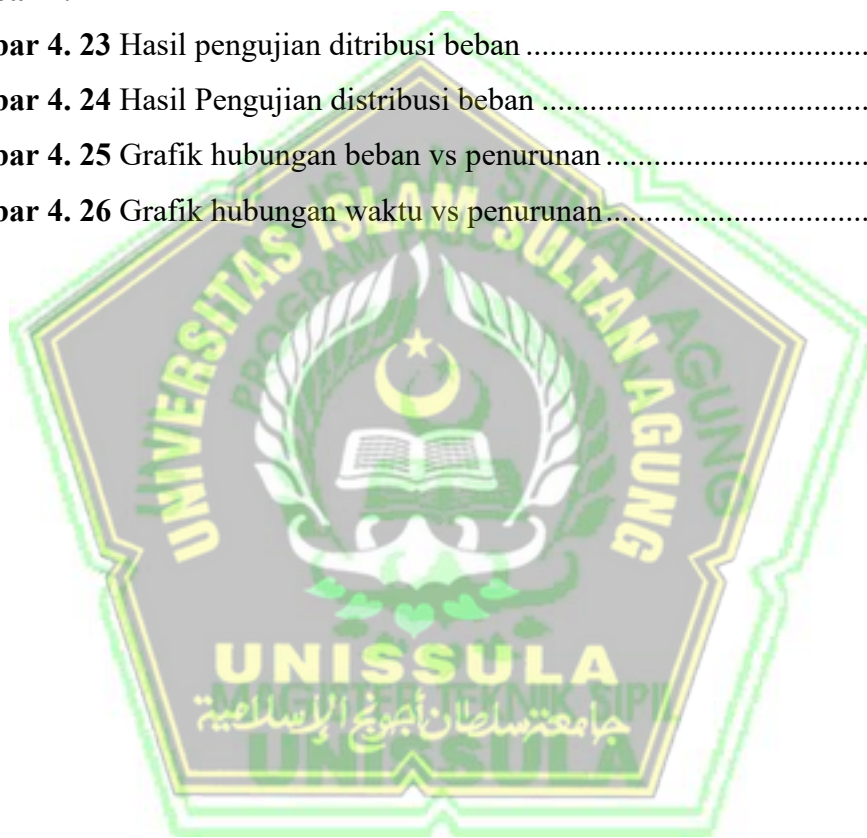
Tabel 4. 17 Konsolidasi Konvensional (Oedometer)	86
Tabel 4. 18 Klasifikasi USCS.....	88
Tabel 4. 19 Klasifikasi Potensi pengembangan dan Tingkat Keaktifan.....	90
Tabel 4. 20 Swelling CBR.....	92



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Grafik Plastisitas untuk Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO	8
Gambar 2. 2 Tanah Ekspansif.....	13
Gambar 2. 3 Hidrometer	16
Gambar 2. 4 Grafik Hubungan Kepadatan Kering dengan Kadar Air	21
Gambar 2. 5 Grafik Pengujian CBR Laboratorium.....	23
Gambar 2. 6 Alat triaksial.....	24
Gambar 2. 7 Sketsa Konsolidasi Oedometer	24
Gambar 2. 8 Garfik Klasifikasi Potensi Pengembangan	28
Gambar 2. 9 Grafik Hubungan Antara Pl dan Presentase Fraksi Lempung	29
Gambar 2. 10 Macam – macam pondasi	32
Gambar 2. 11 Keruntuhan geser umum (General Shear Failure)	35
Gambar 2. 12 Keruntuhan geser setempat (Local Shear Failure).....	36
Gambar 2. 13 Keruntuhan geser baji/penetrasi (<i>Punching Shear Failure</i>)	37
Gambar 2. 14 Hubungan antara ϕ dengan nilai-nilai N_c , N_q , N_γ	43
Gambar 2. 15 penyebaran beban vertikal pondasi lajur pada tanah berlapis. ...	45
Gambar 4. 1 Pengujian Kadar Air	64
Gambar 4. 2 Pengujian Berat Jenis Tanah.....	65
Gambar 4. 3 Pengujian Analisa Saringan	66
Gambar 4. 4 Grafik Analisis Ukuran Butir Tanah	67
Gambar 4. 5 Pengujian Atterberg Limit	68
Gambar 4. 6 Grafik Liquid limit.....	69
Gambar 4. 7 Pengujian Free Swelling	71
Gambar 4. 8 Pengujian Standart Proctor	74
Gambar 4. 9 Grafik Hubungan OMC dengan Dry Density	74
Gambar 4. 10 Pengujian CBR	75
Gambar 4. 11 Grafik Triaksial UU.....	85
Gambar 4. 12 Grafik <i>Oedometer Test</i>	87
Gambar 4. 13 Grafik Casagrande Plasticity	88

Gambar 4. 14 Grafik Potensi Pengembangan.....	89
Gambar 4. 15 Klasifikasi Potensi Pengembangan dan Tingkat Keaktifan	91
Gambar 4. 16 Swelling CBR Soaked	92
Gambar 4. 17 Pondasi Telapak.....	93
Gambar 4. 18 Box Uji	94
Gambar 4. 19 Model Pondasi Dangkal.....	95
Gambar 4. 20 Tanah warna di bawah model pondasi.....	96
Gambar 4. 21 Persiapan Box Penelitian dan Sampel Uji	96
Gambar 4. 22 Proses Pembebanan	97
Gambar 4. 23 Hasil pengujian ditribusi beban	98
Gambar 4. 24 Hasil Pengujian distribusi beban	98
Gambar 4. 25 Grafik hubungan beban vs penurunan	99
Gambar 4. 26 Grafik hubungan waktu vs penurunan.....	100



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 : Pengujian kadar Air	108
Lampiran 2 : Pengujian Spesific Gravity.....	108
Lampiran 3 : Pengujian Sieve Analisis	109
Lampiran 4 : Pengujian <i>Hidrometer Analisis</i>	109
Lampiran 5 : Pengujian <i>Liquid Limit</i>	110
Lampiran 6 : Pengujian Plastic Limit	110
Lampiran 7 : Pengujian Shrinkage Limit	111
Lampiran 8 : Pengujian Free Swelling.....	111
Lampiran 9 : <i>Pengujian</i> Proctor Standart	112
Lampiran 10 : Pengujian Californi Bearing Ratio (CBR).....	112
Lampiran 11 : Pengujian Swelling CBR.....	113
Lampiran 12 : Pengujian Konsolidasi Oedometer	113
Lampiran 13 : Persiapan sampel dalam Bok.....	114
Lampiran 14 : Persiaan sampel warna dalam Bok.....	114
Lampiran 15 : Persiaan sampel dalam Bok.....	115
Lampiran 16 : Persiaan sampel dalam Bok.....	115
Lampiran 17 : Beban Pengujian.....	116
Lampiran 18 : Permodelan Pondasi	116
Lampiran 19 : Proses Pembebanan Pondasi	117
Lampiran 20 : Hasil Distribusi Tegangan Dalam Bok.....	117
Lampiran 21 : Hasil Distribusi Tegangan Dalam Bok.....	118

ARTI SIMBOL DAN SINGKATAN

OMC	: Optimum Moisture Content
USCS	: Unified Soil Classification System
AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
G	: Kerikil
S	: Pasir
M	: Lempung
C	: Organik
O	: Gambut
Pt	: Gradasi Baik
W	: Gradasi Buruk
P	: Berlanau
M	: Berlempung
C	: Koeffisien Konsolidasi
Cv	: Indeks Kompresibilitas
Cc	: Kadar Air
w	: Berat Jenis
Gs	: Batas Cair
LL	: Batas Plastis
PL	: Indeks Plastis
PI	: Batas Susut
SL	: Free Swelling Indeks
FSI	: Volume akhir (setelah pengembangan)
V_f	: Volume awal (sebelum pengembangan)
V_i	: California Bearing Ratio
CBR	: Koefisien kompresibilitas
M_v	: Koeffisien Konsolidasi
C_v	: Indeks Kompresibilitas
C_c	: Hubungan waktu
T	: Penurunan Kumulatif
St	

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada bidang konstruksi, tanah menjadi elemen fundamental sebagai tumpuan suatu konstruksi sehingga peranannya sangat krusial. Berdasarkan penjelasan (Bowles 1981), tanah termasuk material konstruksi yang tidak sulit diperoleh serta sangat ekonomis sebab ketersediaannya memadai di lapangan. Pemanfaatan tanah yaitu dapat dipergunakan dalam menimbun jalur kereta api, jalan raya, bahkan konstruksi bendungan ataupun timbunan tanggul. Akan tetapi, guna mengantisipasi konstruksi gagal, maka sebelum dipergunakan, tanah sebagai material tumpuan harus melalui pengujian mutu terlebih dahulu walaupun mudah diperoleh dan sifatnya ekonomis. Adapun permasalahan yang kerap kali muncul saat pendirian konstruksi yakni dipicu sifat buruk tanah, contoh tingginya plastisitas tanah, terlalu kuatnya pergeseran alami yang terjadi, dan sejumlah sifat tanah yang lain.

Tanah terbagi menjadi beragam jenis di mana satu di antaranya yakni tanah lempung ekspansif termasuk dalam jenis yang bermasalah. Tanah tersebut dikatakan lempung ekspansif sebab tingginya sifat fluktuasi kembang susut yang dimiliki, sehingga air sangat memengaruhi perilakunya. Selain itu, bangunan kerap mengalami kerusakan karena tanah ekspansif, contohnya jalanan bergelombang, pondasinya terangkat, dinding retak, dan lain-lain. Selanjutnya, saat kadar air tanah lempung berkurang ataupun bertambah, maka menimbulkan sifat masif pada penyusutan dan pengembangan tanah lempung sebab adanya kandungan mineral ekspansif. Adapun faktor lingkungan menjadi yang memengaruhi terjadinya kembang tanah lempung ekspansif, seperti fluktuasi muka air tanah, sistem drainase, curah hujan, serta iklim yang berbeda (Agung and Istri 2014).

Kabupaten Bojonegoro ialah satu di antara daerah yang memiliki tanah ekspansif dengan kata lain tanah yang menyusut ketika kemarau, namun mengembang saat penghujan karena bertambahnya volume air pada tanah. Perubahan volume ini dapat merusak kekuatan struktur bangunan yang menempati tanah tersebut. Bangunan yang retak merupakan ciri khas

kerusakan yang disebabkan oleh tanah ekspansif. Apabila struktur tanah secara signifikan mengalami pergerakan maka bisa memicu terjadinya kerusakan. Selain itu, penyusutan terjadi ketika tanah ekspansif menjadi kering. Penyusutannya inipun mampu menyebabkan daya dukung bangunan hilang hingga memicu terjadi gangguan ataupun rusaknya struktur bangunan, salah satunya kerusakan pada pondasi.

Pondasi dangkal adalah elemen struktur bawah yang fungsinya guna menyalurkan beban ke stratum tanah pendukung yang cenderung mendekati permukaan tanah dari strukturnya yang teratas. Pondasi jenis berikut lazim dimanfaatkan pada bangunan bertingkat rendah atau struktur dengan beban ringan hingga sedang, di mana daya dukung tanah pada kedalaman dangkal masih mencukupi. Beberapa jenis pondasi dangkal yakni pondasi telapak (isolated footing), lajur (strip footing), serta plat (raft foundation). Pemilihan jenis pondasi dangkal sangat bergantung pada kondisi tanah, besar beban struktur, serta efisiensi konstruksi di lapangan. Pada kondisi tanah bermasalah seperti tanah ekspansif, kinerja pondasi dangkal menjadi krusial. Tanah ekspansif memiliki karakteristik dipengaruhi fluktuasi kadar airnya yang secara signifikan memicu berubahnya volume tanah, yakni mengembang (swelling) saat basah dan menyusut (shrinkage) saat kering. Perubahan volume ini dapat menyebabkan gaya angkat (uplift) vertikal yang bekerja pada pondasi, sehingga berpotensi menimbulkan keretakan pada lantai maupun deformasi pada elemen struktur atas. Oleh karena itu, perencanaan pondasi di atas tanah ekspansif memerlukan pendekatan khusus, termasuk pemahaman distribusi tegangan dalam tanah dan analisis penurunan (settlement).

Berdasarkan penelitian terdahulu (Widoanindyawati et al. 2021), distribusi beban merata pada tanah lunak jenuh menunjukkan pola penyebaran sebesar 2,25 vertikal : 1 horizontal, lebih tajam dibanding asumsi umum (2V:1H). Hal ini menunjukkan bahwa distribusi tegangan dalam tanah tidak selalu simetris atau mengikuti pola ideal, khususnya pada kondisi tanah lunak atau ekspansif. Dalam penelitian ini, pondasi telapak dimodelkan dan diberikan beban terkontrol untuk menganalisis respon tanah terhadap

pembebanan, terutama pada tanah dengan karakteristik ekspansif. Kajian dilakukan terhadap penurunan pondasi, bentuk kurva distribusi tegangan, serta validasi terhadap sudut penyebaran beban aktual di lapangan. Selanjutnya, studi ini diharap mampu memberi hasil yang berkontribusi pada pemahaman mekanisme interaksi tanah-struktur pada pondasi dangkal, khususnya dalam kondisi tanah ekspansif yang sering ditemui di beberapa wilayah Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

Berlandaskan penjabaran konteks dalam latar belakang, berikut merupakan permasalahan yang dikaji penelitian ini:

1. Bagaimana klasifikasi potensi pengembangan dan aktifitas tanah Ekspansif ?
2. Berapa besar nilai pengembangan dan penurunannya ?
3. Bagaimana bentuk distribusi tegangan pada pondasi, apakah sesuai dengan teori penurunan 2V:1H ?

1.3 Batasan Masalah

Pada penulisan laporan penelitian berikut, akan diberi pembatasan beberapa permasalahan sebagai berikut :

1. Penelitian dilaksanakan melalui uji laboratorium terstandar.
2. Sempel tanah diambil dari daerah Bojonegoro.
3. Penelitian berfokus pada nilai pengembangan dan penurunan serta bentuk distribusi tegangan.

1.4 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan rumusan masalah yang diambil, berikut ialah tujuan dilaksanakannya penelitian:

1. Untuk mengetahui klasifikasi potensi pengembangan dan aktifitas tanah Ekspansif.
2. Mengetahui nilai pengembangan dan penurunan terhadap pondasi dangkal.
3. Mengetahui apakah distribusi tegangan pondasi sesuai dengan teori penurunan 2V:1H, Serta Memberikan rekomendasi teknis terhadap

perencanaan pondasi dangkal yang aman dan stabil pada tanah ekspansif berdasarkan hasil kajian distribusi tegangan dan penurunan.

1.5 Manfaat Penelitian

Bersumber dari uraian tujuan, penelitian berikut memiliki manfaat seperti di bawah ini:

1. Penelitian yang dilakukan memberi data, informasi, maupun analisis yang dapat digunakan sebagai referensi oleh peneliti selanjutnya
2. Mengetahui pengaruh nilai pengembangan dan penurunan terhadap bentuk pondasi.
3. Penelitian ini memperoleh pemahaman mendalam tentang konsep distribusi tegangan $2V:1H$, serta dasar-dasar teori teknik geoteknik yang relevan, yang dapat membantu menemukan metode yang lebih efektif



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah

Tanah pada susunan lapisan bumi menjadi bagian paling atas atau permukaan di kerak bumi. Pada satu lokasi dan lokasi lainnya dapat mempunyai perbedaan sifat maupun ciri tanah. Selain itu, tanah merupakan lapisan terluar bumi di mana bersumber dari hasil proses lanjutan pada material induk, sebab bermacam organisme mati maupun hidup, udara, serta air memicu terjadinya perubahan alamiah berdasarkan Dokuchaev (1870) dalam Fauizek dkk (2018). Adapun perubahannya tersebut memiliki tingkatan yang dapat ditinjau dari hasil pelapukannya baik pada segi warna, struktur, maupun komposisinya.

Berlandaskan penjabaran (Das 1995), diketahui definisi teknis umum dari tanah yaitu material di mana tersusun atas partikel padat hasil pelapukan beragam materi organik serta butiran atau agregat bermacam mineral padat yang saling bersenyawa atau tidak tersementasi dan diiringi pengisian seluruh ruang hampa antara partikel padat oleh zat gas maupun cair.

Selanjutnya, (Bowles 1981) dalam Fauizek dkk (2018) menjelaskan tanah sebagai percampuran beragam partikel yang tersusun atas satu di antara ataupun semua jenis di bawah:

- a. Berangkal (*Boulders*), ialah bongkahan batu besar, lazimnya berukuran melebihi 250 mm hingga 300 mm. Adapun *cobbles* atau kerakal berkisar pada 150 mm hingga 250 mm.
- b. Kerikil (*Gravel*), partikel batuan dengan ukuran 5 mm hingga 150 mm.
- c. Pasir (*Sand*), partikel batuan yang ukurannya kurang dari 1 mm untuk kategori halus dan 3-5 mm untuk yang kasar atau umumnya berukuran 0,074 mm hingga 5 mm.
- d. Lanau (*Silt*), partikel batuan berikut ukurannya mulai 0,002 mm hingga 0,074 mm. Pada sekitar garis pantai muara sungai ataupun deposit yang

terendapkan dalam danau dapat ditemui lempung maupun lanau yang jumlahnya masif.

- e. Lempung (*Clay*), partikel mineral yang berukuran lebih kecil dari 0,002 mm. Partikel-partikel ini merupakan sumber utama dari kohesi pada tanah yang kohesif.
- f. Koloid (*Colloids*), partikel mineral dengan ukuran lebih kecil dari 0,001 mm dan sifatnya “diam”.

2.2 Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah merupakan penggolongan beragam tanah dan mengklasifikasikannya berdasarkan karakteristik masing-masing. Bersumber dari penjabaran (Das 1995), diketahui sistematisasi klasifikasi berikut menguraikan dengan ringkas seluruh sifat universal tanah yang banyak variasinya tetapi paparan tegas terkait probabilitas penggunaannya belum sepenuhnya tersedia. Adapun tujuannya diklasifikasikan ialah guna mengetahui kesesuaiannya atas penggunaan tertentu, dan dapat pula guna memberi informasi terkait kondisi tanah satu wilayah ke wilayah lain dengan berwujud data dasar, contoh berat isi, kekuatan tanah, karakter pemadatan, dan lain-lain (Bowles 1981).

Pada bidang keilmuan mekanika tanah, umumnya ada dua sistem pengklasifikasian. Keduanya turut mempertimbangkan pendistribusian batas Atterberg maupun ukuran butirannya. Berikut kedua sistemnya tersebut:

- a. Sistem Klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Official*)

Pada proses perkembangan sistem American Society for Testing and Materials (ASTM) Standar No. D-3282, AASHTO model M105, terdapat Public Road Administrasion Classification System yang pengembangannya pada 1929. Sistem berikut sudah melalui sejumlah pengoptimalan dan yang kini diberlakukan ialah hasil pengajuan pada 1945 oleh Commite on Classification of Material for Subgrade and Granular Type Road of the Highway Research Board pada tahun 1945.

Pemanfaatan AASHTO yaitu guna mengetahui mutu tanah yang akan dimanfaatkan dalam proyek jalan seperti *subbase* atau lapisan dasar

maupun *subgrade* tanah dasarnya. Atas dasar penggunaan sistem berikut dalam mengerjakan jalan, maka penggunaannya mesti selalu diperhitungkan terhadap maksud dan tujuan aslinya. Sistem ini membagi tanah ke dalam 7 kelompok utama yaitu A-1 sampai dengan A-7. A-1, A-2, dan A-3 adalah tanah berbutir di mana 35 % atau kurang dari jumlah butiran tanah tersebut lolos ayakan No. 200. Tanah di mana lebih dari 35 % butirannya tanah lolos ayakan No. 200 maka klasifikasinya pada kelompok A-4, A-5 A-6, dan A-7. Kelompok A-4 hingga A-7 memiliki butiran yang mayoritas merupakan lempung serta lanau. Berikut ialah kriteria yang menjadi landasan AASHTO:

1. Ukuran Butir

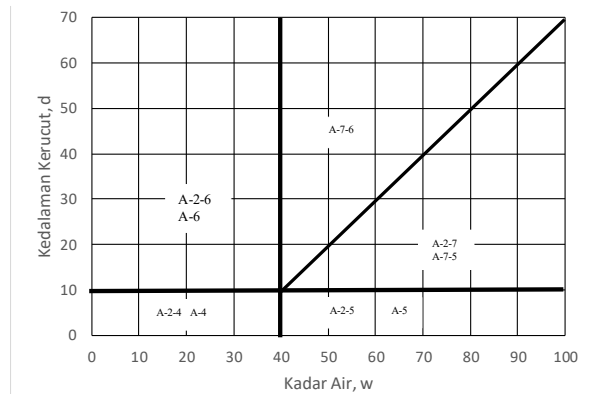
Kerikil: yaitu komponen tanah yang apabila diayak menggunakan ayakan berdiameter 2 mm (No. 10) akan tertahan tapi jika memakai ayakan berdiameter 3 inch (75 mm) akan lolos.

Pasir: komponen tanah yang jika diayak memakai ayakan berdiameter 0.075 mm (No. 200) akan tertahan namun lolos apabila diayak dengan yang berdiameter 2 mm atau No. 10.

Lempung serta lanau: apabila diayak memakai ayakan berdiameter 0.075 mm atau No. 200 maka komponen tanahnya akan lolos.

2. Plastisitas

Plastisitas ialah kapabilitas tanah mengondisikan bentuk yang berubah dalam volume stabil dengan tidak disertai remukan ataupun retakan. Adapun tanah bisa berwujud padat, semi padat, plastis, ataupun cair di mana tergantung kadar airnya. Secara umum, nilai indeks plastisitas dijadikan acuan guna mengetahui tingkatan keplastisan tanah. Nilai tersebut yakni jarak penghitungan nilai batas cair dengan batas plastis tanahnya. Hasilnya, jika indeks plastis seluruh bagian halus dari tanah senilai 11 atau lebih maka dipakai penyebutan berlempung. Kemudian, apabila indeks plastis semua bagian halus dari tanah senilai 10 atau kurang maka dipakai penyebutan berlanau.



Gambar 2. 1 Grafik Plastisitas untuk Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO

(Sumber : AASHTO, 1991)

3. Apabila batuan (ukuran lebih besar dari 75 mm) ditemukan dalam sampel tanah yang akan ditentukan klasifikasi tanahnya, maka sebelumnya bebatuan itu mesti dipisahkan, namun disertai pencatatan persentase tanah yang turut keluar.

Selanjutnya, jika tanah diklasifikasikan memakai AASHTO sebagai sistemnya, maka data pengujiannya dicocokkan terhadap seluruh nilai pada Tabel 1, mulai kolom paling kiri hingga sisi kanan sampai menemukan kesesuaian angkanya (Das 1995).

Tabel 2. 1 Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO

Klasifikasi Umum	Tanah berbutir (Contoh tanah lolos saringan no. 200 < 35%)							Tanah lanau – lempung (Contoh tanah lolos saringan No. 200 > 35%)			
Klasifikasi kelompok	A-1		A-3		A-2			A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b			A-2-4	A-2-5	A-2-6				
	Maks 50										
	Maks 30	Maks 50									
Analisis saringan (% lolos)											
No. 10											
No. 40											
No. 200											
Sifat fraksi yang lolos saringan No. 40											
Batas cair (LL)											
Indeks plastis (PI)											
Tipe mineral yang paling dominan											
Penilaian sebagai bahan tanah dasar											

Sumber : (Das 1995)

b. Sistem Klasifikasi USCS (*Unified Soil Clasifikation System*).

Sistem klasifikasi berikut mulanya dikenalkan pada 1942, Casagrande mempergunakannya dalam proses membuat lapangan terbang (Das 1995). Kemudian, terdapat tiga kelompok besar yang secara pokok membagi tanah menurut sistem berikut, yakni:

1. Tanah berbutir kasar (*Coarse – Granied – Soil*), terdiri atas tanah berpasir maupun berkerikil yang mana jika disaring menggunakan ayakan No. 200 maka yang lolos tidak lebih dari 50%. Adapun *gravel*

atau kerikil maupun tanah berkerikil disimbolkan dengan huruf awal G sedangkan tanah berpasir atau ataupun pasir (*sand*) disimbolkan S.

2. Tanah berbutir halus (*Fine – Grained – Soil*), yakni tanah berlempung maupun berlanau yang lolos saat disaring memakai ayakan No. 200 hingga lebih dari 50%. Pembagian simbolnya yaitu lanau anorganik diawali huruf M, diikuti lempung anorganik bersimbol C, kemudian lempung ataupun lanau organik yang disimbolkan O. Selain itu, terdapat tanah yang tinggi kadar organiknya beserta tanah gambut atau *peat* yang disimbolkan Pt.
3. Tanah organik (Gambut/Humus), penentuannya diketahui melalui pengujian atau analisis sampel yang apabila terjadi selisih batas cair tanah, misal setelah masuk oven dan belum dioven selisihnya lebih dari 25%.

Pada pengklasifikasian, dipergunakan pula simbol lainnya. Penggunaannya seperti pada *high plasticity* atau plastisitas tinggi disimbolkan H, *low plasticity* atau plastisitas rendah bersimbol L, *poorly graded* atau gradasi buruk simbolnya P, dan *well graded* atau gradasi baik disimbolkan dengan W.

Kemudian, pada klasifikasi USCS terdapat sejumlah faktor yang mesti dipertimbangkan, yaitu:

1. Persentase lolos ayakan No. 200 dan No. 4.
2. Koefisien keseragaman (Cu) dan koefisien gradasi (Cc).
3. Batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI).

Apabila ketika diayak dengan No. 200 menghasilkan persentase lolosnya butiran di antara 5 hingga 12 persen maka simbol ganda seperti GW-GM, GP-GM, SW-SC, SP SM, dan SP-SC diperlukan. Klasifikasi tanah berbutir halus dengan simbol ML, CL, OL, MH, CH, dan OH didapat dengan menggambar batas cair tanah maupun indeks plastisitasnya ke skema plastisitas pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Klasifikasi Tanah Sistem *Unified*

Divisi Utama			Simbol Kelompok	Nama Umum
Tanah Berbutir Kasar Lebih dari 50% butiran tertahan pada ayakan No. 200	Pasir Lebih dari 50% fraksi	Kerikil bersih (hanya kerikil)	GW	Kerikil yang gradasinya baik, tidak terdapat atau ada sedikit kandungan butiran halus, percampuran kerikil dengan pasir.
			GP	Kerikil yang gradasinya buruk, tidak terdapat atau ada sedikit kandungan butiran halus, percampuran kerikil dengan pasir.
		Kerikil dengan butiran halus	GM	Percampuran kerikil dan lanau sehingga disebut kerikil berlanau.
			GC	Percampuran kerikil, lanau, dan pasir atau disebut kerikil berlempung.
	dari 50% fraksi kasar	Pasir Bersih (hanya kerikil)	SW	Pasir yang gradasinya baik, kandungan butiran halus tidak ada atau terdapat sedikit, pasir berkerikil.
			SP	Pasir yang gradasinya buruk, kandungan butiran halusnya tidak ada atau terdapat sedikit, pasir berkerikil.
		Kerikil dengan halus	SM	Pasir berlanau, campuran pasir-pasir lanau
			SC	Pasir berlempung, percampuran pasir-pasir-lanau
50% atau lebih lolos ayakan No. 200 Tanah Berbutir Halus	Lanau dan lempung Batas cair 50% atau kurang	ML	Lanau anorganik, pasir halus berlempung atau berlanau, serbuk batuan, pasir sangat halus	
		CL	Lempung anorganik yang plastisitasnya rendah hingga sedang, <i>lean clays</i> atau lempun “kurus”, berlanau, berpasir, maupun berkerikil	
		OL	Lempung berlanau organik maupun lanau organik yang plastisitasnya rendah	
	Lanau dan lempung dari 50%	MH	Lanau anorganik, elastis, diatomae, ataupun pasir halus diatomae.	
		CH	<i>Fat clays</i> atau lempung gemuk, lempung anorganik yang tinggi plastisitasnya	
		OH	Lempung organik dengan plastisitasnya sedang sampai tinggi	
Tanah-tanah dengan kandungan organik sangat tinggi		PT	Gambut atau <i>peat</i> , muck, maupun tanah lainnya yang tinggi dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi	

(Sumber : (Das 1995))

Selanjutnya, Tabel 2.3 di bawah merupakan penjabaran sistem klasifikasi *Unified Soil Classification System* (USCS) dengan membagi tanah menjadi beberapa kelompok utama bersumber dari penjabaran Bowles (1991) dalam Septayani (2016):

Tabel 2. 3 Kelompok Tanah Sistem Klasifikasi *Unified (USCS)*

Jenis Tanah	Prefiks	Sub kelompok	Sufiks
Kerikil	G	Gradasi Baik	W
Pasir	S	Gradasi Buruk	P
Lanau	M	Berlanau	M
Lempung	C	Berlempung	C
Organik	O	$W_L > 50$ Persen	L
Gambut	Pt	$W_L > 50$ Persen	H

(Sumber : Das, 1991)

2.3 Tanah Ekspansif

Tanah ekspansif merupakan tanah yang labil di mana jika terjadi kenaikan kadar air maka akan mengembang, namun jika sebaliknya yaitu penurunan kadar air maka tanah mengalami penyusutan. Umumnya, tanah berikut tinggi plastisitasnya, didominasi mineral montmorillonite dan kandungan lempung di dalamnya cenderung tinggi. Selain itu, saat tanah ini basah maka rentan amblas jika ada kendaraan melintas sebab kekuatannya amat rendah, di musim kering akan terjadi retakan susut yang dalam dan lebar namun kekuatannya tinggi. Karakteristik tersebut memicu penurunan daya tahan pengerasan struktur jalan raya hingga bisa memunculkan gelombang bahkan retakan pada jalan. Adapun pada bangunan, strukturnya dapat terdampak negatif, seperti terangkatnya pondasi atau retak pada dinding disebabkan ketidakstabilan tanah ekspansif.

Tanah ekspansif adalah tanah yang tidak stabil dimana akan mengembang apabila kadar air naik, dan akan menyusut bila kadar air turun. Tanah ekspansif identik dengan kandungan lempung dan mineral di

dalamnya, sehingga potensi pengembangan tanah makin besar sebab persentase mineral lempung yang terkandung makin masif. Selanjutnya, berlandaskan nilai batas-batas Atterberg terkait respons tanah terhadap air, secara umum batas plastis serta batas cair tanah ekspansif rentangnya besar, dengan lebih dari 30% sebagai Indeks Plastisitasnya (Chen 1975).

Kemudian secara universal, sifat ekspansif tanah dapat pula terdapat pada lanau berplastisitas tinggi (MH) maupun lempung yang rendah tingkat plastisitasnya (CL) sehingga tidak hanya pada jenis lempung yang tinggi plastisitasnya (CH). Tanah ekspansif yang tinggi tekanan permukaan maupun kadar air awalnya, maka ketika dilalui air tidak akan mengembang sebanyak tanah ekspansif yang rendah tekanan permukaan maupun kadar air awalnya (Jitno, 1996).



Gambar 2. 2 Tanah Ekspansif

(Sumber : Groundworks, 2023)

Adapun potensi ekspansif suatu tanah dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor berikut:

- A. Sifat-sifat tanah, mencakup kepadatan kering, susunan maupun struktur tanah, plastisitas, serta kandungan mineral lempungnya.
- B. Lingkungan, seperti keadaan kelembapan awal dan ragam kelembapan lainnya termasuk suhu, permeabilitas, vegetasi, sumber air buatan, drainase, air tanah, dan faktor iklim.
- C. Keadaan tegangan, meliputi riwayat tegangan, kondisi lapangan, pembebanan, dan profil tanah.

Berdasarkan sifat-sifat tanah (pembentuk butirannya) identifikasi tanah ekspansif, dapat dilakukan dengan menguji jenis material, di antaranya

eksistensi aktif dari Na-Montmorillonite menjadi indikator pertama. Namun, pada rekayasa sipil, lebih lazim uji indeks properties tanah (Junior et al. 2015).

2.4 Sifat Fisik Tanah

Tanah memiliki massa yang mana susunan elemennya disertai suatu sifat yang disebut dengan sifat fisik tanah (Kusuma and Mina 2016). Berikut ialah sejumlah tahapan guna mengidentifikasi fisik tanah:

1. Kadar Air

Tanah secara mendasar tersusun atas bagian berongga dan bagian padat. Udara dan air mengisi bagian rongga sedangkan partikel padat dari tanah menyusun bagian yang padat. Kemudian, terdapat uji sampel tanah guna mengetahui tingkat kadar airnya yang hasilnya berupa persentase. Penghitungannya melalui perbandingan berat kandungan pada tanah dan bobot butiran tanah tersebut.

Atas dasar tersebut, dapat dikatakan dengan membandingkan kandungan berat air pada tanah dan berat kering tanah maka dapat diidentifikasi kadar airnya. Fungsi lainnya yakni juga bisa dipergunakan dalam menentukan ragam karakteristik tanah.

Pada materi pengujian yang tanpa kandungan bahan organik, pengeringannya melalui pembakaran langsung sesudah disiram spiritus ataupun dibakar dikeringkan di atas kompor. Adapun proses menimbang serta mengeringkan dilaksanakan secara repetitif hingga dicapai berat konstan.

Pengujian kadar air dinyatakan presentase, yaitu perbandingan debit air yang mengisi rongga bahan tanah dan berat partikel padatnya. Pengujian dilakukan sesuai (SNI 1965 2008). Rumus perhitungan kadar air tanah sebagai berikut :

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_3} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

w = kadar air, (%)

- W_1 = Berat cawan dan tanah basah (gram)
- W_2 = Berat cawan dan tanah kering (gram)
- W_3 = Berat cawan (gram)
- $(W_1 - W_2)$ = Berat air (gram)
- $(W_2 - W_3)$ = Berat tanah kering (gram)

2. Berat Jenis

Menentukan berat jenis tanah ialah dengan mengukur berat sejumlah tanah yang isinya diketahui. Uji tersebut dilakukan guna memenuhi sifat dan konsistensi material. Uji berat jenis pada penelitian ini mengacu pada (SNI 1964: 2008). Pada tanah asli, umumnya memakai suatu cincin yang masuk ke tanah hingga isinya terpenuhi, selanjutnya diratakan bagian bawah maupun atasnya untuk kemudian dilakukan penimbangan. Sesudah diperoleh nilai G_s , maka dapat ditentukan macam tanah melalui berat jenisnya tersebut yang mengacu pada data di bawah ini:

Tabel 2.4 Nilai Berat Jenis Tanah

Macam Tanah	Berat Jenis
Kerikil	2.65 - 2.68
Pasir	2.65 - 2.68
Lanau Organik	2.62 - 2.68
Lempung Organik	2.58 - 2.65
Lempung Anorganik	2.68 - 2.75
Humus	1.37
Gambut	1.25 - 1.80

(Sumber : SNI Berat Jenis Tanah, 2008)

Berlandaskan SNI (1964: 2008), berikut ialah rumus guna mengidentifikasi berat jenis tanah:

$$G_s = \frac{W_2 - W_1}{(W_4 - W_1) + (W_3 - W_2)} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan :

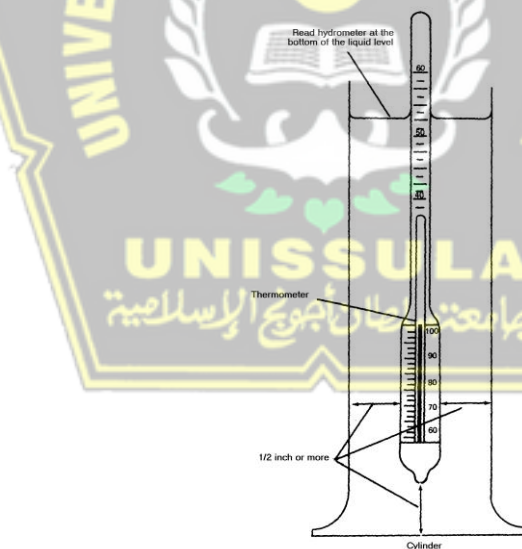
G_s = Berat Jenis

- W_1 = Berat picnometer (gram)
 W_2 = Berat piknometerdan tanah kering (gram)
 W_3 = Berat piknometer, tanah, air (gram)
 W_4 = Beratt picnometer dan air (gram)

3. Analisis Ukuran Butiran

Analisa ukuran butiran merupakan langkah menentukan satuan persen berat butiran melalui pengukuran diameter lubang tertentu dalam satu saringan (Hardiyatmo, 1992). Pada proses analisisnya, beberapa saringan dengan diameter lubang bervariasi kemudian diurutkan dari yang paling kecil di bawah hingga paling besar.

Analisis ukuran butiran (Sieve analysis - Hidrometer analisis) merupakan metode yang sering di gunakan untuk mendistribusikan ukuran partikel dalam tanah. Sieve analysis digunakan untuk partikel kasar dengan metode ayakan, sementara Hydrometer analysis digunakan untuk partikel halus dengan metode sedimentasi dalam cairan.



Gambar 2. 3 Hidrometer

(Sumber : SNI Analisis Ukuran Butir, 2008)

Penyaringan ialah metode di mana umumnya langsung dimaksudkan guna menentukan ukuran partikel dengan didasarkan pada batas batas

bawah ukuran lubang saringan yang digunakan. Pengujian dilakukan sesuai dengan (SNI 3423:2008 2008).

Berikut merupakan tiga penggolongan pokok dari tanah:

- a. Batu kerikil dan pasir. Tersusun atas beragam bentuk dan ukuran pecahan batu. Namun, terkadang zat-zat tertentu turut dapat membentuk butiran batu kerikil sehingga tidak selalu berasal dari pecahan batu.
- b. Lempung. Bersifat kohesif dan memiliki plastisitas sebab tersusun atas butiran sangat kecil. Struktur antar butirannya saling melekat yang dipicu adanya sifat kohesif. Selain itu, strukturnya kemungkinan tidak mudah retak dan isinya tidak berubah karena plastisitas.
- c. Lanau, ialah transisi antar pasir halus maupun lempung. Sifatnya memperlihatkan dilatasi yang tidak terdapat pada lempung bahkan air dapat menembus lapisannya dan plastisitasnya kurang. Jika lanau digetarkan ataupun diguncang, maka terdapat indikasi untuk hidup. Kemudian, adanya dilatasi memperlihatkan nilai perubahan isi jika bentuk lanau diubah.

Tanah secara rinci diklasifikasikan sebagai berikut, dimulai dari yang terkecil: Lempung $< 0,002$ mm, Lanau $0,002$ mm– $0,06$ mm, Pasir halus $0,06$ mm– $0,2$ mm, Pasir sedang $0,2$ mm– $0,6$ mm, Pasir kasar $0,6$ mm– 2 mm, Kerikil 2 mm– 8 cm, Kerakal Batu 8 – 20 cm, dan Berangkal > 20 cm.

4. *Atterberg Limit*

Atterberg Limit merupakan pengujian yang dipergunakan dalam penentuan batasan konsistensi tanah, khususnya pada tanah dengan butiran halus, misal lempung. Uji ini digunakan dalam geoteknik untuk menilai perilaku tanah berdasarkan kadar air . Pengujian ini ada tiga batas yaitu :

A. Batas Cair/ *Liquid Limit* (LL)

Batas Cair tanah merupakan kadar air minimal yang dapat memicu perubahan sifat tanah jadi plastis dari yang semula dalam kondisi cair. Adapun besarnya digunakan untuk menentukan sifat dan klasifikasi tanah.

Konsistensi dari lempung dan tanah kohesif lainnya sangat dipengaruhi oleh kadar air dari tanah. Metode penentuan batas cair atau LL yakni tanah yang telah lolos saringan no.40 dicampur dengan air suling, lalu dimasukkan ke mangkok Casagrande, kemudian alat LL diputar dilanjutkan penghitungan total ketukan yang dibutuhkan guna menutupi celah tanah, selanjutnya sebagian tanah diambil untuk dioven hingga 24 jam guna mengetahui kadar airnya (1967 2008).

B. Batas Plastis / *Plastic Limit* (PL)

Batas Plastis ialah kadar air ketika tanah menjadi semi solid dari yang semula pada kondisi plastis. Penghitungan batasan berikut didasarkan pada persentase bobot air dengan tanah kering di benda yang ujinya.

Proses pengujian tersebut kemudian memerlukan benda uji berupa materi tanah yang lolos disaring dengan ayakan No. 40 atau berukuran 0.425 mm. Selanjutnya, dilakukan percampuran bersama air mineral atau suling sampai plastisitasnya cukup untuk dibentuk bulat panjang ataupun digeleng sehingga diameternya sampai 3 mm.

Pada mekanisme penggelengannya, bisa menerapkan *procedure alternative* berupa alat penggeleng batas plastis ataupun manual menggunakan telapak tangan. Apabila telah terjadi retakan hingga berdiameter 3 mm pada benda uji, maka bisa dipisahkan dan kadar airnya diukur. Perolehan dari uji berikut yaitu batas plastis yang ditunjukkan oleh kadar air pada tanah tersebut.

C. Indeks Plastis/ *Plastic Index* (PI)

Indeks Plastis (PI) yaitu hasil pengurangan parameter batas cair (LL) dengan batas plastis (PL). Atas dasar tersebut, PI menunjukkan nilai keplastisan tanah. Diketahui butiran lempung pada tanah ada banyak apabila nilai PI tanahnya tinggi. Persamaan nilai Indeks Plastis (PI):

$$PI = LL - PL \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

PI = Indeks plastis

LL = Batas Cair

PL = Batas Plastis

Tabel 2. 5 Nilai Indeks Plastis

PI	Sifat	Macam Tanah	Kohesi
0	Non Plastis	Pasir	Non Kohesif
<7	Rendah	Lanau	Kohesif Sedang
7-17	Sedang	Lempung Berlanau	Kohesif
>17	Tinggi	Lempung Murni	Kohesif

(Sumber : Hardiyatmo, 2017)

D. Batas Susut / *Shrinkage Limit* (SL)

Penggunaan batas susut atau SL yakni pada pengukuran kadar air di posisi ketika tanah bertransisi menjadi padat dari yang semula semi padat. Di bawah batas ini, volume tanah tidak berubah jika kadar air berkurang. Berikut perhitungan SL yang didasarkan pada SNI (3422: 2008):

$$W_s = \left(\frac{W_1 + W_2}{V_2} \times \frac{V_1 - V_2}{W_2} \right) \times 100\% \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan:

W₁ = berat tanah basah (gram)

W₂ = berat tanah kering oven (gram)

V₁ = volume tanah basah (cm³)

V₂ = volume tanah kering (gram/cm³)

E. *Free Swelling*

Free Swelling merupakan analisis terstandar guna mengetahui *swelling* atau potensi pengembangan tanah saat terjadi penyerapan air. Pada geoteknik, uji berikut termasuk krusial, khususnya dalam merencanakan bangunan. Apabila parameter *Free Swelling* telah

diketahui, maka insinyur bisa melakukan antisipasi gerakan tanah di mana bisa membuat rusak konstruksi ataupun memutuskan metode tepat guna memperbaiki tanah. Berikut rumus penghitungan indeks pengembangan bebas:

$$FSI = \frac{V_f - V_i}{V_i} \times 100 \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan :

FSI = Free Swelling Indeks

V_f = Volume akhir (setelah pengembangan)

V_i = Volume awal (sebelum pengembangan)

2.5 Sifat Mekanis Tanah

Sifat mekanis tanah merupakan karakter tanah di mana berkaitan dengan responnya terhadap gaya atau beban yang diberikan. Sifat ini penting dalam bidang geoteknik dan rekayasa sipil karena menentukan bagaimana tanah akan berperilaku dalam mendukung struktur, seperti bangunan, jalan, dan bendungan. Untuk mengetahui sifat mekanis tanah ada beberapa tahapan antara lain :

1. *Standart Compaction (Proctor Standart)*

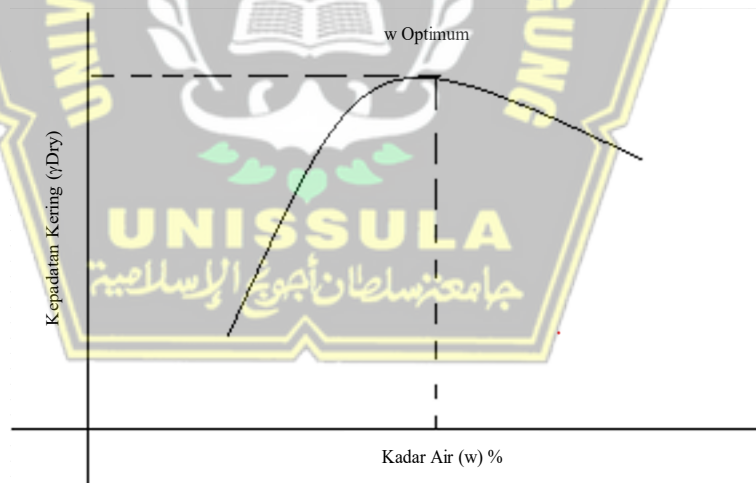
Menurut (Andriani, Yuliet, and Fernandez 2012) pemadatan *Standart Compaction* ialah mekanisme pemadatan butiran tanah hingga terdapat reduksi volume air maupun udara melalui langkah mekanis. Pada area operasional, upaya kompaksi dikaitkan pada total penggilasan pada mesin gilas, ataupun perihal lainnya di mana memiliki kesamaan prinsip pada volume tanah tertentu. Pada ruang laboratorium, tumbukan menjadi sumber terjadinya pemadatan. Prosesnya, ketika proses memadatkan berlangsung, pada suatu cetakan yang berisi sejumlah lapis tanah dijatuhi palu dengan elevasi khusus dan dilakukan secara repetitif.

Berikut merupakan dampak menguntungkan sebab terjadinya pemadatan (Hardiyatmo, H.C., 1992, hal 53):

- a. Terjadi reduksi dampak air terhadap tanah.

- b. Tanah makin bertambah kuat.
- c. Berkurangnya kejadian volume yang berubah sebab kadar air berfluktuasi.
- d. Memperkecilkan pemampatan dan daya rembes air.

Pemadatan tanah bertujuan untuk menentukan kepadatan maksimum tanah dengan cara tumbukan yaitu dengan mengetahui hubungan antara kepadatan tanah dan kadar air. Terdapat kadar air optimum, yakni kadar air yang memaksimalkan berat kering. Adapun batas plastis dipakai guna memperoleh kadar air optimal pada tanah berbutir halus. Kemudian, melalui pengujian pemadatan tanah *proctor standard* diperoleh kurva yang memvisualisasikan hubungan kepadatan dan kadar air. Penjelasannya, nilai (γ_d maksimum) menjadi puncak kurva, ordinat ditempati berat volume tanah kering, dan absis ditunjukkan dengan kadar air (w) (SNI 1742 2008). Selanjutnya, dapat dilihat pada Gambar 2.4, kadar air optimum berada pada titik pertemuan garis vertikal kadar air dengan garis horizontal kepadatan kering serta melintasi absis.



Gambar 2. 4 Grafik Hubungan Kepadatan Kering dengan Kadar Air
(Sumber : SNI Uji Kepadatan Ringan, 2008)

2. *California Bearing Ratio (CBR)*

Metode CBR bermula dari O. J. Porter yang menciptakan dan *California State Highway Departement* mengembangkannya, namun selanjutnya *United State Army Corps of Engineers* melakukan

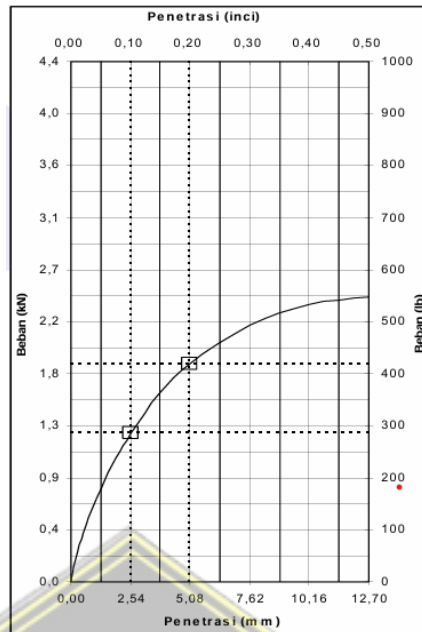
pengembangan lanjutan serta memodifikasinya. Pada prosesnya, guna menemukan parameter ketebalan lapisan perkerasan, CBR mengintegrasikan prosedur uji beban penetrasi pada area kerja ataupun laboratorium dan rencana empiris. Perihal berikut dijadikan tahapan perencanaan perkerasan lentur (*flexible pavement*) suatu jalan. Tebal suatu bagian perkerasan ditentukan oleh nilai CBR.

CBR (California Bearing Ratio) dihitung dengan membandingkan *test load* atau beban percobaan terhadap *standard load* atau beban standar guna mengetahui daya dukung tanah yang kemudian hasilnya berbentuk persentase. Uji laboratorium CBR berdasarkan SNI 1744 : 2012 (Andriani, Yuliet, and Fernandez 2012).

Berikut nilai persamaan CBR untuk penetrasi beban standart 2,5 mm dan 5,0 mm dengan rumus :

$$CBR = \frac{\text{Beban Uji}}{\text{Beban Standart}} \times 100 \dots\dots\dots (2.6)$$

Selanjutnya, grafik uji mencakup data keterkaitan beban dan kedalaman penetrasi. Sejumlah kondisi awal kurva beban cekung diakibatkan kurangnya pemerataan pemadatan ataupun pemicu lainnya (SNI 1744 2012). Atas dasar tersebut, terjadi koreksi pada titik nol. Berikut ialah visualisasi grafik uji CBR.



Gambar 2.5 Grafik Pengujian CBR Laboratorium
(Sumber : SNI Pengujian CBR Laboratorium, 2012)

3. Triaksial UU

Uji triaksial UU (Unconsolidated Undrained) merupakan satu di antara ragam uji triaksial yang digunakan untuk mengukur kuat geser tanah dalam kondisi tidak terkonsolidasi dan tidak terdrainase. Uji ini penting untuk menentukan parameter kekuatan geser tanah, terutama untuk tanah kohesif, dalam kondisi pembebanan cepat. Uji UU dimaksudkan guna mengidentifikasi kuat geser tanah dalam kondisi tanpa didrainase, di mana seringkali relevan dalam analisis stabilitas lereng dan daya dukung tanah pada kondisi pembebanan cepat. Dalam pengujian ini di dapat nilai kohesi (c), dan sudut geser (ϕ). Adapun bidang-bidang tegangan utama dijelaskan sebagai tiga bidang yang bekerja tanpa tegangan geser namun dengan tegangan normal dan bidangnya saling tegak lurus. Untuk perhitungan kita memakai lingkaran mohr yang adalah penggambaran situasi banyak tegangan di satu bidang, dinyatakan geser atau normal. Adapun parameter keruntuhan Mohr-Coulomb yaitu perolehan pengujian $\tau = c + \sigma \tan \phi$ atau triaksial yang diketahui sebagai nilai kuat geser tanah. Kemudian, jika tanpa diberi tegangan keliling, maka

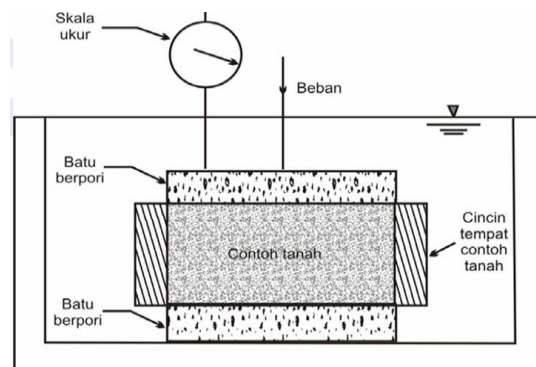
situasi kuat geser tanah tersebut disebut kohesi. Sudut geser dalam ϕ ialah unsur kuat geser tanah di mana bersumber dari pergesekan butiran tanah.



Gambar 2. 6 Alat triaksial
(Sumber : Vj Tech, 2017)

4. Konsolidasi Konvensional (*Oedometer*)

Konsolidasi Konvensional (*Oedometer*) adalah tes laboratorium dalam geoteknik yang digunakan untuk menentukan sifat konsolidasi tanah, tujuan nya adalah untuk memperoleh parameter koefisien kompreibilitas, koefisien konsolidasi (C_v), Indeks kompresibilitas (C_c), dan hubungan waktu dan penurunan komulatif benda uji tanah tidak terganggu atau terganggu, di mana nantinya dimanfaatkan guna kebutuhan kajian penghitungan, seperti penurunan total beserta kecepatan penurunan. Pengujian berikut menggunakan (SNI 03-4813-1998 1998).



Gambar 2. 7 Sketsa Konsolidasi Oedometer

(Sumber : SNI Pengujian Konsolidasi Satu Demensi, 2011)

Berikut rumus perhitungan hasil konsolidasi konvensional untuk mengetahui koefisien kompresibilitas (M_v), Koefisien konsolidasi (C_v), Indeks kompresibilitas (C_c), Hubungan waktu (t), serta Penurunan kumulatif (S_t) adalah :

a. Koefisien kompresibilitas

Koefisien kompresibilitas (M_v) digunakan untuk mengukur perubahan volume tanah akibat perubahan tekanan efektif.

$$M_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma' \cdot (1 + e_0)} \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan :

Δe = Perubahan angka pori.

$\Delta \sigma'$ = Perubahan tegangan efektif (kpa)

e_0 = Angka pori awal.

b. Koefisien konsolidasi

Penggunaan koefisien konsolidasi (C_v) yakni dalam menilai kecepatan proses konsolidasi dalam tanah.

$$C_v = \frac{T_v \cdot H^2}{t} \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan :

T_v = Faktor waktu konsolidasi.

H = Lapisan ketebalan (m)

T = waktu yang dibutuhkan untuk konsolidasi tertentu (s)

c. Indeks kompresibilitas

Indeks kompresibilitas (C_c) digunakan untuk memperkirakan perubahan volume tanah akibat tekanan efektif.

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}} \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan :

Δe = Perubahan angka pori

σ'_2 = Tegangan efektif awal (kpa)

σ'_1 = Tegangan efektif akhir (kpa)

d. Hubungan waktu (t) dan penurunan kumulatif (St)

Penurunan kumulatif adalah hasil konsolidasi total akibat perubahan tekanan.

$$St = \frac{H \cdot Cc}{1 + e_0} \cdot \log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1} \dots \dots \dots (2.10)$$

Untuk mengetahui hubungan waktu dan tingkat konsolidasi (U) :

$$U = \frac{St(t)}{1 + e_0} = \text{Fungsi T-v (dari teori Terzaghi)}$$

Dimana :

$$Tv = \frac{Cv \cdot t}{H^2} \dots \dots \dots (2.11)$$

Keterangan :

$St(t)$ = Penurunan pada waktu t.

$St(\infty)$ = Penurunan total setelah konsolidasi.

Tv = Faktor waktu konsolidasi

U = Tingkat konsolidasi (%)

2.6 Pengembangan dan Aktivitas Tanah

Pada tanah ekspansif, pengembangannya akan makin berpotensi terjadi jika mineral lempungnya makin plastis, sehingga sifat plastisitas memengaruhi kondisi tanah ekspansif. Perihal berikut bisa pula memicu rusaknya konstruksi di atas tanah sebab sangat tingginya karakter kembang susut tanah. Pada suatu analisis diketahui apabila kandungan tanah berupa fraksi seukuran lempung di mana persentase berat butirannya tidak melebihi 2μ dan persentasenya tersebut bertambah maka indeks plastisitasnya (PI) ikut bertambah sebab korelasinya garis lurus (Skempton, 1953). Akan tetapi, garis korelasi yang dimiliki setiap tanah tidak selalu sama sebab tergantung korelasi fraksi berukuran lempung dengan indeks plastisitasnya. Kondisi tersebut dipicu kandungan mineral lempung setiap tanah yang juga tidak

sama. Berlandaskan perolehan analisis tersebut, diketahui satu besaran yang disebut aktivitas di mana didefinisikan sebagai inklinasi garis yang menunjukkan korelasi persentase butiran lolos diayak dengan saringan 2 μ dan PI. Untuk menentukan potensi pengembangan dan aktivitas tanah, peneliti terdahulu menggunakan cara atau kriteria yaitu :

a. Teori Seed et al (1962)

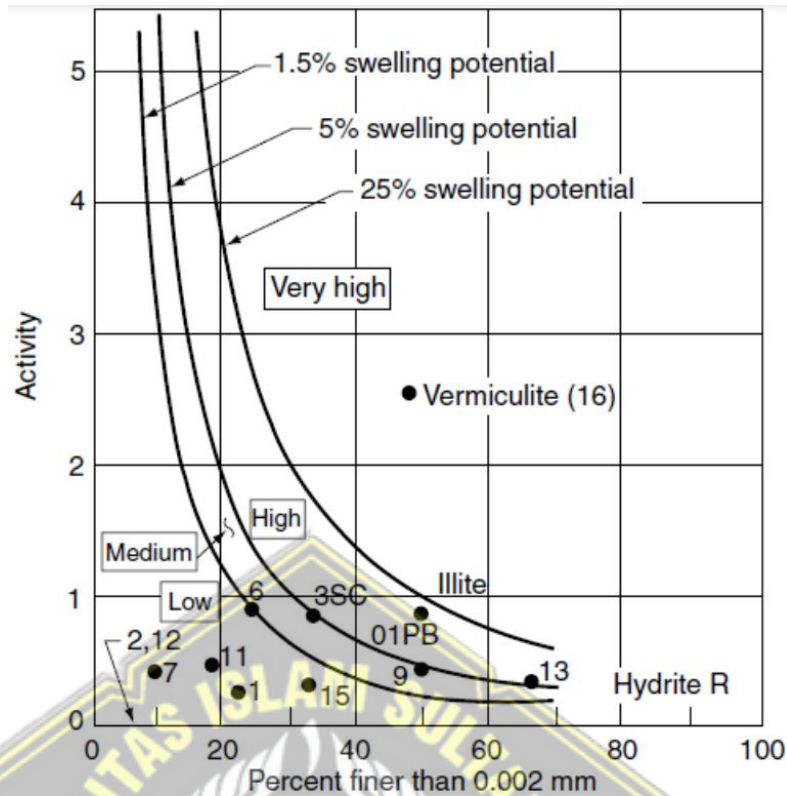
Pada proses mengembangnya tanah, terdapat sejumlah faktor yang memengaruhi, seperti *surchage pressure* atau tekanan pada permukaan tanah, konsentrasi elektrolit di air, metode pemadatan, berubahnya kadar air, kepadatan, struktur tanah, jumlah serta jenis lempung. Selain itu, peluang terjadinya pengembangan dapat juga diketahui melalui membandingkan persentase fraksi lempung dan nilai aktivitasnya.

Tabel 2. 6 Nilai Potensi Pengembangan

<i>Swelling Potential (%)</i>	<i>Swelling Degree</i>
0 – 1,5	<i>Low</i>
1,5 – 5	<i>Medium</i>
5 – 25	<i>High</i>
> 25	<i>Very High</i>

Sumber : Seed et al (1962)

Peneliti terdahulu mengklasifikasikan tanah ekspansif dalam bentuk grafik agar mempermudah dalam pembacaan, berikut visualisasi datanya:



Gambar 2. 8 Garfik Klasifikasi Potensi Pengembangan

Sumber : Seed et al (1964)

b. Teori Van de Merve (1964)

Metode yang digunakan Van de Merve (1964) yaitu memakai grafik plastisitas tanah guna mengidentifikasi tingkat berkembangnya tanah lempung. Van de Merve mengembangkan diagram klasifikasi tanah ekspansif berdasarkan dua parameter utama:

1. Fraksi lempung (%) yaitu persentase partikel lempung dalam tanah.
2. Indeks Plastisitas (PI) yaitu kemampuan tanah untuk berubah bentuk tanpa mengalami keretakan.

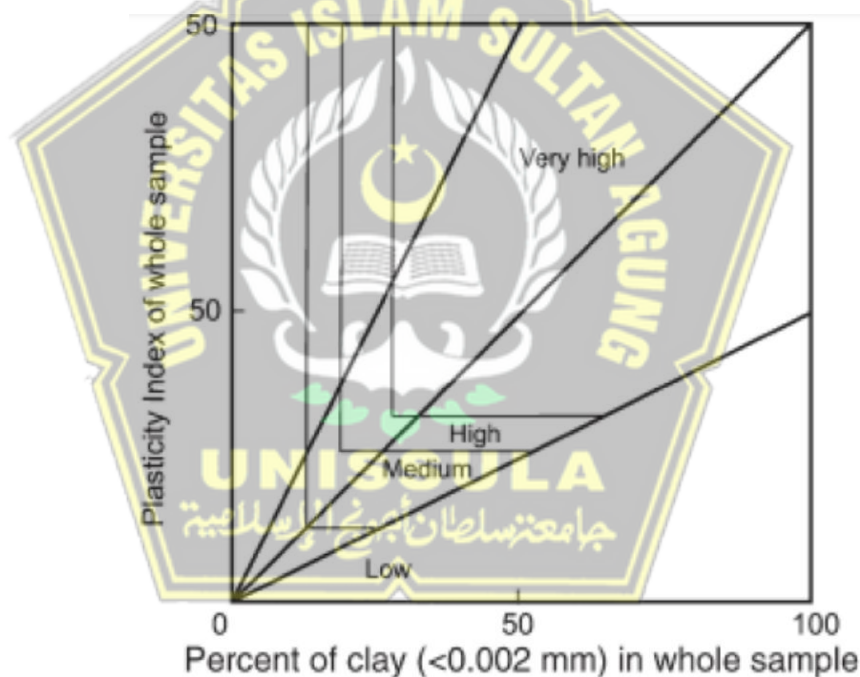
Berikut merupakan kategori potensi pengembangan tanah menurut diagram Van de Merve :

Tabel 2. 7 Potensi Pengembangan

Indeks Plastisitas	% Fraksi Lempung	Potensi Pengembangan
Rendah (< 15 %)	Rendah (<15%)	Rendah
Sedang (10 < PI < 30)	Sedang (15% - 35%)	Sedang
Tinggi (PI > 30)	Tinggi (>35%)	Tinggi

Sumber : Van de Merve (1964)

Adapun total partikel yang ukurannya tidak melebihi 0.002 mm memiliki korelasi erat dengan berubahnya volume tanah beserta indeks plastisitasnya (PI).



Gambar 2. 9 Grafik Hubungan Antara PI dan Presentase Fraksi Lempung

Sumber : Van de Merve (1964)

2.7 Tekanan Pengembangan (*Swelling Pressure*)

Tekanan pengembangan adalah tegangan terapan maksimum yang dibutuhkan untuk menjaga volume tetap konstan ($\Delta V = 0$). Pengujian tekanan pengembangan juga bisa dilakukan dengan membiarkan sampel

mengalami fluktuasi maksimal volume, selanjutnya dilaksanakan augmentasi beban pada sampel hingga fluktuasinya jadi nol.

Chen (1988) menjelaskan tekanan pengembangan menjadi desakan yang diperlukan guna mengantisipasi tanah makin berkembang dengan bobot volume kering ditempat. Perihal berikut diberlakukan pada *undisturb* atau tanah asli, namun pada *remolded* atau tanah rekonstruksi dengan kepadatan realitinya 100%. Dengan kata lain, tekanan pengembangan termasuk desakan yang diperlukan supaya mampu menjaga berat volume kering (Hardiyanto, 2010).

Selain itu, Chen (1988) beserta sejumlah ahli menegaskan kembali, hanya berat volume kering yang berkaitan dengan tekanan pengembangan, sedangkan variasi, tingkat ketebalan tanah, maupun kadar air awal tidak menjadi faktor yang mengganggu sebab termasuk landasan sifat fisik tanah ekspansif. Akan tetapi, terdapat peneliti menyatakan hal tersebut bervariasi sehingga evaluasinya tidak disetujui (Hardiyanto, 2010).

Selanjutnya, besaran *heaving* ataupun tekanan pengembangan tanah termasuk peranan atas Atterbarg yang pada perihal berikut dipergunakan kadar air awal, berat isi kering, serta *liquid limit* (Wiseman G., Komorinik A., Greenstein J., 1985). Selain itu, turut menganjurkan supaya mempergunakan koefisien yang bukan parameter – parameter tanah. Adapun anjuran koefisiennya tersebut, menurut Wiseman, mampu memvisualisasikan jika terjadi kenaikan kadar air awal maka akan ada penurunan tekanan. Namun, diperlukan modifikasi jika akan mengetahui tekanan pada arah lateral sebab penghitungan Wiseman hanya pada vertikal.

2.8 Konsolidasi

Konsolidasi merupakan kejadian ketika dari dalam pori tanah keluar air sebab adanya efektivitas tambahan tekanan di lapisan tanah kompresif hingga kemudian pada tanah dasar berlangsung penurunan ataupun pemampatan. Adapun disebabkan peristiwa tersebut, untuk rentang waktu lama, tanah memasuki proses konsolidasi (Studi et al. 2014).

Penambahan beban di atas suatu permukaan tanah dapat menyebabkan lapisan tanah di bawahnya mengalami pemampatan. Pemampatan tersebut

disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi partikel, udara ataupun air keluar dari dalam pori, serta penyebab lainnya. Sebagian ataupun seluruh faktor itu memiliki korelasi terhadap kondisi tanah terkait. Pada umumnya, tanah yang mengalami penurunan (*settlement*) dipicu adanya pembebanan bisa diklasifikasikan menjadi:

- a. Penurunan Konsolidasi (*Consolidation Settlement*), yaitu perolehan atas berubahnya volume tanah jenuh air yang menjadi dampak munculnya air di mana mulanya berada di pori tanah.
- b. Penurunan Segera (*Immediate Settlement*), yaitu dampak atas deformasi elastisitas tanah kering, basah, maupun jenuh air dengan tidak disertai berubahnya kadar air. Penghitungan penurunan berikut secara umum dilandaskan ke penurunan yang diperoleh melalui teori elastisitas (Junior et al. 2015).

2.9 Dasar Konsolidasi

Pada aktivitas tanah, akan terjadi kenaikan mendadak pada angka tekanan air pori jika penambahan beban dilakukan dalam lapisan tanah jenuh air. Kemudian, untuk tanah *permeable* yang berpasir dan mudah ditembus air, aliran air bisa cepat hingga pengalirannya lancar melalui pori-pori lalu muncul ke permukaan sehingga bisa cepat selesai sebagai dampak atas naiknya tekanan air pori. Selain itu, munculnya air dari pori umumnya diiringi volume tanah yang berkurang yang kemudian memicu lapisan tanah menjadi turun. Dengan proses tersebut, penurunan konsolidasi maupun segera bisa berbarengan terjadi sebab aliran air pori tanah berpasir keluar tanpa gangguan.

Selanjutnya, *settlement* atau penurunan dapat segera terjadi jika ada penambahan tegangan pada lapisan tanah lempung jenuh air *compressible* atau mampu mampat. Adapun koefisien pasir lebih besar dibanding koefisien rembesan lempung dan berdampak pada pengurangan bertahap dalam waktu sangat lama bagi penambahan tekanan air pori sebab adanya pembebanan. Jadi untuk tanah lempung-lembek perubahan volume yang disebabkan oleh keluarnya air dari dalam pori (yaitu konsolidasi) akan

terjadi sesudah penurunan segera. Penurunan konsolidasi yang terjadi umumnya lebih lama, lambat, serta lebih besar dibanding penurunan segera (Junior et al. 2015).

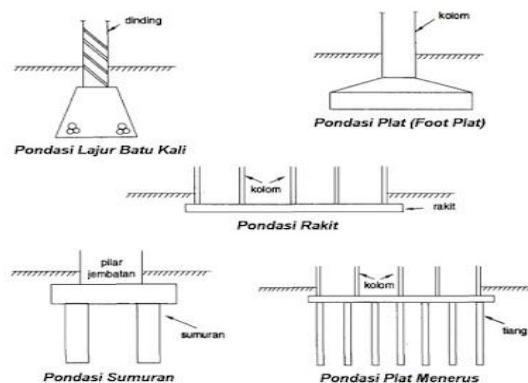
2.10 Pondasi

Pondasi adalah istilah yang digunakan saat meneruskan beban yang beroperasi di bangunan menuju lapisan tanah yang berposisi di bawahnya pondasi. Pondasi merupakan komponen struktur rekayasa yang menyalurkan beban keseluruhan struktur termasuk bebannya sendiri kedalam tanah beserta bebatuan pada bagian bawah (Bowles, 1997).

Pada tiap bangunan penduduk, misal menara, tanggul, terowongan, jalan, jembatan, gedung, dan lain-lain sudah semestinya memiliki pondasi akurat untuk memberi sokongan. Pada teknik sipil, term pondasi dijabarkan menjadi konstruksi bangunan di atasnya lapisan tanah yang daya dukungnya cukup kuat. Adapun penyusunan rencana pondasi disebut tepat apabila penerusan beban ke tanah oleh pondasi tidak melebihi daya tahan tanah yang dipakai (Braja M.Das).

2.11 Macam-macam Pondasi

Pondasi terbagi jadi dua yakni pondasi dalam dan dangkal. Keduanya bergantung pada posisi tanah keras serta komparasi lebar tapak pondasi dan kedalamannya. Pondasi dalam diterapkan apabila permukaan tanah jauh dari lapisan tanah keras. Adapun pondasi dangkal diterapkan apabila permukaan tanah letaknya dekat dengan lapisan tanah keras. Adapun pondasi dangkal kedalamannya kurang atau sama dengan lebar pondasi ($D \leq B$).



Gambar 2. 10 Macam – macam pondasi

Sumber : cerdas ulet kreatif (2024)

Berikut macam-macam pondasi antara lain :

1. Pondasi telapak ialah jenis pondasi yang menyokong kolom dengan berdiri sendiri.
2. Pondasi memanjang, diterapkan guna menyokong deretan kolom yang jaraknya dekat ataupun dinding memanjang supaya jika diterapkan bersama pondasi telapak, antar seluruh sisinya nanti berhimpitan.
3. Pondasi rakit, dipakai guna menyokong struktur banyak kolom yang jaraknya berdekatan dari semua arah ataupun guna menyokong bangunan yang berdiri di atas tanah lunak, supaya jika diterapkan bersama pondasi telapak, antar seluruh sisinya nanti berhimpitan.
4. Pondasi sumuran, diterapkan apabila letak tanah dasar yang kuat di posisi yang cenderung dalam serta menjadi wujud transisi pondasi tiang serta dangkal (*peek, dkk. 1953*). Adapun rumus nilai kedalaman (D_f) di bagi lebarnya (B) dipakai guna mendiferensiasi pondasi dangkal dan sumuran. Pada pondasi dangkal yaitu $D_f/B < 1$ sedangkan pondasi sumuran $D_f/B > 4$.
5. Pondasi tiang, diterapkan apabila letak tanah keras sangatlah dalam dan jika di kedalaman normal, tanah pondasi tidak dapat menyokong bebannya. Begitu juga apabila letak pondasi bangunan di tanah timbunan dengan elevasi cukup tinggi, yang memicu penurunan besar kemungkinan terjadi pada bangunan. Adapun pada pondasi tiang lazimnya lebih dalam dan panjang dengan diameter lebih kecil.

2.12 Keruntuhan Pondasi

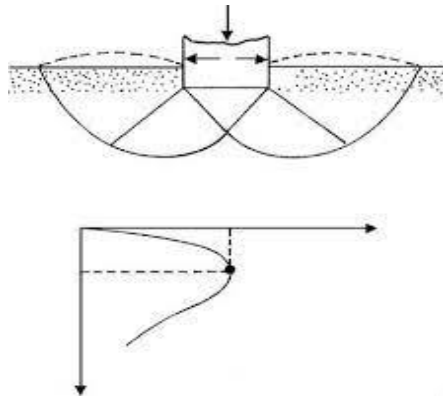
Secara umum, pondasi dangkal seperti pondasi plat penuh, lajur, ataupun setempat dapat menemui 3 pola keruntuhan, bergantung pada kepadatan serta jenis tanahnya. Kemudian, guna menganalisis karakter tanah ketika pembebanan awal hingga keruntuhan, dilaksanakan peninjauan

atas pondasi kaku di kedalaman dasar di mana tak melebihi dari lebarnya. Berikut 3 fase keruntuhan pondasi sebagai berikut :

1. Keruntuhan geser umum (General Shear Failure)

Pondasi runtuh dapat terjadi berdasarkan bidang runtuhnya di mana bisa dianalisis secara terperinci. Tanah pada zona geser terbentuk persis di bagian terdasar Zona A atau pondasi di mana memberi tekanan ke bawah terhadap tanah dan memicu plastisitas aliran tanah di zona B. Adapun Zona C menjadi tempat tanah pasif yang menahan pergerakan ke luar dari Zona A maupun B. Kemudian, akan terjadi pergerakan tanah yang memicu tanah menggebung di sisi-sisi pondasi ketika tahanan tanah pasif bagian C telah melebihi batas. Pembentukan area longsor yang terjadi yakni berwujud garis lurus serta lengkungan yang tembus sampai lapisan atas tanah. Ketika keruntuhan berlangsung, pergerakan massa tanah mengarah ke luar serta atas. Umumnya, keruntuhan geser berlangsung secara tiba-tiba dengan disertai tergulingnya pondasi. Ciri-ciri keruntuhan geser umum:

- a) Bagian tanah di atas bidang runtuh telah sepenuhnya memasuki kesetimbangan plastis
- b) Terjadi kenaikan atau pengembangan lapisan teratas tanah pada area sekitar
- c) Pada satu sisi telah terjadi keruntuhan hingga memicu kemiringan pondasi
- d) Dialami tanah kaku dan padat sebab rendahnya kompresibilitas tanah
- e) Teramatinya kapasitas dukung batas (q_u) secara optimal.



Gambar 2. 11 Keruntuhan geser umum (*General Shear Failure*)

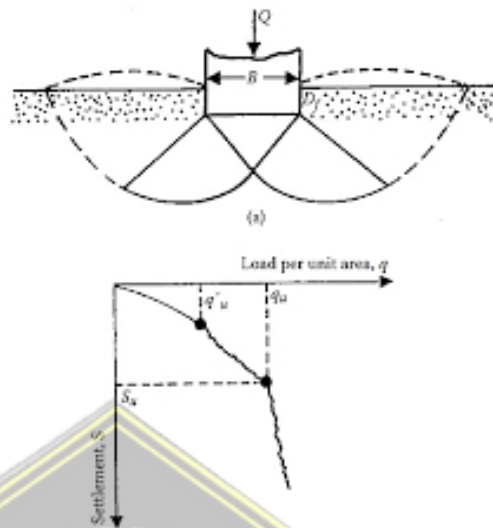
Sumber : cerdas ulet kreatif (2024)

2. Keruntuhan geser setempat (*Local Shear Failure*)

Tipe keruntuhan geser ini nyaris serupa keruntuhan geser umum, tetapi bentuk bidang reruntuhan tak mampu menggapai lapisan atas tanah. Atas dasar tersebut, bidang reruntuhan yang kontinu tak mengalami perkembangan. Tenggelamnya pondasi disebabkan pertambahan beban di kedalaman yang cenderung dalam, di mana kemudian memicu mampatnya tanah di sekitarnya. Namun, kemampatan tanah tak sampai memicu posisi kritis keruntuhan tanahnya, dan seperti pada keruntuhan geser umum, maka perkembangan zona plastis tak terjadi. Pada model keruntuhan geser lokal, di sekeliling pondasi terdapat pengembangan tanah yang minim tetapi tidak ada pondasi terguling. Ciri-ciri keruntuhan geser setempat yakni:

- a) Lebih masifnya dorongan ke bawah pada dasar pondasi hingga tidak menyebabkan pengembangan di permukaan tanah sekitar pondasi
- b) Hanya beberapa bagian tanah yang mengalami keadaan kesetimbangan plastis
- c) Kejadian pondasi yang menjadi miring tidak terlampaui masif
- d) Terjadi pada tanah dengan kompresibilitas tinggi yang ditunjukkan dengan penurunan yang relatif besar

- e) Kapasitas dukung batas (q_u) hanya dapat diobservasi penurunannya, namun susah dianalisis maupun dipastikan



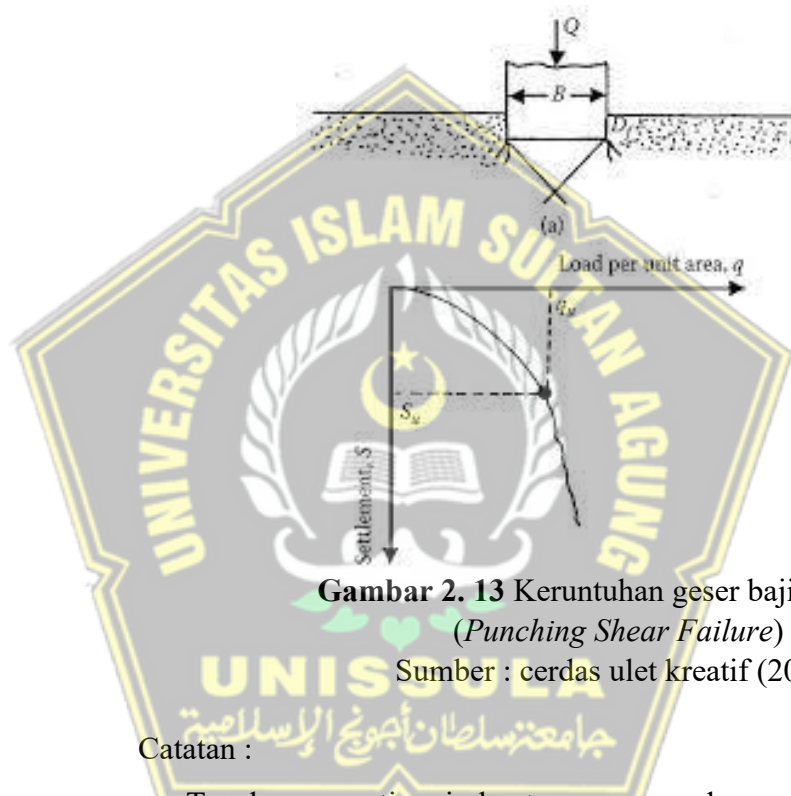
Gambar 2. 12 Keruntuhan geser setempat (Local Shear Failure)

(Sumber : cerdas ulet kreatif (2024))

3. Keruntuhan geser baji/penetrasi (Punching Shear Failure)

Pada model keruntuhan berikut, bisa disebut bahwa tidak terjadi keruntuhan geser tanah. Adapun dampaknya ialah pemampatan tanah pada sekitar pondasi yang dipicu penekanan serta tembusnya pondasi ke tanah dan menyamping sebagai dampak adanya beban. Bertambahnya beban dapat secara linear mengindikasikan pertambahan penurunan pondasi. Kemudian, tanah yang mampat dipicu masuknya pondasi yang mengembang dan hanya berlangsung di area terbatas tepatnya pada kisaran tepian maupun dasar pondasi. Kejadian penurunan tidak cukup memicu pergerakan lateral yang arahnya posisi kritis pada keruntuhan tanah, hingga tidak berkembangnya kuat geser ultimit tanah. Tembusnya pondasi ke tanah hingga bawah ataupun baji tanah dapat memicu pembentukan pada bawah landasan pondasi sehingga cukup memicu penyisihan tanah. Saat keruntuhan, bidang runtuh tak terlihat sama sekali. Ciri-ciri keruntuhan geser penetrasi yaitu:

- a) Pada bagian bawah pondasi muncul desakan yang diiringi gerakan bergeser sepanjang tepian dan arahnya vertikal
- b) Pada permukaan tanah tak terjadi pengangkatan maupun kemiringan pondasi
- c) Cukup besarnya proses penurunan
- d) Rawan melanda tanah yang tinggi kompresibilitasnya, tapi apabila pondasinya agak dalam maka tanah berkompresibilitas rendah juga bisa dilanda.



Gambar 2. 13 Keruntuhan geser baji/penetrasi
(*Punching Shear Failure*)

Sumber : cerdas ulet kreatif (2024)

Catatan :

- a. Tanah yang tinggi kuat gesernya dan sukar mampat umumnya akan mengalami keruntuhan geser.
- b. Tanah mudah mampat bisa mengalami keruntuhan geser penetrasi, seperti lempung lunak, pasir tak padat, maupun pasir mudah mampat, serta apabila lebar pondasi D_f lebih kecil daripada kedalaman pondasinya.

Persyaratan-persyaratan yang harus dipenuhi dalam perancangan fondasi adalah:

- a. Faktor aman atas adanya keruntuhan disebabkan kapasitas dukung tanah yang telah melampaui syarat target. Adapun faktor aman 3 dipergunakan pada hitungan kapasitas dukung.
- b. Penurunan pondasi mestinya tetap berada pada batasan nilai toleransi. Namun, struktur rusak tidak boleh terjadi sebab adanya penurunan tak seragam (*differential settlement*).

A. Kapasitas Daya Dukung Menurut Terzaghi

Terzaghi (1943) menjelaskan situasi *general shear failure* menjadi landasan menganalisis kapasitas dukungnya. Berikut ialah sejumlah anggapan tersebut:

- a. Pondasi menajang tak hingga
- b. Pengabaian terhadap tahanan geser melalui bidang horizontal bawah pondasi
- c. Beban menggantikan tahanan geser, dengan nilai $P_0 = \gamma \cdot D_f$, D_f merupakan tingkat dalamnya landasan pondasi, sedangkan γ ialah bobot volume tanah diatas landasan pondasinya
- d. Dasar pondasi kasar
- e. Pendistribusian tegangan bawah pondasi dibagi jadi tiga bagian
- f. Lengkung spiral linier serta logaritmis menjadi susunan atas bidang keruntuhan
- g. Tanah ialah material yang daya gerakan gesernya berlandaskan hukum Coulomb, sifatnya isotropis serta homogen.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana :

τ = tegangan tegangan geser

c = kohesi tanah

σ = tegangan normal

ϕ = sudut geser dalam tanah

- h. Permasalahan diselesaikan seperti analisis dua dimensi bagi pondasi menerus
- i. Berlaku prinsip superpose

Berdasarkan bentuk geometri pondasi, terdapat sejumlah rumus yang dapat diterapkan menurut Terzaghi (1943). Berikut ialah rincian perumusannya:

A. Bagi *general shear failure* atau keruntuhan tanah yang geser umum

1. Diketahui lebar B pada pondasi menerus maka kapasitas daya dukungnya:

$$q_u = c N_c + \gamma D_f N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \dots\dots\dots(2.12)$$

2. Diketahui jari-jari R pada pondasi lingkaran maka kapasitas daya dukungnya:

$$q_u = 1,3 c N_c + \gamma D_f N_q + 0,6 \gamma R N_\gamma \dots\dots\dots(2.13)$$

3. Diketahui sisi B pada pondasi bujur sangkar maka kapasitas daya dukungnya:

$$q_u = 1,3 c N_c + \gamma D_f N_q + 0,4 \gamma B N_\gamma \dots\dots\dots(2.14)$$

4. Diketahui B x L pada pondasi segi empat sehingga kapasitas daya dukungnya:

$$q_u = c N_c (1 + 0,3 B/L) + \gamma D_f N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma (1 - 0,2 B/L) \dots\dots\dots(2.15)$$

Di mana:

q_u = daya dukung maksimum maksimum

c = kohesi tanah

γ = berat isi tanah

B = lebar pondasi pondasi (R = diameter pondasi lingkaran)

L = panjang panjang pondasi pondasi

D_f = kedalaman kedalaman pondasi

Adapun besaran N_c ; N_q ; N_γ sebagai faktor daya dukung bisa diketahui melalui perumusan di bawah ini:

$$N_c = \cot \phi \left[\frac{e^{2(3\pi/4 - \phi/2)\tan\phi}}{2\cos^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)} - 1 \right] = \cot\phi(N_q - 1)$$

$$N_q = \frac{e^{2(3\pi/4 - \phi/2)\tan\phi}}{2\cos^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)}$$

$$N_\gamma = \frac{1}{2} \left(\frac{K_{py}}{\cos 2\phi} - 1 \right) \tan \phi$$

K_{py} = koefisien tekanan tanah pasif

B. Bagi *local shear failure* atau keruntuhan tanah yang geser setempat

Perincian rumusnya terjadi perubahan di mana $\phi' = \tan^{-1} (2/3 \tan \phi)$ menjadi parameter ϕ dan $c' = 2/3 c$ sebagai parameter c . Pada kondisi keruntuhan lokal, melalui kedua parameter tersebut maka diperoleh N'_c ; N'_q ; N'_γ sebagai lambang seluruh faktor daya dukungnya:

1. Diketahui lebar B pada pondasi menerus sehingga kapasitas daya dukungnya:

$$q'_u = c' N'_c + \gamma D_f N'_q + \frac{1}{2} \gamma B N'_\gamma \dots\dots\dots(2.16)$$

2. Diketahui jari-jari R pada pondasi lingkaran sehingga kapasitas daya dukungnya:

$$q'_u = 1,3 c' N'_c + \gamma D_f N'_q + 0,6 \gamma R N'_\gamma \dots\dots\dots(2.17)$$

3. Diketahui sisi B pada pondasi bujur sangkar sehingga kapasitas daya dukungnya:

$$q'_u = 1,3 c' N'_c + \gamma D_f N'_q + 0,4 \gamma B N'_\gamma \dots\dots\dots(2.18)$$

4. Diketahui $B \times L$ pada pondasi segi empat sehingga kapasitas daya dukungnya:

$$q'_u = c' N'_c (1 + 0,3 B/L) + \gamma D_f N'_q + \frac{1}{2} \gamma B N'_\gamma (1 - 0,2 B/L) \dots\dots\dots(2.19)$$

Tabel 2. 8 Faktor Daya Dukung Terzaghi untuk Kondisi Keruntuhan Geser Umum (*general shear failure*)

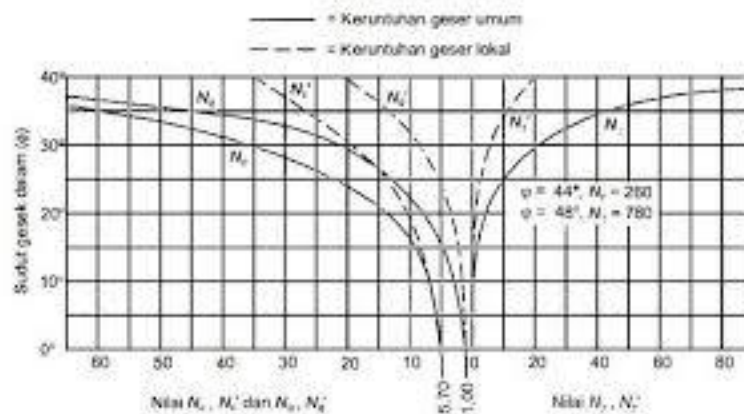
ϕ	Nc	Nq	N γ	ϕ	Nc	Nq	N γ
0	5,70	1,00	0,00	26	27,09	14,21	9,84
1	6,00	1,10	0,01	27	29,24	15,90	11,60
2	6,30	1,22	0,04	28	31,61	17,81	13,70
3	6,62	1,35	0,06	29	34,24	19,98	16,18
4	6,97	1,49	0,10	30	37,16	22,46	19,13
5	7,34	1,64	0,14	31	40,41	25,28	22,65
6	7,73	1,81	0,20	32	44,04	28,52	26,87
7	8,15	2,00	0,27	33	48,09	32,23	31,94
8	8,60	2,21	0,35	34	52,64	36,50	38,04
9	9,09	2,44	0,44	35	57,75	41,44	45,41
10	9,61	2,69	0,56	36	63,53	47,16	54,36
11	10,16	2,98	0,69	37	70,01	53,80	65,27
12	10,76	3,29	0,85	38	77,50	61,55	78,61
13	11,41	3,63	1,04	39	85,97	70,61	95,03
14	12,11	4,02	1,26	40	95,66	81,27	115,31
15	12,86	4,45	1,52	41	106,81	93,85	140,51
16	13,68	4,92	1,82	42	119,67	108,75	171,99
17	14,60	5,45	2,18	43	134,58	126,50	211,56
18	15,12	6,04	2,59	44	151,95	147,74	261,60
19	16,56	6,70	3,07	45	172,28	173,28	325,34
20	17,69	7,44	3,64	46	196,22	204,19	407,11
21	18,92	8,26	4,31	47	224,55	241,80	512,84
22	20,27	9,19	5,09	48	258,28	287,85	650,67
23	21,75	10,23	6,00	49	298,71	344,63	831,99
24	23,36	11,40	7,08	50	347,50	415,14	1072,8
25	25,13	12,72	8,34				

Sumber : Kumbhojkar, (1993)

Tabel 2. 9 Faktor-faktor daya dukung Terzaghi Faktor faktor daya dukung Terzaghi modifikasi untuk kondisi keruntuhan kondisi keruntuhan geser setempat (*locall shear failure failure*)

ϕ	Nc	Nq	N γ	ϕ	Nc	Nq	N γ
0	5,70	1,00	0,00	26	27,09	14,21	9,84
1	5,90	1,07	0,005	27	29,24	15,90	11,60
2	6,10	1,14	0,02	28	31,61	17,81	13,70
3	6,30	1,20	0,04	29	34,24	19,98	16,18
4	6,51	1,30	0,055	30	37,16	22,46	19,13
5	6,74	1,39	0,074	31	40,41	25,28	22,65
6	6,97	1,49	0,10	32	44,04	28,52	26,87
7	7,22	1,59	0,128	33	48,09	32,23	31,94
8	7,47	1,70	0,16	34	52,64	36,50	38,04
9	7,74	1,82	0,20	35	57,75	41,44	45,41
10	8,02	1,94	0,24	36	63,53	47,16	54,36
11	8,32	2,08	0,30	37	70,01	53,80	65,27
12	8,63	2,22	0,35	38	77,50	61,55	78,61
13	8,96	2,38	0,42	39	85,97	70,61	95,03
14	9,31	2,55	0,48	40	95,66	81,27	115,31
15	9,67	2,73	0,57	41	106,81	93,85	140,51
16	10,06	2,92	0,67	42	119,67	108,75	171,99
17	10,47	3,13	0,76	43	134,58	126,50	211,56
18	10,9,0	3,36	0,88	44	151,95	147,74	261,60
19	11,36	3,61	1,03	45	172,28	173,28	325,34
20	11,85	3,88	1,12	46	196,22	204,19	407,11
21	12,37	4,17	1,35	47	224,55	241,80	512,84
22	12,92	4,48	1,55	48	258,28	287,85	650,67
23	13,51	4,82	1,74	49	298,71	344,63	831,99
24	14,14	5,20	1,97	50	347,50	415,14	1072,8
25	14,80	5,60	2,25				

Sumber : Kumbhojkar, (1993)



Gambar 2. 14 Hubungan antara ϕ dengan nilai-nilai N_c, N_q, N_y

(Sumber : Terzaghi, 1943)

Nilai tahanan gesek bersatuan f_s tergantung dari tanah sekeliling serta material pondasinya. Selain itu, juga termasuk jumlah atas adhesi maupun pergesekan tiap satuan luas antar tanah dengan dinding pondasinya. Berikut merupakan rincian nilai f_s beragam tanah sesuai saran Terzaghi (1943):

Tabel 2. 10 Tahanan gesek dinding, f_s

Jenis tanah	Tahanan gesek satuan (f_s)	
	Kg/cm ²	kN/m ²
Lanau dan lempung lunak	0,07 - 0,30	7 - 29
Lempung sangat kaku	0,49 - 1,95	48 - 191
Pasir tak padat	0,12 - 0,37	12 - 36
Pasir padat	0,34 - 0,68	33 - 67
Kerikil padat	0,49-0,96	48 - 94

(Sumber : Terzaghi, 1943)

2.13 Penurunan

Penurunan (*settlement*) adalah term yang dipergunakan dalam menunjukkan Gerakan titik tertentu pada bangunan terhadap titik referensi yang tetap (Hardiyatmo, 2002). Penurunan pada tanah berbutir halus dapat dibagi menjadi 3 komponen yakni *immediate settlement* atau penurunan

segera, penurunan konsolidasi sekunder, serta primer. Persamaannya dinyatakan sebagai berikut:

$$S = S_c + S_s + S_i \dots\dots\dots(2.20)$$

Dengan :

S = Penurunan total

S_c = Penurunan konsolidasi primer

S_s = Penurunan konsolidasi sekunder

S_i = Penurunan segera

A. Analisis penurunan dengan menggunakan metode penyebaran 2V : 1H

1. Dasar teori distribusi tegangan di bawah tanah

Ketika suatu beban bekerja dipermukaan tanah (beban pondasi), beban tersebut akan menyebar ke bawah tanah dan menyebabkan peningkatan tegangan pada berbagai kedalaman. Distribusi tegangan ini tidak seragam atau semakin jauh dari pusat beban tegangan yang terjadi pada tanah akan semakin kecil.

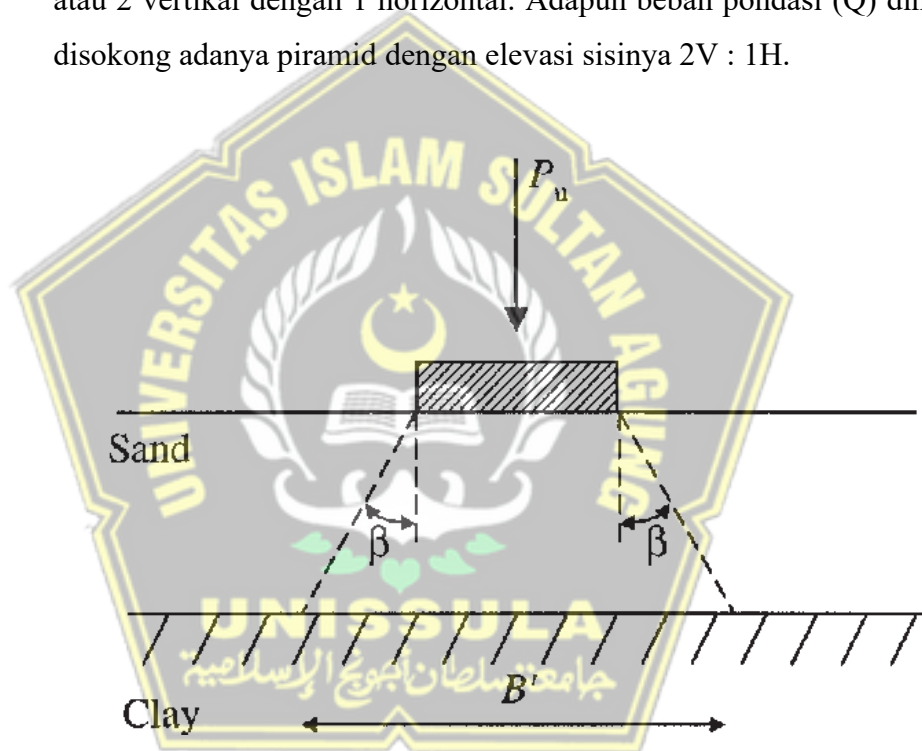
Secara teoritis, (Boussinesq 1885) mengembangkan rumus distribusi tegangan untuk beban titik pada permukaan elastis homogen isotropis. Persamaan Boussinesq menunjukkan bahwa tegangan vertikal menurun secara nonlinier terhadap jarak dan kedalaman. Namun, karena rumus Boussinesq relatif kompleks untuk digunakan dalam perhitungan praktis, maka dikembangkan metode pendekatan sederhana, salah satunya metode penyebaran beban 2V:1H.

2. Prinsip metode 2V:1H

Metode penyebaran 2V:1H, Kadang disebut metode 2 banding 1, yang merupakan pendekatan empiris dan geometris untuk menggambarkan penyebaran tegangan dibawah pondasi. Beban dari pondasi dianggap tersebar kebawah melalui bidang imajiner berbentuk piramida atau prisma. Sudut penyebaran diambil berdasarkan perbandingan 2 vertikal : 1 horizontal. Artinya setiap kedalaman vertikal 2 satuan, Tegangan dianggap menyebar 1 satuan kesamping dari pondasi.

3. Penelitian berikut menerapkan sejumlah asumsi yaitu tanah dianggap homogen, tegangan menyebar secara linear dan merata sepanjang bidang penyebaran, tidak ada interaksi lateral antar zona tegangan, penyebaran tegangan hanya dipengaruhi oleh kedalaman dan lebar pondasi.

Metode berikut menjadi satu di antara langkah sangat sederhana dalam pendekatan guna mengetahui persebaran tegangan sebagai dampak pemberian beban menurut Boussineq. Mekanismenya yaitu melalui pembuatan garis penyebaran dengan perbandingan 2V : 1H atau 2 vertikal dengan 1 horizontal. Adapun beban pondasi (Q) dinilai disokong adanya piramid dengan elevasi sisinya 2V : 1H.



Gambar 2. 15 penyebaran beban vertikal pondasi lajur pada tanah berlapis.

(Sumber : Burd & Frydman, 1997)

Pada pondasi empat persegi Panjang :

$$\Delta\sigma_z = \frac{q}{(L+z)(B+z)}$$

Atau

$$\Delta\sigma_z = \frac{qLB}{(L+z)(B+z)}$$

Dengan :

- A : tambahan tegangan vertikal pada kedalaman z
 : beban total (kN)
 : beban terbagi rata (kN/m²)
 : Panjang luasan beban (m)
 B : lebar luasan beban (m), Z : kedalaman (m)

2.14 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu atau sebelumnya dengan topik yang sama di bahas dibawah ini untuk memberikan informasi mengenai penelitian serupa. Antara lain (Petry and Little 2003), (Waves 1975), (Chen 1975), (Das 1995), (Bowles 1981), (Widoanindyawati et al. 2021), atau lebih tepatnya bisa ditinjau dari Tabel 2.11.

Tabel 2. 11 Penelitian terdahulu

No.	Nama Peneliti	Jurnal/Tahun	Ringkasan Isi
1	Chen, F.H.	Foundations on Expansive Soils (1988)	membahas bagaimana pondasi dangkal dapat mengalami masalah serius pada tanah ekspansif karena siklus pengembangan dan penyusutan tanah.
2	Nelson, J. D., & Miller, D. J.	Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and	membahas karakteristik tanah ekspansif yang menyebabkan pergerakan tanah vertikal dan horizontal, serta strategi desain

		Pavement Engineering (1992)	pondasi dangkal yang dapat digunakan untuk memitigasi dampaknya.
3	Katti, R. K.	Behavior of Expansive Soils and Design of Shallow Foundations (1979)	meneliti bagaimana tanah ekspansif di berbagai daerah tropis dan subtropis menyebabkan deformasi pada struktur pondasi
4	Jones, D.E., & Holtz, W.G.	Expansive Soils – The Hidden Disaster (1973)	Penelitian ini menjelaskan bagaimana tanah ekspansif dapat menyebabkan masalah struktural besar, dan menyarankan teknik monitoring serta perbaikan tanah untuk mengurangi kerusakan.
5	Petry, T.M., & Little, D.N.	Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures – History, Practice, and Future (2002)	Penelitian ini mengkaji stabilisasi tanah lempung dan tanah ekspansif dalam aplikasi infrastruktur ringan seperti jalan dan bangunan rendah. Fokus utama adalah pada metode stabilisasi tanah, seperti penggunaan kapur, semen, dan bahan kimia lainnya untuk mengurangi ekspansi dan penyusutan tanah
6	Vemi Widoanindyawati, Bambang Widodo, Teguh MulyoWicaksono	Studi Distribusi Beban Merata Lajur pada Tanah Lunak Jenuh (2021)	Distribusi beban dipengaruhi lebar lajur, karakteristik tanah, dan tingkat kejenuhan.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Bahan Penelitian

Bahan penelitian (sempel tanah) diambil dari lingkungan Universitas Bojonegoro. Pengambilan dilakukan dengan cara di bor untuk pengujian sifat fisik, sedangkan untuk pengujian distribusi tegangan dengan permodelan dalam Box pengambilan sampel dengan cara dicangkul, lalu dimasukkan ke dalam box.



Gambar 3.1 Sampel Permodelan dalam Box
(Sumber : Peneliti, 2025)

3.2 Alat dan Langkah Pengujian

3.2.1 Kadar air

Alat dan langkah pengujian kadar air tanah berstandar SNI 1964 : 2008 sebagai berikut :

1. Alat pengujian Kadar Air :
 - A. Oven
 - B. Cawan
 - C. Desikator
 - D. Sarung tangan
 - E. Timbangan
2. Langkah pengujian Kadar Air :
 - A. Timbang dan catat cawan kering kosong yang berisi benda uji (termasuk tutupnya jika digunakan).

- B. Siapkan contoh tanah untuk pengujian.
- C. Tempatkan benda uji ke dalam cangkir dan kencangkan tutupnya, jika digunakan. Tentukan berat cawan yang berisi bahan basah, dengan timbangan pilihan Anda yang menjadi patokan berat benda uji.
- D. Waktu yang diperlukan guna mencapai berat benda uji yang konstan bergantung jenis kapasitas tungku, ukuran benda uji, jenis bahan, serta unsur lain. Dampak adanya seluruh unsur ini biasanya bisa diantisipasi melalui mempraktikkan keandalan secara optimal maupun menggunakan bahan dan peralatan yang telah teruji.
- E. Cawan dikeluarkan dari oven Setelah benda uji mengering sampai mencapai berat konstan. Dinginkan sampel uji beserta cawan hingga suhu kamar, Gunakan timbangan yang sama untuk menimbang mangkuk dan bahan kering oven. Dan tuliskan nilai ini. Tutup penutupnya jika benda uji menyerap uap air dari udara sebelum mengukur berat keringnya.

3.2.2 Berat Jenis

Alat yang digunakan untuk pengujian Batas Cair/ Liquid Limit (LL) sesuai dengan SNI 1966 : 2008 sebagai berikut :

1. Alat pengujian Berat Jenis :
 - A. Casagrande
 - B. Grooving tools
 - C. Cawan
 - D. Oven
 - E. Kaca datar
 - F. Timbangan
2. Langkah pengujian Berat Jenis :
 - A. Benda uji disiapkan sesuai kebutuhan kemudian dioven dengan temperatur 60°C hingga bisa dijadikan gembur ataupun melalui pengeringan matahari.

- B. Selanjutnya, sebelum disaring, desikator melakukan pendinginan pada tanah. Lalu, saringan No. 40 disiapkan untuk menyaring tanah. Jika terjadi gumpalan, maka tanah terlebih dahulu ditumbuk.
- C. Picnometer dicuci menggunakan air suling serta dikeringkan.
- D. Pada kondisi kosong dan bersih, timbang picnometer.
- E. Ambil sampel tanah.
- F. Isi picnometer dengan sampel tanah kemudian air suling ditambahkan hingga mencapai tanda pembatas.
- G. Keluarkan semua gelembung udara yang terjebak pada butiran tanah memakai pompa vakum.
- H. Kemudian, bagian luar picnometer dikeringkan, ditimbang untuk dicatat perolehannya pada suhu khusus.

3.2.3 Analisis Ukuran Butiran

Alat dan langkah pengujian analisis ukuran butiran (Sieve analisis – Hidrometer analisis) sesuai dengan SNI 3423 : 2008 sebagai berikut :

1. Alat pengujian *Sieve Analisis* :
 - A. Saringan
 - B. Sieve Shaker
 - C. Timbangan
 - D. Wadah sampel
 - E. Oven
2. Langkah pengujian *Sieve Analisis* :
 - A. Keringkan sampel di dalam oven hingga beratnya konstan.
 - B. Timbang sampel material kering (misalnya, 500 gram atau sesuai kebutuhan).
 - C. Susun ayakan mulai dari ukuran lubang terbesar di atas hingga terkecil di bawah.
 - D. Letakkan pan (wadah penampung) di bagian paling bawah.
 - E. Masukkan sampel kering ke dalam ayakan teratas.
 - F. Pasang set ayakan ke dalam shaker mekanis.

- G. Guncang selama 10–15 menit (atau sesuai standar spesifikasi proyek).
 - H. Setelah pengayakan selesai, timbang material yang tertahan di masing-masing ayakan, termasuk yang ada di pan.
 - I. Catat hasilnya untuk setiap ayakan.
3. Alat pengujian *Hidrometer Analisis* :
- A. Hidrometer
 - B. Gelas ukur
 - C. Mixer
 - D. Larutan pendispersi
 - E. Stopwatch
 - F. Pengaduk
4. Langkah pengujian *Hidrometer Analisis* :
- A. Mengambil sampel tanah yang lolos ayakan No. 200 sebanyak $\pm$ 50 gram.
 - B. Menambah aquades pada sampel tanah dan mengaduknya sehingga berbentuk pasta.
 - C. Menambahkan larutan pendispersi agar campuran tanah tidak menggumpal diaduk hingga rata.
 - D. Memindahkan campuran tanah dan larutan pendispersi kedalam gelas yang nantinya akan diaduk menggunakan mixer selama $\pm$ 15 menit.
 - E. Memindahkan campuran yang sudah diaduk dengan mixer kedalam gelas ukur lalu menambahkan aquades hingga 1000 cc.
 - F. Menutup gelas ukur dengan telapak tangan dan mengocok campuran dengan membolak-balikkan sebanyak kurang lebih 60 kali,
 - G. Meletakkan gelas ukur diatas meja lalu memasukkan hidrometer secara hati-hati,
 - H. Mengukur pembacaan hidrometer pada 15 detik, 30 detik, 1 menit, 2 menit, 5 menit, 15 menit, 30 menit, 60 menit, 250 menit dan 24 jam.

3.2.4 Batas Cair/ *Liquid Limit* (LL)

Alat dan langkah pengujian Batas Cair/ *Liquid Limit* (LL) sesuai dengan SNI 1966 : 2008 sebagai berikut :

1. Alat pengujian Batas Cair :
 - A. Casagrande
 - B. Groving tools
 - C. Cawan
 - D. Oven
 - E. Timbangan
 - F. Spatula
2. Langkah pengujian Batas Cair :
 - A. Pengujian diawali dengan memeriksa peralatan apabila terdapat kerusakan, goresan atau kotoran agar peralatan dapat bekerja dengan baik.
 - B. Mengatur tinggi jatuh dari alat cassagrade setinggi (plus/minus 1) / 2 Inch.
 - C. Mengambil 5 kontainer lalu dibersihkan dan diberikan nomor untuk masing-masing container.
 - D. Menimbang berat 5 kontainer tersebut.
 - E. Mengambil sampel tanah dengan aquades diatas pelat kaca.
 - F. Mengaduk sampel tanah dan aquades hingga konsistensinya merata sebanyak plus/minus 40 ketuk.
 - G. Menaruh sampel tanah yang sudah tercampur kedalam mangkuk pada alat cassagrade dan meratakannya menggunakan spatula hingga ketebalan maksimum 1/2 inch.
 - H. Menggoreskan Groving tool pada contoh tanah secara tegak lurrus dari titik persekutuannya.
 - I. Menjalankan alat cassagrade dengan kecepatan 2 ketukan per detik hingga alur tanah tertutup sepanjang 1/2 inch.
 - J. Mengulangi langkah 7 sampai langkah 9 hingga didapatkan jumlah ketukan yang diinginkan,

- K. Mengambil sampel tanah dari mangkuk cassagrade ke dalam kontainer sebanyak plus/minus 50 gram untuk mengetahui nilai kadar airnya,
- L. Mengembalikan tanah keatas pelat kaca dan menambahkan aquades sedikit demi sedikit pada tanah lalu diaduk untuk mendapatkan konsistensi dengan 5 ketukan lebih rendah,
- I. Mengulangi langkah 7 sampai langkah 12 hingga mendapatkan lima sampel dengan ketukan dan kadar air yang berbeda.

3.2.5 Batas Plastis/ *Plastic Limit* (PL)

Alat dan langkah pengujian Batas Plastis/ *Plastic Limit* (PL) sesuai dengan SNI 1966 : 2008 sebagai berikut :

1. Alat pengujian Batas Plastis :
 - A. Kaca datar
 - B. Oven
 - C. Cawan
 - D. Timbangan
 - E. Spatula
 - F. Kain lap
2. Langkah pengujian Batas Plastis :
 - A. Mengambil sampel tanah sebanyak 20 gram, lalu meletakkan sampel tanah kedalam cawan untuk dicampur dengan air hingga sampel menjadi plastis dan dapat dibentuk.
 - B. Sampel tanah diletakkan diatas plat kaca lalu digeleng menggunakan jari atau telapak tangan dengan tekanan yang cukup sehingga menjadi beberapa gelengan kecil dengan diameter 3 mm.
 - C. Kumpulkan dan masukkan hasil gelengan kedalam cawan hingga berat tanah minimal 30 gram lalu ditutup.
 - D. Sampel yang sudah dibentuk dimasukkan kedalam oven beserta tutupnya selama 24 jam.
 - E. Sampel yang sudah dioven diinginkan didalam desikator lalu ditimbang beratnya.

3.2.6 Batas Susut/ *Shrinkage Limit* (SL)

Alat dan langkah pengujian Batas Susut/ *Shrinkage Limit* (SL) sesuai dengan SNI 3422 : 2008 sebagai berikut :

1. Alat pengujian Batas Susut :
 - A. Shrinkage Dish (Cawan susut)
 - B. Oven
 - C. Timbangan
 - D. Kaca datar
 - E. Spatula
 - F. Jangka sorong
 - G. Air raksa
2. Langkah pengujian Batas Susut :
 - A. Ambil tanah yang telah lolos saringan No. 40.
 - B. Tambahkan air pada tanah sampai mencapai konsistensi seperti pasta.
 - C. Isi cawan batas susut dengan tanah pasta tersebut hingga penuh tanpa meninggalkan rongga udara.
 - D. Ratakan permukaan tanah menggunakan pisau atau spatula.
 - E. Biarkan tanah mengering secara perlahan di udara terbuka.
 - F. Setelah kering, masukkan ke dalam oven dengan suhu sekitar 105°C–110°C hingga beratnya konstan (pengeringan total).
 - G. Timbang sampel tanah kering menggunakan timbangan yang akurat.
 - H. Tentukan volume tanah kering menggunakan metode displacement (menggunakan air raksa) atau dengan pengukuran dimensi geometris jika bentuk tanah memungkinkan.

3.2.7 *Free Swelling*

Alat dan langkah pengujian *Free Swelling* / pengembangan bebas sebagai berikut :

1. Alat pengujian *Free Swelling* :
 - A. Gelas Ukur (100 ml)
 - B. Timbangan

- C. Ayakan (No.200)
 - D. Cawan
 - E. Sendok
2. Langkah pengujian *Free Swelling* :
- A. Siakan tanah yang telah dikeringkan dan disaring (ukuran 200)
 - B. Ambil tanah yang telah disaring (10 gram) menggunakan timbangan digital.
 - C. Masukkan tanah kering tersebut ke dalam tabung pengukur atau cawan gelas.
 - D. Tambahkan air destilasi secara perlahan ke dalam tabung pengukur hingga tanah sepenuhnya terendam.
 - E. Biarkan tanah terendam selama 24 jam pada suhu ruangan tanpa gangguan.
 - F. Setelah 24 jam, amati dan catat perubahan volume tanah di dalam tabung pengukur atau cawan gelas.

3.2.8 Pengujian *Proctor Standart*

Alat dan langkah pengujian *Standart Compaction (Proctor Standart)* sesuai dengan SNI 1972 : 2008 sebagai berikut :

1. Alat pengujian *Proctor Standart* :
- A. Mould Proctor
 - B. Alat penumbuk
 - C. Timbangan
 - D. Oven
 - E. Cawan
 - F. Spatula
 - G. Loyang
2. Langkah pengujian *Proctor Standart* :
- A. Cetakan dibersihkan kemudian ditimbang beratnya dengan keping alas dengan ketelitian 1 gram (B1) serta ukur diameter dalam dan tingginya dengan ketelitian 0,1 mm.
 - B. Memasang leher sambung pada cetakan dan keping alas, kemudian dikunci dan menempatkan pada landasan dari beton

yang beratnya minimal 100 kg, diposisikan di dasar dengan stabilitas baik.

- C. Ambil contoh uji untuk diberi proses pemadatan, tuang serta diaduk rata di dalam loyang.
- D. Contoh uji dipadatkan pada cetakan berleher sambung dengan jumlah lapisannya lima (untuk kepadatan berat) serta ketebalannya seragam. Pada lapisan satu, contoh uji mengisi cetakan dengan porsi sedikit melebihi seperlima ketebalan padat total, menyebarkan atau diratakan, beri sedikit penekanan menggunakan alat penumbuk ataupun media lainnya dengan bentuk sejenis supaya pemerataannya makin halus.
- E. Kemudian, lanjutkan proses pemadatan semua sisi permukaan contoh uji memakai alat penumbuk berbobot 4,54 kg. Jatuhkan alat tersebut hingga 25 kali di atas permukaan contoh uji dengan tingkat ketinggian 457 mm secara bebas. Pada lapis-lapis berikutnya, lakukan langkah yang sama.
- F. Apabila pemadatan sudah selesai, leher sambung dapat dilepas. Lalu, dengan pisau perata, ratakan permukaan padatan contoh uji dan potong jika ada kelebihan supaya hasilnya presisi setara permukaan cetakannya.
- G. Pada ketelitiannya 1 gram (B2), timbang massa cetakan dengan isi benda uji termasuk keping alasnya.
- H. Buka keping alas lalu keluarkan benda uji dari cetakannya memakai extruder atau alat pengeluar benda uji. Belah benda uji jadi dua bagian serupa dan vertikal. Ambil sebagian benda uji sebagai representatif satu di antara bagiannya guna melalui uji kadar air.
- I. Ulang seluruh langkah di atas sampai diperoleh lima data pengujian dengan kadar air yang berbeda beda.

3.2.9 California Bearing Ratio (CBR)

Alat dan langkah pengujian *California Bearing Ratio* (CBR) sesuai (SNI 1744 2012) sebagai berikut :

1. Alat pengujian *California Bearing Ratio* (CBR)
 - A. Mould CBR
 - B. Alat penumbuk
 - C. Mesin uji tekan CBR
 - D. Tanki perendaman
 - E. Timbangan
 - F. Spatula
 - G. Loyang
 - H. Cawan
2. Langkah pengujian *California Bearing Ratio* (CBR)
 - A. Pasang, amankan, dan ukur CBR variabel di pangkalan. Tempatkan pemisah di cetakan kemudian letakkan kertas saring kasar di lapisan atas pemisahannya. Tempatkan leher penghubung di permukaan cetakan lalu tempelkan di inti pelat dasar.
 - B. Setiap spesimen dikompres pada cetakan CBR menerapkan 10, 30 atau 65 tumbuk per lapisan.
 - C. Buka leher sambungan, potong sisa benda uji dengan pisau pengupas, dan gunakan alat gerinda untuk menghaluskan permukaan hingga rata dengan permukaan cetakan. Permukaan yang kasar atau cekung sebaiknya diisi dengan bahan tipis, lalu dijadikan padat serta dihaluskan.
 - D. Lepaskan kertas saring beserta pelat pemisah dari rangkanya, balikkan, letakkan kembali sampel pada alasnya dan ukur beratnya.
 - E. Ganti chip yang diuji. Tempatkan contoh tanah beserta cetakannya pada pressure plate penetrator CBR. Sesuaikan pendorong penetrasi hingga menyentuh permukaan uji, kemudian atur indikator cakram penetrasi dan sakelar beban ke nol.
 - F. Berikan beban konstan sehingga laju penetrasi seragam pada 1,27 mm/menit. Catat beban apabila penetrasi menunjukkan 0,32

mm, 0,64 mm, 1,27 mm, 1,91 mm, 2.54 mm, 3,81 mm, 5,08 mm, 7,62 mm, 10,16 mm, 12,70 mm.

G. Keluarkan benda uji dari cetakan dan tentukan banyaknya air.

3.2.10 Triaksial UU

Alat dan langkah pengujian Triaksial UU sesuai dengan (SNI 03-4813-1998 1998) Sebagai Berikut :

1. Alat pengujian Triaksial UU
 - A. Alat ukur tekanan sel
 - B. Alat ukur deformasi (arloji ukur atau alat ukur elektronik)
 - C. Timbangan
 - D. Oven
2. Langkah pengujian Triaksial UU
 - A. Ambil sampel tanah dari lapangan dan bentuk menjadi silinder dengan ring yang telah di sediakan
 - B. Bungkus sampel dengan selaput karet dan tempatkan dalam sel triaksial
 - C. Tempatkan sampel di antara dua pelat batu berpori.
 - D. Pasang membran karet di keliling sampel dan segel dengan O-ring untuk mencegah air masuk/keluar.
 - E. Pasang sel tekanan dan siapkan sistem untuk pemberian tekanan aksial.
 - F. Beri tekanan sel (cell pressure) ke seluruh permukaan sampel (menggunakan air dalam sel)
 - G. Tidak di perbolehkan ada drainase (tidak ada air yang masuk ataupun air keluar dari sampel)
 - H. Sampel tidak dikonsolidasi selama tekanan diberikan.
 - I. Berikan beban bertahap sampai terjadi keruntuhan (Failure)
 - J. Lakukan 3 pengujian sampel dengan tekanan sel yang berbeda (missal 50, 100, dan 150 kPa) untuk menentukan parameter kekuatan geser.
 - K. Dilakukan perhitungan hasil uji dengan di lengkapi grafik mohr coloum dari hasil 3 pengujian.

3.2.11 Konsolidasi Konvensional (*Oedometer*)

Alat dan langkah pengujian Konsolidasi Konvensional (*Oedometer*) sesuai dengan SNI 2812 : 2011 sebagai berikut :

1. Alat pengujian *Oedometer* :

- A. Alat *Oedometer* (loading frame dan ring)
- B. Pengukur Deformasi (Dial gauge atau LVDT)
- C. Timbangan
- D. Oven
- E. Sistem perendaman air

2. Langkah pengujian *Oedometer* :

- A. Ambil sampel tanah dari lapangan dan bentuk menjadi silinder menggunakan ring pemotong, lalu timbang sampel dan ukur dimensi awalnya (diameter, tinggi).
- B. Pasang sampel ke dalam ring *oedometer* dengan hati-hati untuk mencegah kerusakan.
- C. Tempatkan sampel tanah ke dalam alat *oedometer*, lalu pasang pelat beban di atas sampel.
- D. Isi ruang alat *oedometer* dengan air (jika pengujian dilakukan dalam kondisi terendam) untuk mensimulasikan kondisi tanah jenuh.
- E. Pastikan dial gauge atau LVDT terpasang dan dikalibrasi dengan posisi awal yang tepat.
- F. Terapkan beban secara bertahap sesuai dengan jadwal tekanan (misalnya 12,5; 25; 50; 100; 200 kPa, dan seterusnya).
- G. Catat perubahan deformasi (penurunan sampel) pada setiap langkah beban.
- H. Setiap tahap beban diterapkan sampai konsolidasi selesai, yang ditentukan dari grafik deformasi versus waktu (teori konsolidasi Terzaghi).
- I. Setelah beban maksimum tercapai, lepaskan beban secara bertahap untuk mengukur sifat ekspansi atau rebound tanah.
- J. Catat deformasi saat setiap beban dilepas.

K. Setelah pengujian selesai, keluarkan sampel dari alat.

3.2.12 Distriusi Tegangan Permodelan Box

Alat dan langkah pengujian distribusi tegangan pemodelan box modifikasi sebagai berikut :

1. Alat pengujian distribusi tegangan pemodelan box :
 - A. Box Uji
 - B. Beban
 - C. Dial / Arloji
 - D. Permodelan pondasi dangkal
2. Langkah pengujian distribusi tegangan pemodelan box :
 - A. Bersihkan Box uji modifikasi yang telah disediakan oleh laboratorium.
 - B. Siapkan sampel (Tanah Unigoro) yang telah diambil.
 - C. Masukkan sampel ke dalam bok uji secara bertahap sampai terisi $\frac{3}{4}$ dari box.
 - D. Biarkan tanah memadat sendiri dengan alami (kurang lebih sehari) dengan tetap menjaga sampel kondisi jenuh.
 - E. Pengisian tanah warna
 - F. Masukkan cetakan kotak 20 x 20 cm kedalam sampel hingga rata rata uji
 - G. Tanah yang berada dalam cetakan kotak di gali dan di ganti dengan tanah warna yang telah di siapkan sebelumnya.
 - H. Cetakan kotak di tarik, sehingga tanah warna tertinggal di dalam box.
 - I. Letakkan permodelan pondasi diatas tanah warna dan ratakan
 - J. Pemasangan dial gauge untuk mengetahui penurunan.
 - K. Pembebanan awal dengan beban 8 kg di berikandan penurunan pondasi di catat setelah 15 menit.
 - L. Penambahan beban selanjutnya dilaksanakan sesudah 15 menit ditelaah penurunannya, hingga tanah tak mampu menahan bebannya (*collapse*)

- M. Pengangkatan beban (*unloading*) dilakukan secara bertahap dan dicatat hasil datanya.
- N. Lakukan pengamatan distribusi tegangan dengan penggalian disekitar tanah uji sedalam 80 cm.
- O. Analisis nilai penyebaran beban secara vertikal dan horizontal dalam box.

3.3 Metode Pengumpulan Data

Pada penelitian berikut, metode mengumpulkan data dikelompokkan jadi dua, yakni:

1. Data Primer, didapat melalui uji Laboratorium Universitas Bojonegoro.
2. Data Sekunder, didapat melalui jurnal/penelitian sebelumnya, pengujian SNI, buku, maupun bagian/ instansi yang terkait.

3.4 Metode Analisis Data

Pada penelitian berikut, data dianalisis menggunakan metode sebagai berikut :

- A. Metode pengolahan data dengan *Excel*.

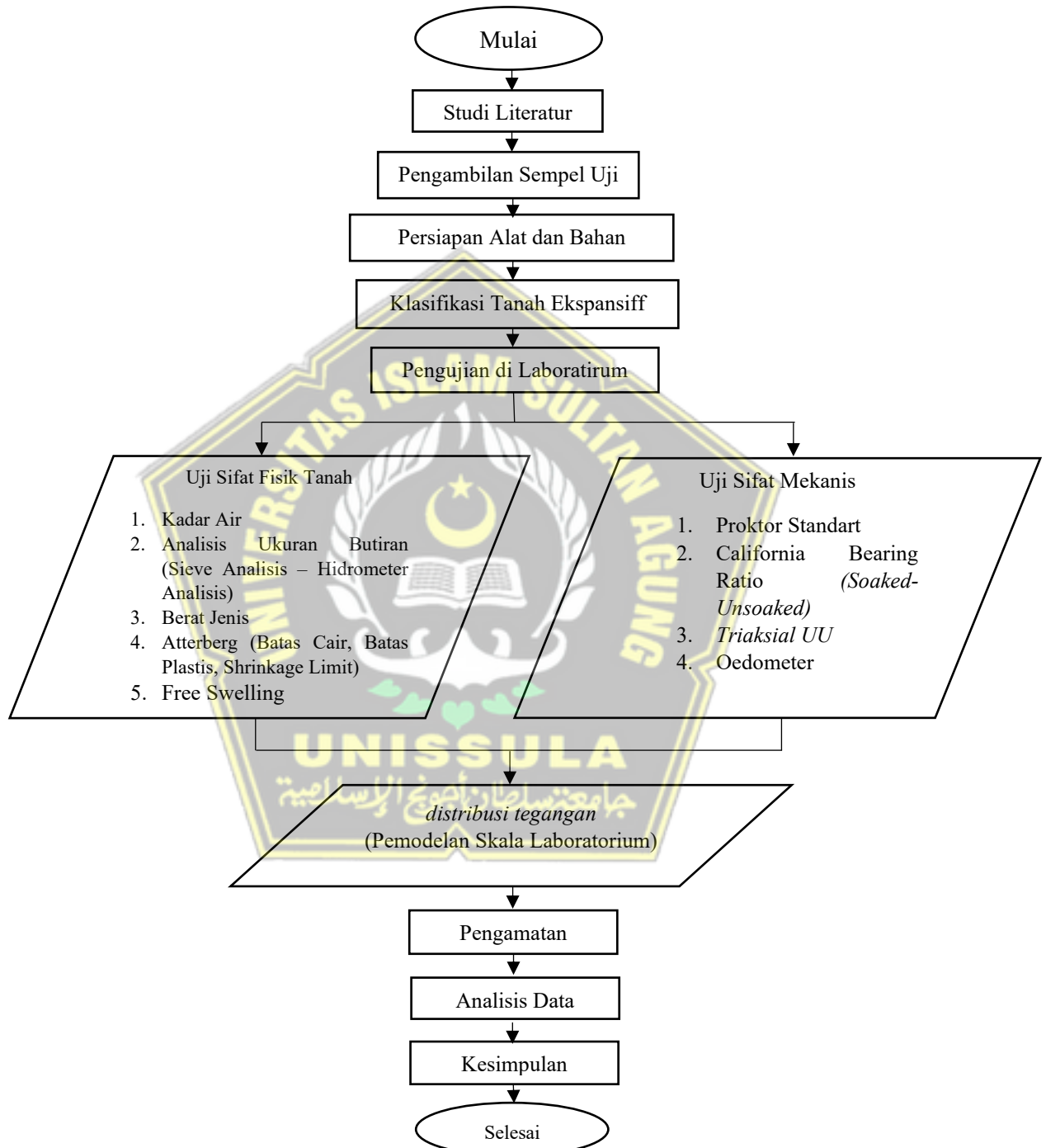
Metode pengolahan data dengan Excel adalah teknik memanfaatkan fitur dan fungsi *Microsoft Excel* untuk mengorganisasi, menganalisis, menghitung, atau menyajikan data secara efektif. Excel digunakan sebagai alat bantu untuk mengolah data, membuat perhitungan, menyusun grafik, serta menghasilkan laporan secara otomatis dan efisien dalam penelitian ini.

- B. Analisis hasil uji dengan pemodelan standart laboratorium.

Metode analisis hasil uji dengan pemodelan laboratorium adalah pendekatan untuk memahami penelitian dengan menggunakan data hasil uji di laboratorium. Data tersebut dianalisis untuk memodelkan fenomena fisik atau mekanis yang terjadi di lapangan secara lebih terkontrol dan terukur. Pemodelan ini dilakukan untuk mendapatkan parameter-parameter tertentu yang digunakan dalam penelitian.

3.5 Alur Penelitian

Berikut alur dari penelitian yang dapat membantu dan memudahkan tahapan-tahapan dalam penelitian seperti divisualisasikan di Gambar 3.2 Alur Penelitian :



Gambar 3. 2 Alur Penelitian

(Sumber : Peneliti, 2025)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Sifat Fisik

Sifat fisik tanah adalah karakter fundamental yang berpengaruh terhadap cara tanah merespons perubahan lingkungan serta bebannya. Sifat berikut meliputi berat jenis, kadar air, kepadatan, tekstur, serta batas Atterberg yang memvisualisasikan cara tanah berperilaku di beragam situasi. Pada penelitian berikut berfokus ke tanah ekspansif yang secara signifikan mampu mengalami pengembangan serta penyusutan sebagai dampak berubahnya kadar air. Tanah jenis ini umumnya tinggi akan kandungan mineral lempung, terutama montmorillonite, di mana memicu berubahnya volume yang ekstrem. Oleh karena itu, pemahaman terhadap sifat fisik tanah ekspansif sangat krusial bagi perencanaan teknik sipil guna mengurangi dampak negatif seperti retakan pada bangunan atau jalan raya.

Dalam studi laboratorium ini, beberapa parameter sifat fisik tanah diuji untuk memahami karakteristik tanah ekspansif sebelum dan setelah penerapan vertical sand drain. Parameter utama yang dianalisis meliputi kadar air alami, berat jenis tanah (*Specific Gravity*), batas cair dan batas plastis untuk menentukan plastisitas tanah, serta distribusi ukuran butiran untuk mengidentifikasi dominasi fraksi lempung atau lanau. Hasil uji sifat fisik ini akan menjadi dasar dalam analisis proses konsolidasi tanah dengan metode vertical sand drain, yang bertujuan untuk mempercepat proses pemadatan tanah dan mengurangi potensi pengembangan volume yang berlebihan.

4.1.1 Kadar Air

Kadar air tanah asli melalui pengujian guna mengetahui total air yang tersimpan alamiah pada tanah dengan tidak disertai perubahan ataupun gangguan. Metode ini penting dalam studi geoteknik, sebab kadar air tanah mempengaruhi sifat fisik maupun mekanis tanah. Sempel tanah yang diambil pada kedalaman 50 cm, pada bulan Juli 2025. Hasil dari pengujian nilai kadar air sebesar 84,60 %. Hal ini mengindikasikan bahwa tanah tersebut termasuk tanah lempung atau

lanau yang sangat jenuh air. Bowles (1997) dalam *Foundation Analysis and Design* menyebutkan bahwa kadar air $> 60\%$ biasanya ditemukan pada tanah-tanah kohesif lunak (soft clay).



Gambar 4. 1 Pengujian Kadar Air

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Kadar Air

Uji Kadar Air SNI 1965 : 2008			
No. cawan	1	2	3
Berat cawan (gram)	14.34	14.34	14.56
Berat cawan + Tanah basah (gram)	60.44	48.55	50.3
Berat cawan + Tanah kering (gram)	39.3	32.9	33.9
Berat tanah kering (gram)	24.96	18.56	19.34
Berat air (gram)	21.14	15.65	16.4
Kadar air (%)	84.70	84.32	84.80
Rata-rata Kadar air (%)	84.60		

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

4.1.2 Berat Jenis

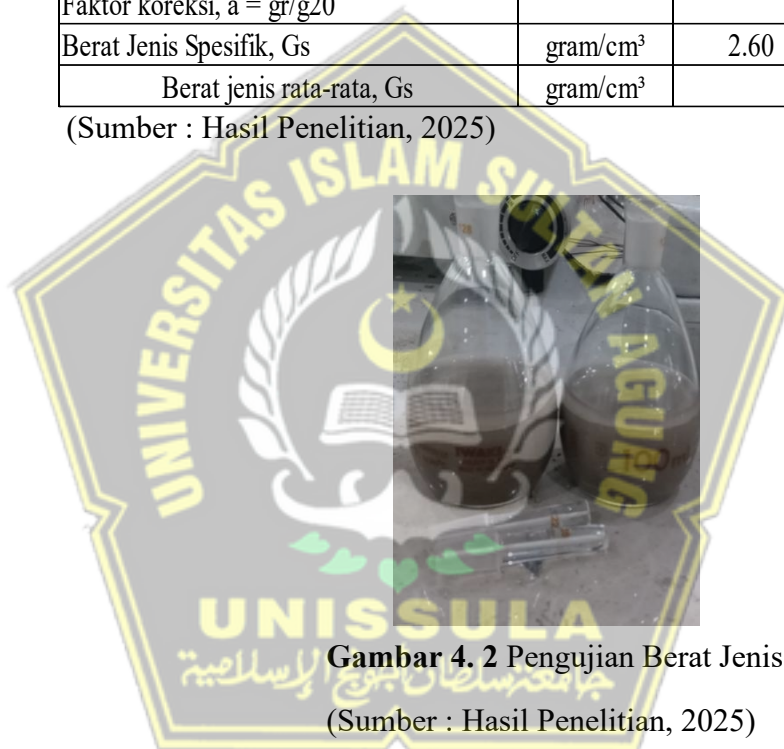
Berat Jenis ialah hasil dari membandingkan berat isi tanah dan berat isi air di suhu yang konstan. Adanya uji berikut sangat krusial sebab besarnya diterapkan pada tiap penghitungan terkait butir padat ataupun pori tanah, air, maupun udara. Berlandaskan uji Berat Jenis berstandar SNI 1964:2008, di dapatkan bahwa tanah ekspansif tersebut memiliki nilai sebesar 2,61. Nilai 2,61 ini adalah nilai normal untuk tanah mineral, khususnya lempung atau lanau. Menurut Coduto (2011) *Geotechnical Engineering: Principles and Practices* Nilai

berat jenis sekitar 2,60 pada tanah lempung menunjukkan kandungan mineral *kaolinit* atau *montmorillonite*.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Berat Jenis

Uji Berat Jenis Tanah (Gs) SNI 1964 : 2008			
Nomor Percobaan	Satuan	147	234
Berat piknometer, W1	gram	50.3	48.6
Berat piknometer + air, W2	gram	148.15	149.85
Berat piknometer + air + tanah, W3	gram	163.55	165.3
Berat tanah kering, Ws	gram	25	25
Temperatur, 27°C	°C	27	27
Faktor koreksi, $a = \frac{gr}{g20}$		0.998	
Berat Jenis Spesifik, Gs	gram/cm ³	2.60	2.61
Berat jenis rata-rata, Gs	gram/cm ³	2.61	

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)



Gambar 4. 2 Pengujian Berat Jenis Tanah

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

4.1.3 Analisis Ukuran Butiran

Pada sistem analisis berikut, ukuran butiran menjadi acuan mengklasifikasikan tanah. Kemudian, melalui proses pengayakan ataupun analisis Sieve dapat dibagi ukuran butiran pada tanah butir kasar. Adapun pembagian butiran pada tanah butir halus bisa dilaksanakan melalui metode kecepatan pengendapan ataupun penurunan pada air, atau disebut dengan metode mekanis. Dari hasil pengujian Analisis saringan dapat di lihat di bawah ini :

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Sieve Analysis

Sieve Analysis					
Nomor Saringan	Diameter lubang saringan (mm)	Berat tanah yang tertahan saringan	% berat tanah tertahan saringan	% kumulatif dari tanah yang tertahan	% tanah yang lolos saringan
4	4.75	8	10.59	10.59	89.41
10	2	11.5	15.22	25.81	74.19
20	0.85	21.4	28.33	54.14	45.86
40	0.425	13.5	17.87	72.01	27.99
60	0.25	4.05	5.36	77.37	22.63
140	0.106	8	10.59	87.95	12.05
200	0.075	9	11.91	99.87	0.13
PAN	-	0	0.00	99.87	0.13
Berat Total W1		75.45			

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)



Gambar 4. 3 Pengujian Analisa Saringan

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Selanjutnya, hidrometer dipergunakan dalam menganalisis klasifikasi butiran tanah sebab ukuran tanahnya cenderung kecil, yakni lolos ayakan No. 200. Metode berikut menjadi langkah menganalisis sedimentasi yang transkripsi percobaannya diperoleh melalui korelasi antar kadar butir sampel di mana bisa diketahui dari Menara Hidrometer.

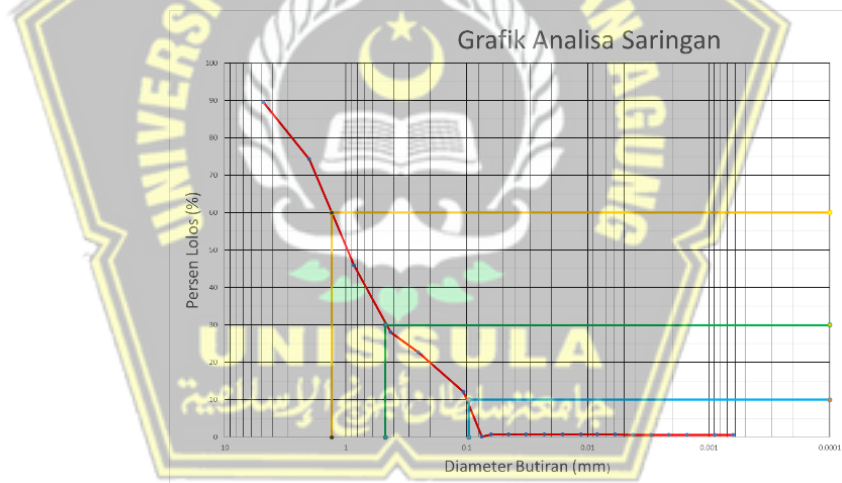
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Hidrometer Analisis

Hidrometer Analisis							
Waktu (T) (Menit)	Pembacaan Hidrometer R	Koreksi Pembacaan n $R_{cp} = (R + F_t - F_z)$	% Butiran Halus $\frac{aR_{cp}}{W} \times 100$	Pembacaan Hidrometer Aktual $R_{cl} = R + F_m$	L (mm)	K	$d = K \sqrt{\frac{L}{T}}$ (mm)
0.25	39	33.65	68.09	40	5.9	0.01291	0.0627
0.5	38	32.65	66.07	39	6.05	0.01291	0.0449
1	38	32.65	66.07	39	6.2	0.01291	0.0321
2	37.5	32.15	65.06	38.5	6.2	0.01291	0.0227
4	37.5	32.15	65.06	38.5	6.2	0.01291	0.0161
8	37	31.65	64.05	38	6.2	0.01291	0.0114
15	37	31.65	64.05	38	6.2	0.01291	0.0083
30	37	31.65	64.05	38	6.35	0.01291	0.0059
60	36.5	31.15	63.03	37.5	6.35	0.01291	0.0042
120	36	30.65	62.02	37	6.5	0.01291	0.0030
240	36	30.65	62.02	37	6.5	0.01291	0.0021
480	35.5	30.15	61.01	36.5	6.5	0.01291	0.0015
1440	35	29.65	60.00	36	6.8	0.01291	0.0009
2880	34	28.65	57.98	35	6.8	0.01291	0.0006

Catatan : Menggunakan Hidrometer 151 H

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Pada gambar di bawah memvisualisasikan grafik pendistribusian ukuran partikel pada satu sampel. Umumnya dipakai dalam mengidentifikasi karakteri fisik tanah.



Gambar 4. 4 Grafik Analisis Ukuran Butir Tanah

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Grafik tersebut bisa menunjukkan korelasi dari persentase akumulatif massa lolos disaring dengan ketentuan khusus dan ukuran butirannya, hingga mempermudah penentuan parameternya. Menurut klasifikasi USCS tanah termasuk CH (*Clay With High Plasticity*) sedangkan menurut klasifikasi AASHTO Adalah A-7-6. Dari hasil pengujian diketahui nilai pasir sebesar 7,55 %, Clay sebesar 92,45 %,

besaran Koefisien gradasi (C_c) ialah 16,31%, Koefisien keseragaman (C_u) yaitu 13,54 %, Diameter efektif D_{60} senilai 1,30 %, D_{30} bernilai 0,47 %, serta D_{10} sebesar 0,10 %. Kesimpulan klasifikasi: Kedua sistem menyatakan tanah ini berplastisitas tinggi, ekspansif, dan buruk untuk konstruksi jalan tanpa perbaikan.

4.1.4 *Atterberg Limit*

Atterberg Limit merupakan pengujian yang diterapkan guna mengetahui batasan konsistensi tanah, khususnya pada lempung atau yang jenisnya tanah berbutir halus. Uji ini digunakan dalam geoteknik untuk menilai perilaku tanah berdasarkan kadar air. Pengujian ini ada tiga batas yaitu :



Gambar 4. 5 Pengujian Atterberg Limit

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

1. Batas Cair/*Liquid Limit* (LL)

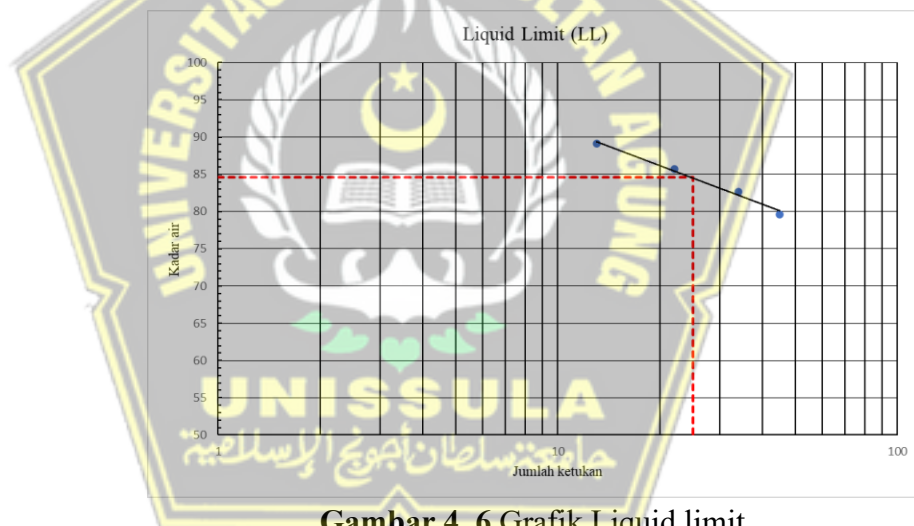
Batas Cair tanah merupakan kadar air minimal yang dapat memicu perubahan sifat tanah jadi plastis dari yang semula dalam kondisi cair. Adapun besarannya digunakan untuk menentukan sifat dan klasifikasi tanah. Hasil pengujian Batas cair/ *Liquid Limit* mendapatkan nilai sebesar 84,60 pada ketukan ke - 25. Tanah dengan LL 84,60% termasuk sangat plastis dan tanah ini menyimpan air dalam jumlah besar serta memiliki kohesi yang tinggi saat jenuh.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian *Liquid Limit* (LL)

No. cawan		Liquid Limit (LL)			
		1	2	3	4
Banyak ketukan		13	22	34	45
Berat cawan	gram	14.2	14.33	14.45	14.2
Berat cawan + contoh basah (A)	gram	40.3	42.2	40.3	38.45
Berat cawan + contoh kering (B)	gram	28	29.34	28.6	27.7
Berat air	gram	12.3	12.86	11.7	10.75
Berat contoh kering	gram	13.8	15.01	14.15	13.5
Kadar air	%	89.13	85.68	82.69	79.63

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Grafik hasil pengujian kadar air tanah menunjukkan hubungan antara kadar air (%) dengan kedalaman atau lokasi sampel. Tampilan pola pada grafik berikut mempermudah mengidentifikasi pendistribusian kelembaban tanah termasuk mengetahui karakter hidrogeologi yang ada.



Gambar 4. 6 Grafik Liquid limit

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

2. Batas Plastis/*Plastic Limit* (PL)

Batas Plastis ialah kadar air ketika tanah menjadi semi solid dari yang semula pada kondisi plastis. Penghitungan batasan berikut didasarkan pada persentase bobot air dengan tanah kering di benda yang ujinya. Dari hasil pengujian di dapatkan nilai sebesar 30,68 %. Nilai ini menunjukkan kadar air di mana tanah mulai berubah dari plastis menjadi semi-padat. Nilai PL sebesar 30,68%

adalah angka standar, tapi jauh lebih rendah dari LL, menunjukkan rentang plastisitas yang besar

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Plastic Limit (PL)

No. cawan		Plastic Limit (PL)		
		1	2	3
Berat cawan	gram	14.50	14.56	14.38
Berat cawan + contoh basah (A)	gram	30.30	34.23	30.88
Berat cawan + contoh kering (B)	gram	26.63	29.57	27
Berat air	gram	3.67	4.66	3.88
Berat contoh kering	gram	12.13	15.01	12.62
Kadar air	%	30.26	31.05	30.74

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

3. Plastic Indeks (PI)

Indeks Plastis (PI) yaitu hasil pengurangan parameter batas cair (LL) dengan batas plastis (PL). Atas dasar tersebut, PI menunjukkan nilai keplastisan tanah. Diketahui dari perolehan uji nilai PI senilai 53,92 %, menunjukkan nilai tinggi sehingga bisa ditarik simpulan tanahnya termasuk tanah ekspansif sebab tinggi akan kandungan lempung. Menurut Seed et al (1962). nilai PI jika kurang dari 15 maka termasuk rendah, jika 15–25 maka tergolong sedang, kemudian jika nilainya antara 25–40 maka termasuk tinggi, sedangkan jika nilainya lebih dari 40 maka termasuk sangat tinggi (*very high*).

Tabel 4.7 Nilai Plastic Indeks (PI)

CATATAN	LL %	PL %	PI %
Contoh dalam keadaan : Tanah lolos saringan No. 40 dan bebas udara	84.60	30.68	53.92

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

4. Batas Susut/*Shrinkage Limit* (SL)

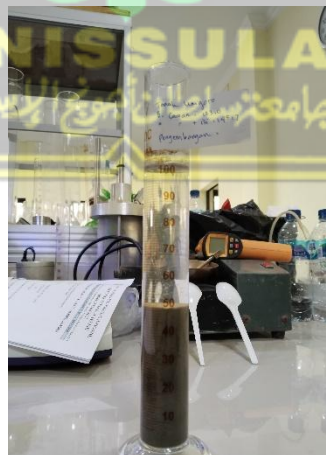
Penggunaan batas susut atau SL yakni pada pengukuran kadar air di posisi ketika tanah bertransisi menjadi padat dari yang semula semi padat. Hasil pengujian menunjukkan shrinkage limit tanah sebesar 21,53 %, mengindikasikan tanah berpotensi tinggi menyusut ketika kadar airnya hilang.

Tabel 4.8 Hasil Pengujian *Shrinkage Limit* (SL)

Shrinkage Limit (SL)				
SNI 3422 : 2008				
Nomor Percobaan		1	2	3
Berat cawan	gram	73	75.2	75.22
berat cawan + contoh tanah basah	gram	96.59	98.1	97.4
Berat cawan + contoh tanah kering	gram	87.89	89.79	88.39
Berat air (Ww)	gram	8.7	8.31	9.01
Berat contoh tanah basah (W)	gram	23.59	22.9	22.18
Berat contoh tanah kering (Wo)	gram	14.89	14.59	13.17
Volume contoh tanah basah (V)	cm ³	15.86	15.69	15.41
Volume contoh tanah kering (Vo)	cm ³	7.80	7.60	7.26
Kadar air awal atau semula(w)	%	58.43	56.96	68.41
Berat Jenis (G)	-	0.12	0.12	0.10
Rasio Susut (R)	%	1.91	1.92	1.81
Batas Susut (S)	%	4.32	1.45	6.53
Perubahan volume (VC)	%	103.23	106.61	112.22
Susut linier (LS)	%	21.05	21.49	22.18
Rata-rata	%		21.57	

(Sumber : Hasil Penelitian 2025)

4.1.5 *Free Swelling*



Gambar 4. 7 Pengujian *Free Swelling*

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Free Swelling merupakan analisis terstandar guna mengetahui *swelling* atau potensi pengembangan tanah saat terjadi penyerapan air.

Berikut adalah tabel hasil pengujian *free swelling*, yang mencantumkan nilai pengembangan tanah dalam persen berdasarkan pengujian laboratorium.

Tabel 4.9 Hasil Pengujian *Free Swelling*

<i>Free Swelling</i>	
Volume Awal, V_i	20
Volume Akhir, V_f	50
Free Swelling Indeks, % $FSI = \frac{V_f - V_i}{V_i} \times 100$	150

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Hasil yang di dapatkan adalah 150%, nilai ini termasuk sangat tinggi, karena tanah mengembang secara signifikan saat menyerap air dan akan menaikkan atau merusak struktur (pondasi, lantai, jalan) jika tidak distabilisasi. Menurut Chen (1988) nilai *free swelling* lebih dari 100% termasuk *high to very high expansive*.

4.2 Sifat Mekanis

Pada tanah ekspansif, sifat mekanisnya meliputi beragam indikator penentu respons tanah atas perubahan maupun beban lingkungannya. Satu di antara sifat berikut yaitu daya dukung tanah, di mana memperlihatkan kapabilitas tanah menyokong bebannya dengan tidak disertai deformasi berlebih. Kemudian, kecenderungan tanah ekspansif yaitu rendahnya daya dukung yang dimiliki sebab volumenya berubah secara signifikan saat berada pada siklus kering maupun basah. Selain itu, tanah ini juga memiliki sudut geser dalam serta nilai kohesi yang mampu berubah tergantung kadar airnya. Nilai kohesi yang tinggi pada kondisi kering dapat berkurang secara drastis saat tanah menyerap air, yang menyebabkan penurunan kekuatan geser dan berpotensi menimbulkan pergerakan tanah atau longsor. Oleh karena itu, studi mengenai sifat mekanis tanah ekspansif menjadi penting untuk memahami bagaimana tanah ini dapat berperilaku dalam kondisi nyata di lapangan.

Dalam penelitian ini, pengujian sifat mekanis tanah ekspansif dilakukan untuk mengevaluasi tentang penurunan pada tanah ekspansif serta

mengetahui distribusi tegangan. Dengan pemahaman yang lebih mendalam tentang sifat mekanis tanah, diharapkan penelitian ini dapat memberikan solusi yang lebih baik dalam menangani permasalahan tanah ekspansif pada konstruksi di lapangan.

4.2.1 Proctor Standart

Uji Kepadatan Ringan atau *Proctor Standart* adalah suatu proses memadatnya partikel tanah sehingga terjadi pengurangan volume udara dan volume air dengan memakai cara mekanis. Pemadatan tanah bertujuan untuk menentukan kepadatan maksimum tanah dengan cara tumbukan yaitu dengan mengetahui hubungan antara kadar air dengan kepadatan tanah. Kadar air yang memberikan berat kering yang maksimal disebut kadar air optimum *Optimum Moisture Content* (OMC). Hasil dari uji kepadatan ringan dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.10 Hasil Pengujian Kepadatan Ringan

SNI 1742 : 2008																					
Penentuan Kepadatan Basah (Wet Density Determination)																					
No.Mould	-	1			2			3			4			5							
Massa Mould	gram	3535			3535			3535			3535			3535							
Massa Tanah Basah + Mould	gram	4755			4910			5030			5260			5110							
Massa Tanah Basah, Wwet	gram	1220			1375			1495			1725			1575							
Volume Mould	cm³	939.493			939.493			939.493			939.493			939.493							
Kepadatan Basah	gr/cm³	1.299			1.464			1.591			1.836			1.676							
Kadar Air (Water Content Determination)																					
No. Container	-	44	54	57	63	40	11	27	41	1	2	4	55	74	34	14					
Massa Tanah Basah + Container	gram	44.2	54.5	56.5	70.34	65.54	69.54	62.5	79.3	71.1	58.02	53	52.1	52.3	49	40					
Massa Tanah Kering + Container	gram	43.2	53.25	55.15	64.9	60.5	64.12	55	69	62.5	49.2	44.9	44.6	43.2	40.4	33.9					
Massa air	gram	1	1.25	1.35	5.44	5.04	5.42	7.5	10.3	8.6	8.82	8.1	7.5	9.1	8.6	6.1					
Massa Container	gram	14.54	14.65	14.9	14.30	14.57	14.44	14.29	14.76	14.38	14.09	14.20	14.9	14.32	14.54	14.78					
Massa Tanah Kering	gram	28.66	38.6	40.25	50.60	45.93	49.68	40.71	54.24	48.12	35.11	30.70	29.7	28.88	25.86	19.12					
Kadar Air	%	3.49	3.24	3.35	10.75	10.97	10.91	18.42	18.99	17.87	25.12	26.38	25.25	31.51	33.26	31.90					
Kadar Air Rata-rata	%	3.36		10.88				18.43			25.59			32.22							
Penentuan Kepadatan (Density Determination)																					
Massa tanah basah, W _{wet}	gram	1220				1375				1495				1725				1575			
Kadar air rata-rata	%	3.36				10.88				18.43				25.59				32.22			
Massa tanah kering $W_{dry} = \frac{W_{wet}}{1 + (\frac{w}{100})}$	gram	1180.335				1240.102				1262.368				1373.561				1191.168			
Volume mold	cm³	939.493				939.493				939.493				939.493				939.493			
Kepadatan kering $\gamma_{dry} = \frac{W_{dry}}{V_{mould}}$	gram/cm³	1.256				1.320				1.344				1.462				1.268			
$\gamma_w = G_s / ((1 + (w/100)) \cdot G_s)$	gram/cm³	2.397				2.031				1.761				1.564				1.417			

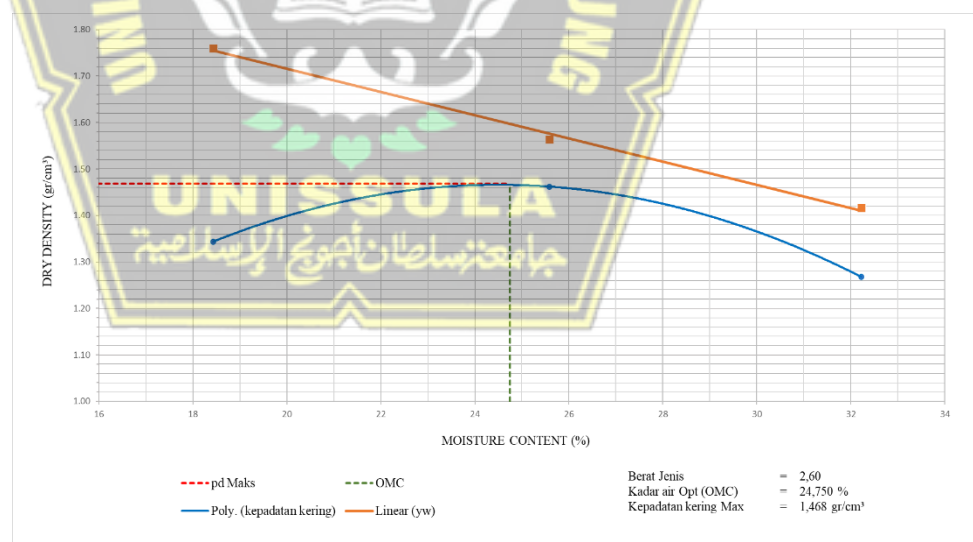
(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)



Gambar 4. 8 Pengujian Standart Proctor

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Grafik *Proctor standart* menggambarkan hubungan antar kadar air dan kepadatan maksimum tanah. Hasil dari pengujian tersebut menunjukan nilai OMC sebesar 24,75 % hal ini sangat sesuai dengan tanah lempung yang sangat halus dan plastis kemudian nilai kepadatan



Gambar 4. 9 Grafik Hubungan OMC dengan Dry Density

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

maksimum 1,468 gr/cm³ nilai ini termasuk rendah. Karena tanah lempung yang sangat halus dan plastis nilai ini sangat cocok karena tanah tidak bisa di padatkan terlalu padat karena sifat lempung

plastisnya. Menurut Das (2010) tanah lempung dengan plastisitas tinggi akan menunjukkan nilai OMC tinggi dan γ_d max rendah dalam uji Proctor, rentang umum OMC 18–28% untuk CH.

4.2.2 *California Bearing Ratio (CBR)*

CBR (*California Bearing Ratio*) adalah pengujian untuk menentukan daya dukung tanah, suatu perbandingan antara beban percobaan (*test load*) dengan beban standar (*standard load*) dan dinyatakan dalam persentase. Nilai CBR dihitung dari perbandingan antara tekanan yang dibutuhkan untuk menembus spesimen tanah pada kedalaman tertentu (biasanya 2,54 mm dan 5,08 mm), dengan tekanan standar yang dibutuhkan untuk menembus bahan referensi (*crushed stone*) pada kedalaman yang sama. Dalam Pengujian CBR laboratorium ada 2 cara yaitu tanpa rendaman (*Unsoaked*) dan rendaman (*Soaked*). Untuk CBR rendaman Sampel tanah direndam selama 4 hari sebelum dilakukan penetrasi, guna mensimulasikan kondisi lapangan saat tanah jenuh air.



Gambar 4. 10 Pengujian CBR

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

1. CBR Tanpa Rendaman (*Unsoaked*)

Hasil dari pengujian *California Bearing Ratio (CBR)* *Unsoaked* dengan 10 tumbukan per lapis, pada penetrasi 2,54 mm mendapatkan nilai 3,76 % dan pada penetrasi 5,08 mendapatkan nilai 3,51 %.

Tabel 4.11 CBR Unsoaked 10 Tumbukan

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)					
SNI 1774 : 2012					
Kadar Air			Densitas, No Cetakan		
Massa Tanah Basah + Cawan, g			Massa Benda Uji + Cetakan, g		
Massa Tanah Kering + Cawan, g			Massa Cetakan, g		
Massa air, g			Massa Benda Uji basah, g		
Massa Cawan, g			Isi Cetakan, cm3		
Massa Tanah Kering, g			Densitas basah (p), g/cm3		
Kadar air (w), %			Densitas Kering (pd), g/cm3		
Kalibrasi Poving Ring, K= 0.20082 kn = (45.147 lb)			GRAFIK CBR		
Waktu (menit)	Penetrasi		Pembacaan Arloji Ukur Beban	Bahan Penetrasi = Pembacaan Arloji ukur beban x k	
	mm	in	Devisi	Kn	lb
0	0	0	0	0.000	0.0
1/4	0.32	0.0125	0.5	0.100	22.6
1/2	0.64	0.025	1	0.201	45.1
1	1.27	0.050	1.5	0.301	67.7
1 1/2	1.91	0.075	2	0.402	90.3
2	2.54	0.10	2.5	0.502	112.9
3	3.81	0.15	3	0.602	135.4
4	5.08	0.20	3.5	0.703	158.0
6	7.62	0.30	4	0.803	180.6
8	10.16	0.40	4.5	0.904	203.2
10	12.7	0.50	5	1.004	225.7
NILAI CBR, %					
2,54 mm			0,10 in		
112.9 13.5 x 100			112.9 3000 x 100		
= 836.056			= 3.76		
5,08 mm			0,20 in		
158.0 20.02 x 100			158.0 4500 x 100		
= 789.283			= 3.51		
Catatan, Jumlah tumbukan per lapis = 10					

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Hasil dari pengujian *California Bearing Ratio (CBR)* *Unsoaked* dengan 30 tumbukan per lapis, pada penetrasi 2,54 mm mendapatkan nilai 4,51 % dan pada penetrasi 5,08 mm mendapatkan nilai 4,01 %.

Tabel 4.12 CBR Unsoaked 30 Tumbukan

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)						
SNI 1774 : 2012						

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Hasil dari pengujian *California Bearing Ratio (CBR)* *Unsoaked* dengan 65 tumbukan per lapis, pada penetrasi 2,54 mm mendapatkan nilai 6,77 % dan pada penetrasi 5,08 mendapatkan nilai 6,52 %.

Tabel 4.13 CBR *Unsoaked* 65 Tumbukan

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)						
SNI 1774 : 2012						
Kadar Air			Densitas, No Cetakan			
Massa Tanah Basah + Cawan, g			38.5		Massa Benda Uji + Cetakan, g	11487
Massa Tanah Kering + Cawan, g			33.63		Massa Cetakan, g	7614
Massa air, g			4.87		Massa Benda Uji basah, g	3873
Massa Cawan, g			14.04		Isi Cetakan, cm3	2122
Massa Tanah Kering, g			19.59		Densitas basah (p), g/cm3	1.83
Kadar air (w), %			24.86		Densitas Kering (pd), g/cm3	1.46
Kalibrasi Poving Ring, K= 0.20082 kn = (45.147 lb)						
Waktu (menit)	Penetrasi		Pembacaan Arloji Ukur Beban	Bahan Penetrasi = Pembacaan Arloji ukur beban x k		
	mm	in	Devisi	Kn	lb	
0	0	0	0	0.000	0.0	
1/4	0.32	0.0125	1	0.201	45.1	
1/2	0.64	0.025	2	0.402	90.3	
1	1.27	0.050	3	0.602	135.4	
1 1/2	1.91	0.075	4	0.803	180.6	
2	2.54	0.10	4.5	0.904	203.2	
3	3.81	0.15	6	1.205	270.9	
4	5.08	0.20	6.5	1.305	293.5	
6	7.62	0.30	8	1.607	361.2	
8	10.16	0.40	8.5	1.707	383.7	
10	12.7	0.50	9.5	1.908	428.9	
NILAI CBR, %						
2,54 mm			0,10 in			
203.2			203.2			
13.5 x 100			3000 x 100			
= 1504.9			= 6.77			
5,08 mm			0,20 in			
293.5			293.5			
20.02 x 100			4500 x 100			
= 1014.79			= 6.52			
Catatan, Jumlah tumbukan per lapis = 65						

GRAFIK CBR

Catatan, Jumlah tumbukan per lapis = 65

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

2. CBR Rendaman (Soaked)

Hasil dari pengujian *California Bearing Ratio (CBR) Soaked* dengan 10 tumbukan per lapis, pada penetrasi 2,54 mm mendapatkan nilai 1,05% dan pada penetrasi 5,08 mendapatkan nilai 1,00%.

Tabel 4.14 CBR Soaked 10 Tumbukan

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)																																	
SNI 1774 : 2012																																	
Kadar Air			Sebelum direndam	Sesudah direndam	Densitas, No Cetakan			Sebelum direndam	Sesudah direndam																								
Massa Tanah Basah + Cawan, g			25.21	35.73	Massa Benda Uji + Cetakan, g			11258	11535																								
Massa Tanah Kering + Cawan, g			23.01	30	Massa Cetakan, g			7543	7543																								
Massa air, g			2.2	5.73	Massa Benda Uji basah, g			3715	3992																								
Massa Cawan, g			14.28	14.82	Isi Cetakan, cm ³			2122	2122																								
Massa Tanah Kering, g			8.73	15.18	Densitas basah (ρ), g/cm ³			1.75	1.88																								
Kadar air (w), %			25.2	37.7	Densitas Kering (ρ _d), g/cm ³			1.40	1.37																								
Penetrasi, Kalibrasi Poving Ring, K= 0.20082 kn = (45.147 lb)																																	
Waktu (menit)	Penetrasi		Pembacaan Arloji Ukur Beban	Bahan Penetrasi = Pembacaan Arloji ukur beban x k		GRAFIK CBR <table border="1"><caption>Data points from the CBR Graph</caption><thead><tr><th>Penetrasi (mm)</th><th>Beban (lb)</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0.32</td><td>9.0</td></tr><tr><td>0.64</td><td>13.5</td></tr><tr><td>1.27</td><td>18.1</td></tr><tr><td>1.91</td><td>22.6</td></tr><tr><td>2.54</td><td>31.6</td></tr><tr><td>3.81</td><td>36.1</td></tr><tr><td>5.08</td><td>45.1</td></tr><tr><td>7.62</td><td>54.2</td></tr><tr><td>10.16</td><td>63.2</td></tr><tr><td>12.7</td><td>67.7</td></tr></tbody></table>				Penetrasi (mm)	Beban (lb)	0	0	0.32	9.0	0.64	13.5	1.27	18.1	1.91	22.6	2.54	31.6	3.81	36.1	5.08	45.1	7.62	54.2	10.16	63.2	12.7	67.7
	Penetrasi (mm)	Beban (lb)																															
0	0																																
0.32	9.0																																
0.64	13.5																																
1.27	18.1																																
1.91	22.6																																
2.54	31.6																																
3.81	36.1																																
5.08	45.1																																
7.62	54.2																																
10.16	63.2																																
12.7	67.7																																
mm	in	Devisi	Kn	lb																													
0	0	0	0.0	0.0																													
1/4	0.32	0.0125	0.2	0.040																													
1/2	0.64	0.025	0.3	0.060																													
1	1.27	0.050	0.4	0.080																													
1 1/2	1.91	0.075	0.5	0.100																													
2	2.54	0.10	0.7	0.141																													
3	3.81	0.15	0.8	0.161																													
4	5.08	0.20	1	0.201																													
6	7.62	0.30	1.2	0.241																													
8	10.16	0.40	1.4	0.281																													
10	12.7	0.50	1.5	0.301																													
NILAI CBR, %																																	
2,54 mm			0,10 in																														
0.1			31.6																														
13.5			3000																														
= 1.04131			= 1.05																														
5,08 mm			0,20 in																														
0.2			45.1																														
20.02			4500																														
= 1.00312			= 1.00																														
Catatan, Jumlah tumbukan per lapis = 10																																	

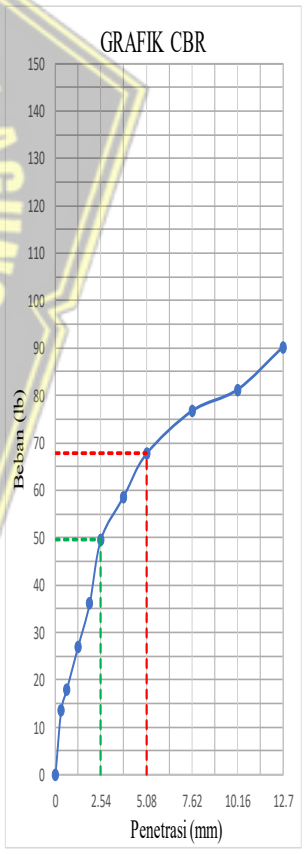
(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Hasil dari pengujian *California Bearing Ratio (CBR) Soaked* dengan 30 tumbukan per lapis, pada penetrasi 2,54 mm mendapatkan nilai 1,66 % dan pada penetrasi 5,08 mm mendapatkan nilai 1,50 %.

Tabel 4.15 CBR Soaked 30 Tumbukan

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)									
SNI 1774 : 2012									
Kadar Air			Sebelum direndam	Sesudah direndam	Densitas, No Cetakan			Sebelum direndam	Sesudah direndam
Massa Tanah Basah + Cawan, g			28.03	45.44	Massa Benda Uji + Cetakan, g			11142	11394
Massa Tanah Kering + Cawan, g			25.23	37.15	Massa Cetakan, g			7367	7367
Massa air, g			2.8	8.29	Massa Benda Uji basah, g			3775	4027
Massa Cawan, g			14.14	14.79	Isi Cetakan, cm3			2122	2122
Massa Tanah Kering, g			11.09	22.36	Densitas basah (ρ), g/cm3			1.78	1.90
Kadar air (w), %			25.2	37.1	Densitas Kering (pd), g/cm3			1.42	1.38
Penetrasi, Kalibrasi Poving Ring, K= 0.20082 kn = (45.147 lb)									
Waktu (menit)	Penetrasi		Pembacaan Arloji Ukur Beban	Bahan Penetrasi = Pembacaan Arloji ukur beban x k					
	mm	in	Devisi	Kn	Lb				
0	0	0	0	0.000	0.0				
1/4	0.32	0.0125	0.3	0.060	13.5				
1/2	0.64	0.025	0.4	0.080	18.1				
1	1.27	0.050	0.6	0.120	27.1				
1 1/2	1.91	0.075	0.8	0.161	36.1				
2	2.54	0.10	1.1	0.221	49.7				
3	3.81	0.15	1.3	0.261	58.7				
4	5.08	0.20	1.5	0.301	67.7				
6	7.62	0.30	1.7	0.341	76.7				
8	10.16	0.40	1.8	0.361	81.3				
10	12.7	0.50	2	0.402	90.3				
NILAI CBR, %									
2,54 mm			0,10 in						
0.2 13.5 x 100			49.7 3000 x 100						
= 1.63634			= 1.66						
5,08 mm			0,20 in						
0.3 20.02 x 100			67.7 4500 x 100						
= 1.50468			= 1.50						
Catatan, Jumlah tumbukan per lapis = 30									

GRAFIK CBR

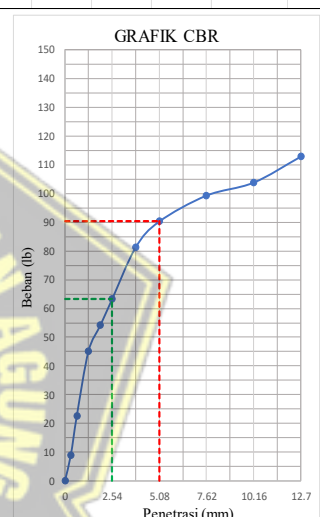


Penetrasi (mm)	Beban (lb)
0	0
2.54	13.5
5.08	18.1
7.62	27.1
10.16	36.1
12.7	49.7

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Hasil dari pengujian *California Bearing Ratio (CBR) Soaked* dengan 65 tumbukan per lapis, pada penetrasi 2,54 mm mendapatkan nilai CBR 2,11 % dan pada penetrasi 5,08 mm mendapatkan nilai CBR 2,01 %.

Tabel 4.16 CBR Soaked 65 Tumbukan

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)									
SNI 1774 : 2012									
Kadar Air		Sebelum direndam		Sesudah direndam		Densitas, No Cetakan		Sebelum direndam	Sesudah direndam
Massa Tanah Basah + Cawan, g		32.2		49.01		Massa Benda Uji + Cetakan, g		11388	11631
Massa Tanah Kering + Cawan, g		28.65		39.67		Massa Cetakan, g		7528	7528
Massa air, g		3.55		9.34		Massa Benda Uji basah, g		3860	4103
Massa Cawan, g		14.46		14.2		Isi Cetakan, cm3		2122	2122
Massa Tanah Kering, g		14.19		25.47		Densitas basah (p), g/cm3		1.82	1.93
Kadar air (w), %		25.0		36.7		Densitas Kering (pd), g/cm3		1.46	1.41
Penetrasi, Kalibrasi Poving Ring, K= 0.20082 kn = (45.147 lb)									
Waktu (menit)	Penetrasi		Pembacaan Arloji Ukur Beban		Bahan Penetrasi = Pembacaan Arloji ukur beban x k				
	mm	in	Devisi	Kn	lb				
0	0	0	0	0	0.0				
1/4	0.32	0.0125	0.2	0.040	9.0				
1/2	0.64	0.025	0.5	0.100	22.6				
1	1.27	0.050	1	0.201	45.1				
1 1/2	1.91	0.075	1.2	0.241	54.2				
2	2.54	0.10	1.4	0.281	63.2				
3	3.81	0.15	1.8	0.361	81.3				
4	5.08	0.20	2	0.402	90.3				
6	7.62	0.30	2.2	0.442	99.3				
8	10.16	0.40	2.3	0.462	103.8				
10	12.7	0.50	2.5	0.502	112.9				
NILAI CBR, %									
2.54 mm		0.10 in							
0.3		63.2							
13.5		3000							
= 2.08262		= 2.11							
5.08 mm		0.20 in							
0.4		90.3							
20.02		4500							
= 2.00623		= 2.01							
Catatan, Jumlah tumbukan per lapis = 65									

triaxial di mana sampel tanah tidak dikonsolidasi dan tidak didrainase selama pengujian. Pemilihan uji Unconsolidated Undrained (UU) dalam studi ini didasarkan pada karakteristik tanah lempung jenuh di wilayah Bojonegoro, yang bersifat ekspansif dan berpermeabilitas rendah. Oleh karena itu, uji UU lebih tepat untuk menggambarkan kondisi lapangan yang mungkin terjadi dan memberikan data kekuatan geser undrained (tanpa konsolidasi). Hasil pengujian Triaksial UU pada tanah Bojonegoro dapat di lihat pada Tabel 4.17.

Tabel 4. 17 Hasil pengujian beban 1

ΔH mm	Strain (%)	coreted area	Prov ring	Cell pressure	beban	Deviator load	Deviator stress	σ_1
0	0.0000	9.2085	0	1	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000
0.5	0.0072	9.2750	1	1	2.4600	6.0516	0.6525	1.6525
1	0.0143	9.3424	1	1	2.4600	6.0516	0.6478	1.6478
1.5	0.0215	9.4107	2	1	4.9200	12.1032	1.2861	2.2861
2	0.0286	9.4801	2	1	4.9200	12.1032	1.2767	2.2767
2.5	0.0358	9.5506	2	1	4.9200	12.1032	1.2673	2.2673
3	0.0430	9.6220	2	1	4.9200	12.1032	1.2579	2.2579
3.5	0.0501	9.6946	3	1	7.3800	18.1548	1.8727	2.8727
4	0.0573	9.7682	3	1	7.3800	18.1548	1.8586	2.8586
4.5	0.0645	9.8430	3	1	7.3800	18.1548	1.8444	2.8444
5	0.0716	9.9190	3	1	7.3800	18.1548	1.8303	2.8303
5.5	0.0788	9.9961	3	1	7.3800	18.1548	1.8162	2.8162
6	0.0859	10.0744	4	1	9.8400	24.2064	2.4028	3.4028
6.5	0.0931	10.1540	4	1	9.8400	24.2064	2.3839	3.3839
7	0.1003	10.2348	4	1	9.8400	24.2064	2.3651	3.3651
7.5	0.1074	10.3169	3	1	7.3800	18.1548	1.7597	2.7597
8	0.1146	10.4004	3	1	7.3800	18.1548	1.7456	2.7456
8.5	0.1218	10.4852	2	1	4.9200	12.1032	1.1543	2.1543
9	0.12892136	10.5714	2	1	4.920	12.10320	1.144898	2.1449

(Sumber : Penelitian, 2025)

Tabel 4. 18 Hasil pengujian beban 1

Uji Triaksial 01		
Axial Stress	σ_1	3.4028
Cell Presure	σ_3	1.0000
R	$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$	1.2014
σ_{avg}	$(\sigma_1 + \sigma_3)/2$	2.2014

Tabel 4. 19 Hasil pengujian sampel 2

ΔH mm	Strain (%)	coreted area	Prov ring	Cell pressure	beban	Deviator load	Deviator setrss	σ_1
0	0.0000	9.2085	0	2	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000
0.5	0.0072	9.2750	1	2	2.4600	6.0516	0.6525	2.6525
1	0.0143	9.3424	2	2	4.9200	12.1032	1.2955	3.2955
1.5	0.0215	9.4107	2	2	4.9200	12.1032	1.2861	3.2861
2	0.0286	9.4801	3	2	7.3800	18.1548	1.9150	3.9150
2.5	0.0358	9.5506	3	2	7.3800	18.1548	1.9009	3.9009
3	0.0430	9.6220	4	2	9.8400	24.2064	2.5157	4.5157
3.5	0.0501	9.6946	4	2	9.8400	24.2064	2.4969	4.4969
4	0.0573	9.7682	4	2	9.8400	24.2064	2.4781	4.4781
4.5	0.0645	9.8430	5	2	12.3000	30.2580	3.0741	5.0741
5	0.0716	9.9190	5	2	12.3000	30.2580	3.0505	5.0505
5.5	0.0788	9.9961	5	2	12.3000	30.2580	3.0270	5.0270
6	0.0859	10.0744	5	2	12.3000	30.2580	3.0035	5.0035
6.5	0.0931	10.1540	5	2	12.3000	30.2580	2.9799	4.9799
7	0.1003	10.2348	5	2	12.3000	30.2580	2.9564	4.9564
7.5	0.1074	10.3169	5	2	12.3000	30.2580	2.9328	4.9328
8	0.1146	10.4004	4	2	9.8400	24.2064	2.3275	4.3275
8.5	0.1218	10.4852	4	2	9.8400	24.2064	2.3086	4.3086

(Sumber : Penelitian, 2025)

Tabel 4. 20 Hasil pengujian sampel 2

Uji Triaxial 02		
Axial Stress	σ_1	5.0741
Cell Presure	σ_3	2.0000
R	$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$	1.5370
σ_{avg}	$(\sigma_1 + \sigma_3)/2$	3.5370

(Sumber : Penelitian, 2025)

Tabel 4. 21 Hasil pengujian sampel 3

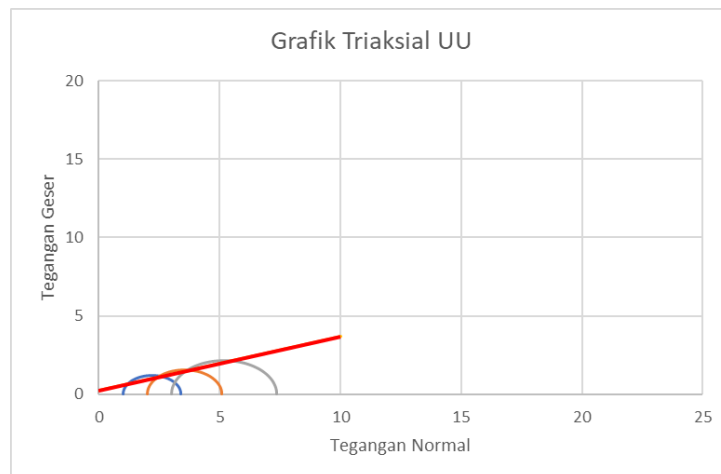
ΔH mm	Strain (%)	coreted area	Prov ring	Cell pressure	beban	Deviator load	Deviator setrss	σ_1
0	0.0000	9.2085	0	3	0.0000	0.0000	0.0000	3.0000
0.5	0.0072	9.2750	1	3	2.4600	6.0516	0.6525	3.6525
1	0.0143	9.3424	3	3	7.3800	18.1548	1.9433	4.9433
1.5	0.0215	9.4107	4	3	9.8400	24.2064	2.5722	5.5722
2	0.0286	9.4801	4	3	9.8400	24.2064	2.5534	5.5534
2.5	0.0358	9.5506	5	3	12.3000	30.2580	3.1682	6.1682
3	0.0430	9.6220	6	3	14.7600	36.3096	3.7736	6.7736
3.5	0.0501	9.6946	7	3	17.2200	42.3612	4.3696	7.3696
4	0.0573	9.7682	7	3	17.2200	42.3612	4.3366	7.3366
4.5	0.0645	9.8430	7	3	17.2200	42.3612	4.3037	7.3037
5	0.0716	9.9190	7	3	17.2200	42.3612	4.2707	7.2707
5.5	0.0788	9.9961	6	3	14.7600	36.3096	3.6324	6.6324
6	0.0859	10.0744	6	3	14.7600	36.3096	3.6041	6.6041
6.5	0.0931	10.1540	5	3	12.3000	30.2580	2.9799	5.9799
7	0.1003	10.2348	5	3	12.3000	30.2580	2.9564	5.9564

(Sumber : Penelitian, 2025)

Tabel 4. 22 Hasil pengujian sampel 3

Uji Triaxial 03		
Axial Stress	σ_1	7.3696
Cell Presure	σ_3	3.0000
R	$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$	2.1848
σ_{avg}	$(\sigma_1 + \sigma_3)/2$	5.1848

(Sumber : Penelitian, 2025)



Gambar 4. 11 Grafik Triaksial UU

(Sumber : Penelitian, 2025)

Tabel 4. 23 Hasil pengujian Triaksial UU

Hasil Pengujian		
c	24,52	kPa
ϕ	19	°

(Sumber : Penelitian, 2025)

Jadi hasil pengujian Triaksial UU ini mendapatkan nilai parameter kohesi atau nilai c sebesar 24,52 kPa, kemudian untuk nilai sudut gesek dalam kita mendapatkan nilai 19°. Nilai ini termasuk wajar untuk tanah lempung jenuh, terutama dengan klasifikasi CH (*High Plasticity Clay*). Das (2010) Uji triaxial UU digunakan untuk lempung jenuh dalam kondisi cepat (*short-term stability*). Biasanya $\phi = 0$, dan kekuatan geser hanya dari kohesi.

4.2.4 Konsolidasi Konvensional (*Oedometer*)

Konsolidasi konvensional (*Oedometer*) adalah metode laboratorium yang digunakan untuk mengukur perubahan volume tanah akibat beban yang diberikan secara vertikal dalam kondisi terdrainase satu arah. Dalam studi laboratorium terhadap tanah ekspansif, pengujian Oedometer memiliki peran penting dalam memahami perilaku pemampatan tanah serta dampaknya terhadap

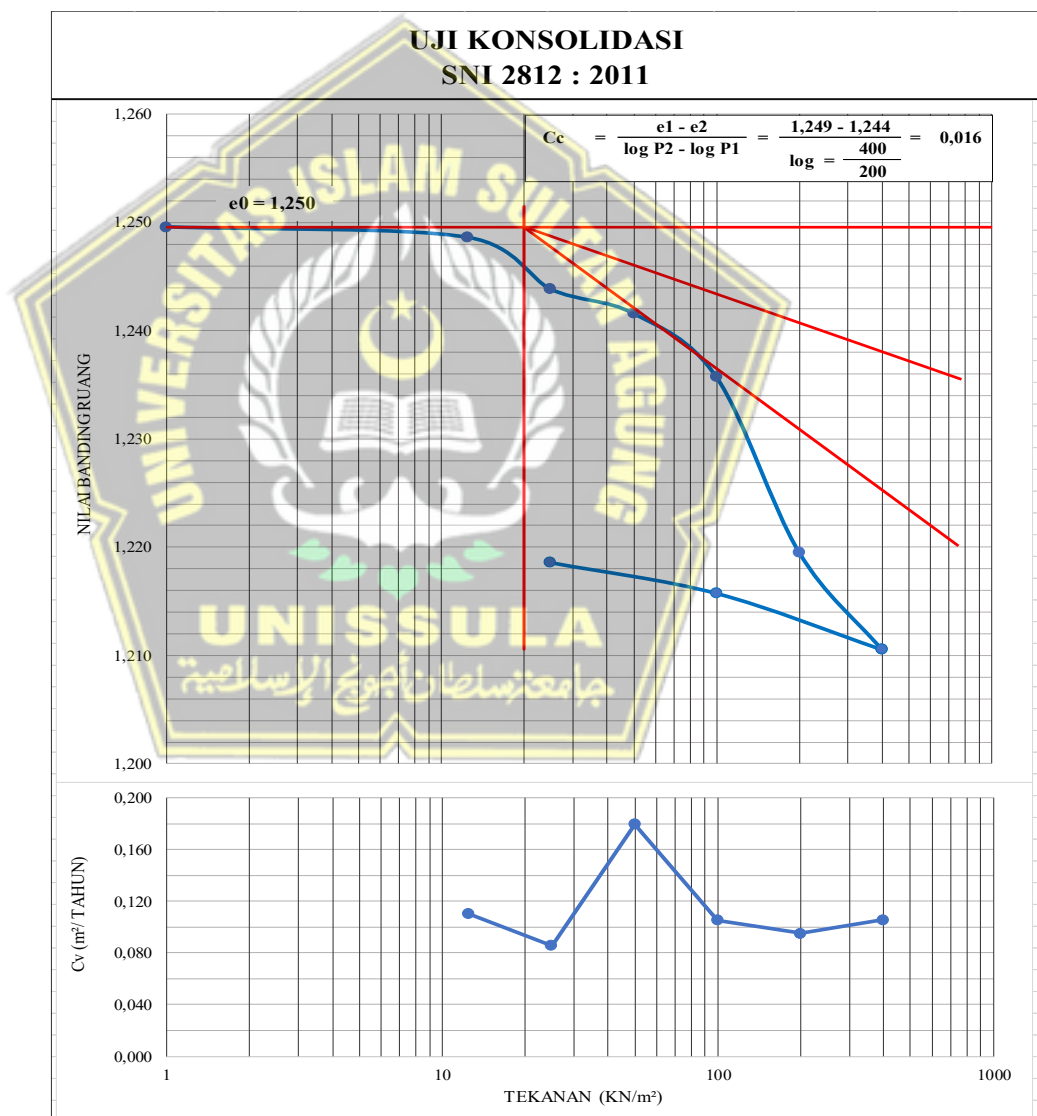
stabilitas infrastruktur. Tanah ekspansif cenderung mengalami perubahan volume yang signifikan akibat perubahan kadar air, sehingga analisis konsolidasi menjadi krusial untuk menentukan strategi perbaikan tanah yang efektif.

Tabel 4.24 Konsolidasi Konvensional (*Oedometer*)

KONSOLIDOMETER SNI 2812 : 2011																													
Lokasi : Lab Teknik Universitas Bojonegoro										Tgl mulai: 10/12/2024		Tek. Pelembutan (kN/m ²)		Diam : Tinggi :		No. Sd. 1 No. Condit :		No. Lokasi : No. Condit :		Unloading									
Peningkatan dan Penurunan Beban :		1		2		3		4		5		6		7		8													
No	Beban p (kN/m ²)	0,25 kg		0,5 kg		1 kg		2 kg		4 kg		8 kg		2 kg		0,5 kg													
		Waktu Ukur (10 ⁻³)	ΔH (10 ⁻³) mm	Waktu Ukur (10 ⁻³)	ΔH (10 ⁻³) mm	Waktu Ukur (10 ⁻³)	ΔH (10 ⁻³) mm	Waktu Ukur (10 ⁻³)	ΔH (10 ⁻³) mm	Waktu Ukur (10 ⁻³)	ΔH (10 ⁻³) mm	Waktu Ukur (10 ⁻³)	ΔH (10 ⁻³) mm	Waktu Ukur (10 ⁻³)	ΔH (10 ⁻³) mm	Waktu Ukur (10 ⁻³)	ΔH (10 ⁻³) mm	Waktu Ukur (10 ⁻³)	ΔH (10 ⁻³) mm	Waktu Ukur (10 ⁻³)	ΔH (10 ⁻³) mm								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	0,10	0,32	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
10	0,17	0,41	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
15	0,25	0,50	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	
30	0,50	0,71	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
1	1,00	1,00	8,31	2,1	8,31	14,5	8,31	31,5	8,31	47,5	8,31	63,5	8,31	79,5	8,31	95,5	8,31	111,5	8,31	127,5	8,31	143,5	8,31	159,5	8,31	175,5	8,31	191,5	
2	2,00	1,41	8,32	2,2	8,32	15,5	8,32	32	8,32	48	8,32	64	8,32	80	8,32	96	8,32	112	8,32	128	8,32	144	8,32	160	8,32	176	8,32	192	
4	4,00	2,00	8,34	2,4	8,34	17	8,34	33	8,34	51,5	8,34	67,5	8,34	83,5	8,34	99,5	8,34	115,5	8,34	131,5	8,34	147,5	8,34	163,5	8,34	179,5	8,34	195,5	
8	8,00	2,83	8,38	2,5	8,38	19	8,38	33,5	8,38	54	8,38	68	8,38	82	8,38	96	8,38	110	8,38	124	8,38	138	8,38	152	8,38	166	8,38	180	
15	15,00	3,87	8,45	2,6	8,45	21	8,45	34	8,45	57	8,45	71	8,45	85	8,45	99	8,45	113	8,45	127	8,45	141	8,45	155	8,45	169	8,45	183	
30	30,00	5,48	9,00	2,8	9,00	23	9,00	35	9,00	61	9,00	73	9,00	85	9,00	97	9,00	109	9,00	121	9,00	133	9,00	145	9,00	157	9,00	169	
1	60,00	7,75	9,30	3	9,30	25,5	9,30	36	9,30	64	9,30	76	9,30	88	9,30	100	9,30	112	9,30	124	9,30	136	9,30	148	9,30	160	9,30	172	
2	120,00	10,95	10,30	3,5	10,30	26	10,30	38,5	10,30	67	10,30	79	10,30	91	10,30	103	10,30	115	10,30	127	10,30	139	10,30	151	10,30	163	10,30	175	
4	240,00	11,92	13,30	3,8	13,30	26,5	13,30	39	13,30	68	13,30	80	13,30	92	13,30	104	13,30	116	13,30	128	13,30	140	13,30	152	13,30	164	13,30	176	
8	480,00	16,82	16,30	4,5	16,30	27	16,30	40	16,30	69	16,30	81	16,30	93	16,30	105	16,30	117	16,30	129	16,30	141	16,30	153	16,30	165	16,30	177	
24	1440,00	37,95	8,30	5	8,30	29,5	8,30	41	8,30	71	8,30	83	8,30	95	8,30	107	8,30	119	8,30	131	8,30	143	8,30	155	8,30	167	8,30	179	
Jumlah Penurunan bersih ΔH(mm)		0,005		0,005		0,0295		0,0295		0,041		0,041		0,071		0,071		0,151		0,151		0,231		0,231		0,311		0,311	
Angka Per		e ₀ - Δe		e ₀ - Δe		e ₀ - Δe		e ₀ - Δe		e ₀ - Δe		e ₀ - Δe		e ₀ - Δe		e ₀ - Δe		e ₀ - Δe		e ₀ - Δe		e ₀ - Δe		e ₀ - Δe		e ₀ - Δe		e ₀ - Δe	
Penurunan ΔH(mm)		F=0,1951		F=0,1951		F=0,1951		F=0,1951		F=0,1951		F=0,1951		F=0,1951		F=0,1951		F=0,1951		F=0,1951		F=0,1951		F=0,1951		F=0,1951		F=0,1951	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
1	12,5	0,005	0,000	1,249	0,000	12,5	2,249	0,0347	0,0347	2,7	2,7	20,095	11,53	132,9400	0,1102	0,1102	0,1102	0,1102	0,1102	0,1102	0,1102	0,1102	0,1102	0,1102	0,1102	0,1102	0,1102	0,1102	
2	25	0,010	0,008	1,244	0,008	12,5	2,244	0,0347	0,0347	3,5	3,5	20,071	11,52	132,6008	0,0854	0,0854	0,0854	0,0854	0,0854	0,0854	0,0854	0,0854	0,0854	0,0854	0,0854	0,0854	0,0854	0,0854	
3	50	0,041	0,000	1,242	0,002	25	2,242	0,0400	0,0400	1,7	1,7	20,059	11,49	132,1298	0,1792	0,1792	0,1792	0,1792	0,1792	0,1792	0,1792	0,1792	0,1792	0,1792	0,1792	0,1792	0,1792	0,1792	
4	100	0,071	0,019	1,236	0,009	50	2,236	0,0524	0,0524	2,8	2,8	20,029	11,46	131,3441	0,1016	0,1016	0,1016	0,1016	0,1016	0,1016	0,1016	0,1016	0,1016	0,1016	0,1016	0,1016	0,1016	0,1016	
5	200	0,154	0,030	1,220	0,016	100	2,220	0,0730	0,0730	3,1	3,1	19,946	11,38	129,5562	0,0912	0,0912	0,0912	0,0912	0,0912	0,0912	0,0912	0,0912	0,0912	0,0912	0,0912	0,0912	0,0912	0,0912	
6	400	0,300	0,039	1,211	0,030	200	2,211	0,1023	0,1023	2,8	2,8	19,900	11,28	127,2897	0,1060	0,1060	0,1060	0,1060	0,1060	0,1060	0,1060	0,1060	0,1060	0,1060	0,1060	0,1060	0,1060	0,1060	
7	100	0,174	0,039	1,216	-0,0052	-200	2,216	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	25	0,159	0,030	1,219	-0,0038	-25	2,219	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Grafik konsolidasi oedometer menunjukkan hubungan antara tekanan dan penurunan suatu sampel tanah saat mengalami proses konsolidasi. Grafik ini menggambarkan perubahan volume tanah yang terjadi akibat penurunan kadar air saat diberikan beban, dengan waktu konsolidasi yang biasanya terukur di sumbu horizontal dan perubahan penurunan (*settlement*) di sumbu vertikal. Proses ini memberikan informasi mengenai daya dukung tanah dan laju konsolidasi, yang sangat penting untuk analisis stabilitas dan perencanaan konstruksi di atas tanah tersebut.

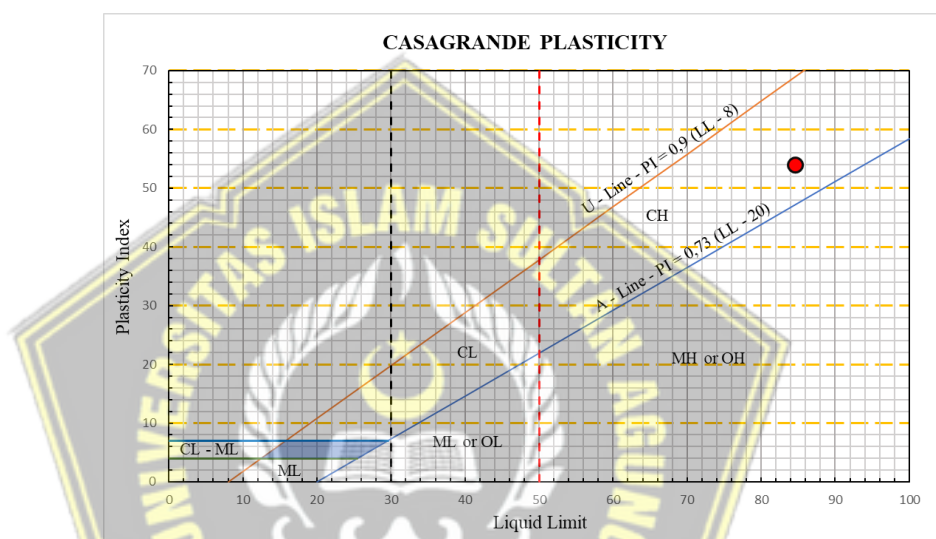


Gambar 4. 12 Grafik *Oedometer Test*

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

4.3 Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah adalah pengelompokan berbagai jenis tanah ke dalam kelompok yang sesuai dengan karakteristiknya. Klasifikasi USCS (Unified Soil Classification System) adalah sistem yang digunakan untuk mengelompokkan jenis tanah berdasarkan karakteristik butiran dan sifat plastisitasnya. Sifat plastisitas di peroleh dari pengujian *Atterberg limit*, dari hasil pengujian diketahui nilai *Liquid limit* sebesar 84,60 % dan *Plastic Indeks* sebesar 53,92 %.



Gambar 4. 13 Grafik Casagrande Plasticity

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Tanah ekspansif yang ada di Universitas Bojonegoro tersebut termasuk dalam kategori lempung Inorganik dengan plastisitas tinggi atau Lempung gemuk (*Flat Clay*) dan masuk dalam kategori CH.

Tabel 4.25 Klasifikasi USCS

LL	PL	PI	SL	CATATAN
				Contoh dalam keadaan dan klasifikasi (USCS)
				Asli
84.60	30.68	53.92	21.57	- Disaring atau tidak
				- Soil Type (Cassagrande) CH
				(Lempung Inorganik dengan Plastisitas Tinggi, Lempung Gemuk/ Flat Clay)

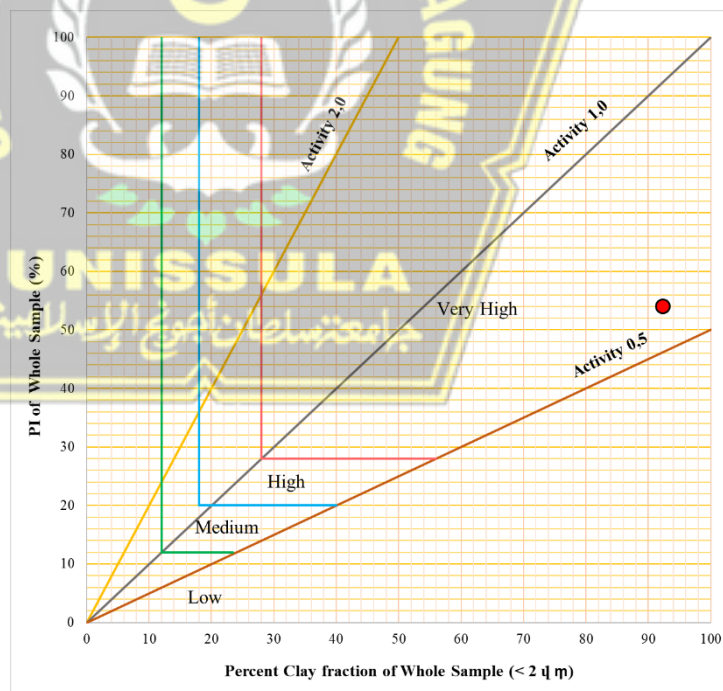
(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

4.4 Klasifikasi Potensi Pengembangan dan Aktifitas Tanah

Klasifikasi tanah adalah pengelompokan berbagai jenis tanah ke dalam kelompok yang sesuai dengan karakteristiknya. klasifikasi potensi pengembangan dan aktivitas tanah berkaitan dengan karakteristik fisik dan mekanik tanah yang mempengaruhi kemampuan tanah untuk mendukung struktur atau pembangunan. Geoteknik mengkaji sifat-sifat tanah yang berkaitan dengan stabilitas, daya dukung, dan kemampuannya untuk menahan beban.

4.4.1 Teori Van De Merve

Teori Van De Merve merupakan pendekatan yang digunakan untuk memperkirakan potensi pengembangan tanah ekspansif berdasarkan Fraksi lempung dan indeks plastisitas tanah. Nilai Fraksi lempung (*Clay*) sebesar 92,45% dan Indeks Plastisitas (PI) sebesar 53,92%. Jadi potensi pengembangan tanah ekspansif tersebut yaitu sangat tinggi.



Gambar 4. 14 Grafik Potensi Pengembangan

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

4.4.2 Teori Seed At al

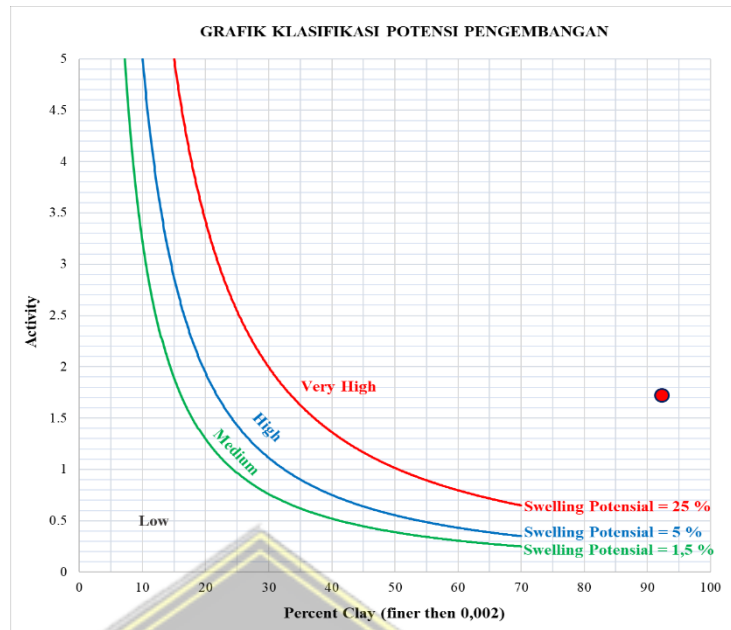
Teori (Seed et al., 1962) berkaitan dengan perilaku tanah ekspansif, khususnya dalam konteks konsolidasi dan pemadatan tanah lempung. Menurut (Seed et al., 1962), tanah ekspansif memiliki potensi mengembang dan menyusut yang signifikan akibat perubahan kadar air, yang dapat menyebabkan kerusakan struktural pada bangunan di atasnya. Teori ini menekankan pentingnya memahami sifat mekanis tanah, seperti tekanan pengembangan dan perubahan volume akibat siklus basah-kering, untuk merancang solusi perbaikan tanah yang efektif. Dalam studi laboratorium, pendekatan ini sering digunakan untuk menganalisis pengaruh teknik perbaikan seperti *Vertical Sand Drain* dalam mempercepat waktu konsolidasi dan mengurangi dampak ekspansi tanah.

Tabel 4. 26 Klasifikasi Potensi pengembangan dan Tingkat Keaktifan

Indeks Plastis (%)	Fraksi Lempung (%)	Nilai Tingkat Keaktifan	Potensi Pengembangan
53.92	92.445	1.71	Sangat Tinggi

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Indeks plastisitas tanah sebesar 53,92%, menunjukkan bahwa tanah memiliki sifat plastis yang sangat tinggi. Fraksi lempung yang mencapai 94,93% mengindikasikan bahwa sebagian besar komposisi tanah terdiri dari partikel lempung yang sangat halus dan memiliki kemampuan menyerap air yang tinggi. Nilai tingkat keaktifan tanah sebesar 1,71, yang termasuk dalam kategori sangat tinggi, menunjukkan bahwa tanah ini sangat responsif terhadap perubahan kadar air. Dengan tingkat keaktifan yang tinggi, potensi pengembangan tanah juga dikategorikan sebagai sangat tinggi, yang berarti tanah ini rentan terhadap perubahan volume akibat perubahan kadar air, sehingga berisiko mengalami penyusutan dan pengembangan yang signifikan.



Gambar 4. 15 Klasifikasi Potensi Pengembangan dan Tingkat Keaktifan
(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

4.5 Tekanan Pengembangan

Tekanan pengembangan merupakan salah satu karakteristik utama tanah ekspansif yang terjadi akibat perubahan kadar air dalam tanah. Tanah ekspansif memiliki mineral lempung seperti montmorillonit yang menyebabkan perubahan volume signifikan saat mengalami pembasahan dan pengeringan. Ketika tanah menyerap air, partikel lempung mengalami peningkatan gaya elektrostatis, sehingga menimbulkan gaya dorong yang menghasilkan tekanan pengembangan. Tekanan ini dapat berdampak pada struktur di atasnya, seperti jalan, pondasi, dan bangunan, yang dapat mengalami retakan atau pergeseran akibat gaya ekspansif yang terjadi. Oleh karena itu, memahami tekanan pengembangan tanah sangat penting dalam perencanaan dan desain teknik sipil untuk menghindari kerusakan struktural.

Dalam konteks penelitian ini, pengujian tekanan pengembangan dilakukan melalui uji laboratorium untuk mengetahui sejauh mana tanah ekspansif merespon perubahan kadar air. Metode yang digunakan untuk

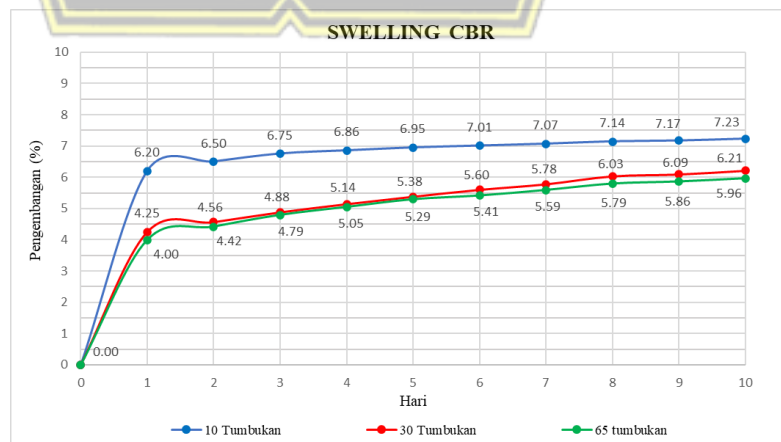
mengetahui tekanan pengembangan yaitu dengan pengujian CBR Rendaman (*Soaked*). Hasil dari pengujian bisa dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.27 Swelling CBR

SWELLING CBR (SOAKED)											
10 Tumbukan											
Hari	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tanggal	6/30/2025	7/1/2025	7/2/2025	7/3/2025	7/4/2025	7/5/2025	7/6/2025	7/7/2025	7/8/2025	7/9/2025	7/10/2025
Jam	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Tinggi Awal, mm	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4
Pembacaan, dev	0	731	766	796	808	819	826	833	842	845	852
Perubahan, dev	0	731	35	30	12	11	7	7	9	3	7
Pengembangan, %	0.00	6.20	6.50	6.75	6.86	6.95	7.01	7.07	7.14	7.17	7.23
30 Tumbukan											
Hari	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tanggal	6/30/2025	7/1/2025	7/2/2025	7/3/2025	7/4/2025	7/5/2025	7/6/2025	7/7/2025	7/8/2025	7/9/2025	7/10/2025
Jam	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Tinggi Awal, mm	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4
Pembacaan, dev	0	501	538	575	606	634	660	681	711	718	732
Perubahan, dev	0	501	37	37	31	28	26	21	30	7	14
Pengembangan %	0.00	4.25	4.56	4.88	5.14	5.38	5.60	5.78	6.03	6.09	6.21
65 Tumbukan											
Hari	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tanggal	6/30/2025	7/1/2025	7/2/2025	7/3/2025	7/4/2025	7/5/2025	7/6/2025	7/7/2025	7/8/2025	7/9/2025	7/10/2025
Jam	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Tinggi Awal, mm	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4	11786.4
Pembacaan, dev	0	471	521	565	595	624	638	659	683	691	703
Perubahan, dev	0	471	50	44	30	29	14	21	24	8	12
Pengembangan %	0.00	4.00	4.42	4.79	5.05	5.29	5.41	5.59	5.79	5.86	5.96

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Grafik berikut menunjukkan hubungan antara waktu perendaman dan persentase pengembangan (*swelling*) dalam uji *California Bearing Ratio* (CBR). Terlihat bahwa tingkat pengembangan tanah meningkat seiring waktu perendaman yaitu 10 hari. Secara umum, semakin banyak tumbukan, semakin kecil pengembangan yang terjadi. Pengembangan tanah dengan 10 tumbukan mencapai 7,23% pada hari ke-10, dengan 30 tumbukan mencapai 6,21%, dan 65 tumbukan mencapai 5,96%.



Gambar 4. 16 Swelling CBR Soaked

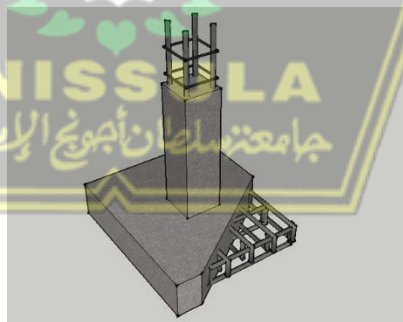
(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

4.6 Pondasi Dangkal

Pondasi merupakan bagian dari struktur bangunan yang berfungsi untuk menyalurkan beban dari atas struktur ke lapisan tanah yang berada di bawahnya. Pondasi harus mampu mendukung beban secara aman dan stabil tanpa menyebabkan kerusakan pada struktur atas maupun tanah pendukungnya. Berdasarkan kedalamannya, pondasi dapat dibagi menjadi dua jenis utama, yaitu pondasi dangkal dan pondasi dalam.

Pondasi dangkal adalah jenis pondasi yang ditempatkan dekat dengan permukaan tanah, umumnya pada kedalaman kurang dari 3 meter. Pondasi ini digunakan ketika tanah di permukaan atau dekat permukaan memiliki daya dukung yang cukup untuk menahan beban struktur. Keunggulan pondasi dangkal antara lain lebih ekonomis, pelaksanaan konstruksi yang lebih sederhana, serta waktu pengerjaan yang relatif singkat.

Salah satu tipe pondasi dangkal yang paling umum adalah pondasi telapak (isolated footing), yaitu pondasi yang digunakan untuk mendukung beban dari kolom tunggal. Pondasi telapak dirancang untuk mendistribusikan beban vertikal dari kolom ke tanah di bawahnya, sehingga menghindari terjadinya penurunan yang berlebihan atau tidak merata.



Gambar 4. 17 Pondasi Telapak

(Sumber : rhdesainrumah.com, 2025)

Dalam kondisi tanah normal yang stabil, beban dari pondasi telapak didistribusikan ke tanah dengan sudut tertentu, yang secara teoritis sering diasumsikan sebagai 2V:1H (dua vertikal : satu horizontal). Artinya, untuk setiap 2 satuan kedalaman, penyebaran beban melebar 1 satuan secara horizontal. Namun, pada tanah bermasalah seperti tanah ekspansif, pola

penyebaran ini bisa berubah karena sifat tanah yang dapat mengembang saat basah dan menyusut saat kering.

Penelitian ini memfokuskan pada pemodelan pondasi telapak di atas tanah ekspansif, di mana pengaruh dari proses pembebanan (loading) dan pelepasan beban (unloading) diamati untuk melihat respon vertikal tanah, dalam bentuk penurunan (settlement) saat dibebani dan pengembangan kembali (rebound) saat beban dilepaskan. Karakteristik ini penting untuk dipahami dalam konteks perencanaan pondasi dangkal di wilayah yang memiliki tanah ekspansif, karena dapat mempengaruhi kestabilan bangunan dan menyebabkan kerusakan struktural jika tidak diperhitungkan dengan baik.

Dengan menggunakan model pondasi telapak skala laboratorium, penelitian ini juga mengamati pola penyebaran tegangan di bawah pondasi, untuk dianalisis apakah sesuai dengan teori penyebaran beban klasik (2V:1H) atau menunjukkan distribusi yang lebih tajam atau menyebar, sebagaimana yang ditemukan dalam penelitian sebelumnya.

4.6.1 Model Pondasi Skala Laboratorium



Gambar 4. 18 Box Uji

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental berbasis laboratorium untuk mensimulasikan perilaku pondasi dangkal pada tanah ekspansif. Pemodelan dilakukan dalam skala terbatas (model skala) dengan memperhatikan rasio geometri dan kondisi pembebanan yang

disesuaikan, guna mendapatkan representasi yang dapat dianalisis secara teknis. Pengujian dilakukan dalam box uji berbentuk kubus berdimensi $100\text{ cm} \times 100\text{ cm} \times 100\text{ cm}$, terbuat dari rangka baja dan diperkuat pada setiap sisi untuk menghindari deformasi lateral selama proses pembebanan. Ukuran ini dipilih untuk meminimalisasi efek batas, sehingga penyebaran tegangan dari pondasi tidak terhambat oleh dinding wadah.



Gambar 4. 19 Model Pondasi Dangkal
(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Model pondasi yang digunakan berupa pondasi telapak persegi dengan dimensi $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, dibuat dari bahan beton bertulang untuk memberikan beban mati awal. Dimensi pondasi dipilih agar representatif terhadap skala pembebanan yang akan diberikan, serta memiliki rasio luas pondasi terhadap luas box yang masih dalam batas aman untuk menghindari interaksi tegangan dengan dinding box.

Tepat di bawah pondasi, ditempatkan tanah ekspansif berwarna dengan ukuran $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$, yang berfungsi sebagai zona analisis utama. Tanah ini disiapkan secara terkontrol dari segi kadar air, kepadatan, dan komposisi, guna memungkinkan pengamatan deformasi vertikal serta distribusi tegangan secara lebih terfokus. Lapisan ini dilapisi dengan tanah berwarna agar distribusi tegangan nanti bisa dianalisis dengan jelas.



Gambar 4. 20 Tanah warna di bawah model pondasi

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

4.7 Distribusi Tegangan Permodelan Box Uji



Gambar 4. 21 Persiapan Box Penelitian dan Sampel Uji

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Pembebanan yang dilakukan pada penelitian ini adalah jenis pembebanan statik yaitu metode pemberian beban vertikal secara perlahan, bertahap serta konstan pada model pondasi, dengan tujuan untuk mempelajari respon tanah terhadap beban yang meningkat secara perlahan. Beban ini di berikan secara lurus dari atas (beban sentris) agar menghasilkan distribusi tegangan yang merata di bawah pondasi. Secara sederhana, pembebanan ini meniru kondisi aktual beban struktur pada pondasi yang bekerja secara tetap dan perlahan meningkat, seperti beban berat bangunan yang bersifat tidak dinamis.

Analisis penurunan metode penyebaran $2V : 1H$ merupakan metode pendekatan yang sangat sederhana untk menghitung penyebaran tegangan akibat beban yang di berikan oleh Boussineq. Hasil dari pelaksanaan pengujian pembebanan (loading) dan pengangkatan beban (unloading),

menghasilkan data hasil penurunan dan kenaikan akibat beban terbagi rata. Pada beban 8 kg pondasi mengalami penurunan 5,24 mm, kemudian pada beban 16 kg pondasi mengalami penurunan sebesar 17,29 mm, pada beban 32 kg pondasi mengalami penurunan 40,14 mm, dan pada beban 64 kg pondasi mengalami penurunan sebesar 83,18 mm dan pada beban 90 kg pondasi sudah tidak dapat menahan beban (collapse) dengan penurunan sebesar 103,36 mm dengan waktu 15 menit setiap pergantian beban. Kemudian dilakukan pengangkatan beban secara bertahap hingga beban menjadi nol atau pondasi dalam keadaan awal dan di dapatkan nilai pengembangan (unloading) sebesar 6,05 mm dengan catatan waktu pengangkatan sama dengan waktu pembebanan yaitu 15 menit setiap pembebanan. Data loading dengan penurunan dan data unloading ditampilkan pada Tabel 4.28 berikut.

Tabel 4. 28 Data loading dan unloading dalam bok

No	Beban (Kg)	Penurunan (-mm)	Komulatif Penurunan (-mm)	Unloading (-mm)	Komulatif Unloading (-mm)
1.	0,00	0,00	0,00	1,20	97,31
2.	8	5,24	5,24	1,40	98,51
3.	16	12,05	17,29	1,29	99,91
4.	32	22,85	40,14	1,36	101,20
5.	64	43,04	83,18	0,80	102,56
6.	90	20,18	103,36	0,00	103,36

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)



Gambar 4. 22 Proses Pembebanan

(Sumber : Hasil Penelitian, 2025)

Berdasarkan data di atas dapat diketahui bahwa pembebanan berhenti pada beban 90 kg dengan hasil penurunan sebesar 103,36 mm atau 10,3 cm. kemudian untuk pengangkatan beban atau unloading menunjukkan kenaikan sebesar 6,05 mm atau 0,605 cm.



Gambar 4. 24 Hasil Pengujian distribusi beban

(Sumber : Penelitian, 2025)

Distribusi tegangan dilakukan pengamatan setelah pengujian pembebanan selesai, dengan cara pemotongan tanah yang ada di dalam bok uji atau dengan menggali disekitar tanah uji sedalam 30 cm.



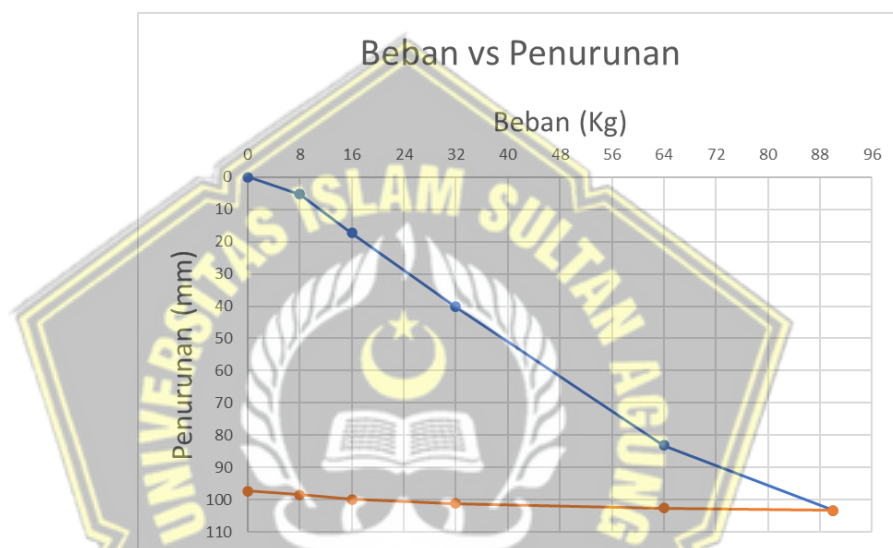
Gambar 4. 23 Hasil pengujian ditribusi beban

(Sumber : Penelitian, 2025)

Dari hasil pengamatan di dapat bahwa tanah ketika diberi tekanan atau pembebanan tanah akan mengalami penyebaran beban secara vertikal dan horizontal. Pada penelitian ini dikedalaman 6 cm terdapat penyebaran secara horizontal sebesar 3 cm, maka perbandingan distribusi beban yang terjadi 6V : 3H, jika di sederhanakan menjadi 2V : 1H.

4.7.1 Hubungan Beban dengan Penurunan

Hasil Pengujian di tampilkan dalam bentuk grafik hubungan antara beban dan penurunan, dapat dilihat pada Gambar 4.25



Gambar 4. 25 Grafik hubungan beban vs penurunan

(Sumber : Hasil penelitian, 2025)

Dari grafik di atas dapat dilihat pada pembebanan 8 kg penurunan sebesar 5,24 mm, kemudian pada beban 16 kg nilai penurunan sebesar 17,29 mm, dan pada beban 32 kg nilai penurunan sebesar 40,14 mm, selanjutnya pada beban 64 kg didapat nilai penurunan sebesar 83,18 mm, serta pada pembebanan 90 kg tanah sudah tidak mampu menahan beban dan mengalami penurunan sebesar 103,36 mm

4.7.2 Hubungan Waktu dengan Penurunan

Hasil Pengujian di tampilkan dalam bentuk grafik hubungan antara waktu dan penurunan, dapat dilihat pada Gambar 4.26.



Gambar 4. 26 Grafik hubungan waktu vs penurunan

(Sumber : Hasil penelitian, 2025)

Untuk waktu 15 menit pertama di dapat penurunan sebesar 5,24 mm, 30 menit didapat penurunan 17,29 mm, kemudian 45 menit didapat penurunan sebesar 40,14 mm, dan 60 menit terjadi penurunan 83,18 mm kemudian pada 75 menit pembebanan di dapat penurunan sebesar 103,36 mm. Hal ini menandakan semakin lama waktu pembebanan semakin besar penurunan diiringi dengan besarnya beban yang digunakan.

4.7.3 Perbandingan Dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu (Widoanindyawati et al. 2021) Penelitian itu bertujuan untuk mengetahui distribusi tegangan pada tanah lunak jenuh akibat beban merata lajur. Metode penelitian dilakukan dengan membuat model uji berupa kotak yang diisi tanah lempung lunak. Tanah yang berada dalam kotak pengujian dijaga kejenuhannya dengan memberikan air secara berkelanjutan. Tanah di bawah luasan pondasi sedalam dua kali lebar pondasi (2B) dibuat berwarna. Pondasi dengan ukuran 10 cm x 50 cm dibuat dengan rangkaian pralon diameter 16 mm (5/8”), kemudian disusun tiga lapis. Pembebanan

pondasi diberikan secara bertahap yaitu 23,22 kg, 64,04 kg, 89,60 kg, 118,78 kg, 134,78 kilogram, dan dilakukan pencatatan beban dan penurunan yang terjadi. Ketika dibebani, tanah yang berwarna di bawah pondasi akan memendek dan melebar sesuai dengan beban yang didistribusikan. Tanah dipotong untuk mengetahui bentuk distribusi bebannya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa distribusi beban dengan pondasi persegi lajur adalah 2,25 Vertikal : 1 Horizontal (2,25 V : 1 H). Hal ini berarti bahwa distribusi tegangan pada tanah di bawah pondasi lajur membentuk sudut penyebaran sekitar $26,57^\circ$, lebih besar dibandingkan dengan distribusi klasik 2V : 1H yang membentuk sudut 45° .

Sementara itu pada penelitian ini peneliti mencoba pada pondasi telapak dengan dimensi 20 cm x 20 cm x 10 cm dengan ukuran tanah warna dibagian dasar pondasi 20 x 20 x 20 cm, dan beban sebesar 8 kg, 16 kg, 32 kg, 64 kg dan terakhir beban 90 kg dengan waktu pembebanan masih masing beban selama 15 menit begitu juga dengan Proses pengangkatan (*Unloading*). Hasil Penelitian ini didapat nilai penurunan sebesar 103,36 mm dengan beban 90 kg selama 75 menit, dengan mengalami kenaikan (*unloading*) sebesar 6,05 mm. Dengan hasil distribusi beban yang terjadi adalah 6V : 3H, Jika disederhanakan menjadi 2V : 1H. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa distribusi tegangan pada pondasi telapak yang di uji mengikuti pola penyebarab 2V : 1H, yang berbeda dengan hasil penelitian pada pondasi lajur (Widoanindyawati et al. 2021). Hal ini mengindikasikan bahwa jenis pondasi, dimensi, dan juga jenis tanah dapat menunjukkan karakteristik penyebaran tegangan yang berbeda. Temuan ini memperkuat pemahaman bahwa pola 2V:1H yang digunakan acuan perencanaan dan analisis pondasi pada tanah dan jenis pondasi yang berbeda harus dilakukan kajian lebih mendalam untuk setiap jenis tanah dan jenis pondasi.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai kajina pondasi dangkal pada tanah ekspansif, dapat disimpulkan bahwa :

1. Tanah ekspansif di wilayah Bojonegoro dikategorikan sebagai CH / *High Plasticity* dengan klasifikasi USCS, yang memiliki plastisitas tinggi (Liquid Limit 84,60% dan Plastic Index 53,92%). Persentase mengembang yang diperoleh dari *Free Swelling* berkisar 150% nilai ini menandakan bahwa tanah memiliki sifat ekspansif yang tinggi dengan mengembang hingga 1,5 kali volume awal saat menyerap air tanpa penahan dan nilai keaktifan yang diperoleh dari hasil analisis berkisar 1,7%. Potensi pengembangan dan aktifitas tanah sangat tinggi, dengan fraksi lempung sebesar 92,45%. Selain itu, tanah ini sangat rentan terhadap perubahan kadar air, yang dapat menyebabkan pengembangan dan penyusutan signifikan.
2. Tekanan pengembangan tanah dipengaruhi oleh karakteristik plastisitas dan kadar airnya. Tekanan pengembangan yang dianalisis menggunakan metode pengujian CBR soaked, sedangkan penurunan yang dianalisis menggunakan metode pengujian pembebanan dalam Box uji. Nilai pengembangan dari uji CBR Soaked menunjukkan bahwa tanah ekspansif mengalami peningkatan pengembangan seiring waktu perendaman. Semakin banyak jumlah tumbukan, semakin kecil pengembangan yang terjadi. Pada 10 tumbukan, pengembangan mencapai 7,23% pada hari ke-10, sementara 30 tumbukan 6,21%, dan 65 tumbukan 5,96%. Hal ini mengindikasikan bahwa jumlah tumbukan berpengaruh dalam mengurangi pengembangan tanah. Nilai pengembangan tanah dari hasil uji CBR adalah berkisar 1-2%. Kemudian pada pengujian pembebanan dalam box mengindikasikan bahwa pada tanah ekspansif jenuh nilai penurunan yang tinggi beriringan dengan penambahan beban. Dari hasil pengujian pada pembebanan 8 kg

didapat penurunan sebesar 5,24 mm, sementara pada beban 16 kg 17,29 mm, pada beban 32 kg di dapat penurunan sebesar 40,14 mm, sedangkan pada beban 64 kg penurunannya sebesar 83,18 mm ,dan pada pembebanan 90 kg di dapat nilai penurunan 103,36 mm. setelah itu dilakukan pengangkatan beban (unloading) didapat nilai sebesar 6,05 mm.

3. Berdasarkan hasil pengamatan secara langsung, bahwa ketika tanah diberi pembebanan maka tanah mengalami penyebaran beban secara vertikal dan horizontal. Pada penelitian ini terdapat peyebaran sebesar 6 cm arah vertikal dan 3 cm secara horizontal, maka perbandngan distribusi beban yang terjadi adalah $6V : 3H$, dan jika di sederhanakan menjadi $2V : 1H$. Hasil ini menunjukkan bahwa pada pondasi telapak distribusi beban sesuai dengan teori $2V : 1H$.

Berdasarkan kajian terhadap penurunan dan tegangan pada model penelitian pondasi dangkal tanah ekspansif menunjukkan bahwa pondasi dangkal yang akan dibangun di atas tanah ekspansif seperti di wilayah bojonegoro memiliki potensi mengalami penurunan dan pengembangan. Hal ini berkaitan dengan sifat tanah ekspansif yang mudah mengembang dan menyusut akibat perubahan kadar air. Oleh karena itu, Pondasi dangkal dapat tetap digunakan pada tanah ekspansif dengan syarat dilakukan modifikasi teknis berupa pengaturan kedalaman pondasi, pemilihan jenis material pelapis, pengendalian kelembaban tanah, serta desain yang memperhitungkan distribusi tegangan dan penurunan yang terjadi. Pendekatan distribusi beban $2V:1H$ terbukti sesuai berdasarkan hasil pengamatan dan dapat digunakan sebagai dasar perencanaan struktur yang lebih aman.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian mengenai kajian pondasi dangkal pada tanah ekspansif, beberapa saran dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya :

1. Klasifikasi potensi pengembangan dan aktivitas tanah ekspansif sebaiknya dilakukan dengan menggunakan lebih banyak metode

pengujian, seperti uji *Oedometer* Pengembangan untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.

2. Dalam menentukan pengembangan dan penurunan pondasi tanah ekspansif, perlu dilakukan uji laboratorium dengan variasi kadar air dan tekanan beban yang lebih luas agar dapat mendapatkan parameter yang lebih komprehensif tentang karakteristik tanah.
3. Pengujian dalam box penelitian sebaiknya dilakukan dengan teliti serta cermat apalagi dalam mempersiapkan bahan dan peralatan guna menghindari kesalahan, serta perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai distribusi tegangan pada tanah lunak agar lebih di perdalam lagi.



DAFTAR PUSTAKA

- 1967, SNI. 2008. "SNI 1967:2008 Cara Uji Batas Cair Tanah." *Badan Standardisasi Nasional*: 1–15.
- Agung, I Gusti, and A Y U Istri. 2014. "(Studi Kasus Di Desa Tanah Awu , Lombok Tengah) Fakultas Teknik Universitas Islam Al-Azhar Mataram." 8(2): 15–19.
- Andriani, Andriani, Rina Yuliet, and Franky Leo Fernandez. 2012. "Pengaruh Penggunaan Semen Sebagai Bahan Stabilisasi Pada Tanah Lempung Daerah Lambung Bukit Terhadap Nilai Cbr Tanah." *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)* 8(1): 29. doi:10.25077/jrs.8.1.29-44.2012.
- Boussinesq, Joseph. 1885. *Application Des Potentiels*. paris: Gauthier-Villars.
- Bowles, J. E. 1981. *Physical and Geotechnical Properties Og Soil*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Chen. 1975. *Foundations on Expansive Soils*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Das, B. M. 1995. *Principles of Deotechnical Engineering*. Boston: PWS Publishing Company.
- Junior, Azzyzaro, Karaseran Oktovian, B A Sompie, and Sjachrul Balamba. 2015. "Pengaruh Bahan Campuran Arang Tempurung Terhadap Konsolidasi Sekunder Pada Lempung Ekspansif." *Jurnal Sipil Statik* 3(8): 543–53.
- Kusuma, Rama Indera, and Enden Mina. 2016. "TINJAUAN SIFAT FISIS DAN MEKANIS TANAH (Studi Kasus : Jalan Carenang Kabupaten Serang)." *Fondasi : Jurnal Teknik Sipil* 5(2). doi:10.36055/jft.v5i2.1255.
- Petry, Thomas M., and Dallas N. Little. 2003. "Review of Stabilization of Clays and Expansive Soils in Pavements and Lightly Loaded Structures - History, Practice, and Future." *Perspectives in Civil Engineering: Commemorating the 150th Anniversary of the American Society of Civil Engineers* 1561: 307–20. doi:10.1061/(asce)0899-1561(2002)14:6(447).
- SNI 03-4813-1998. 1998. "Cara Uji Triaksial Untuk Tanah Kohesif Dalam Keadaan Tidak Terkonsolidasi Dan Tidak Terdrainase (UU)." *Badan Standardisasi Nasional (BSN)*.
- SNI 1742. 2008. "Standar Nasional Indonesia Cara Uji Kepadatan Ringan Untuk Tanah." *Badan Standardisasi Nasional*: 1–20.
- SNI 1744. 2012. "Metode Uji CBR Laboratorium Badan Standardisasi Nasional." *Badan Standardisasi Nasional*: 1–28. www.bsn.go.id.
- SNI 1964:2008. 2008. "Standar Nasional Indonesia, Metode Pengujian Berat Jenis Tanah."

- SNI 1965. 2008. "Cara Uji Penentuan Kadar Air Untuk Tanah Dan Batuan Di Laboratorium." *Badan Standardisasi Nasional*: 1–16.
- SNI 3423:2008. 2008. "ICS 93.020 Badan Standardisasi Nasional." *Cara uji analisis ukuran butir tanah*: 1–27.
- Studi, Program, Teknik Sipil, Universitas Atma, and Jaya Yogyakarta. 2014. "Percepatan Penurunan Sampah Plastik." 13(1): 69–82.
- Waves, Stress. 1975. *4B. R. Silvester Coastal Engineering, Ii*.
- Widoanindyawati, Vemi, Bambang Widodo, Teguh Mulyo Wicaksono, and Fikri Praharseno. 2021. "Studi Distribusi Beban Merata Lajur Pada Tanah Lunak Jenuh." *Bangun Rekaprima* 7(2): 24.
doi:10.32497/bangunrekaprima.v7i2.2994.

