

# JURNAL KONSTRUKSI DAN INFRASTRUKTUR

## Teknik Sipil dan Perencanaan

---

### PENGARUH PENCEMARAN LIMBAH *GREY WATER* TERHADAP SIFAT TANAH LEMPUNG DI KEROBOKAN

I Gede Ngurah Arya Yudistira<sup>1\*</sup>, I Nyoman Aribudiman<sup>1</sup>, Made Dodiek Wirya Ardana<sup>1</sup>,  
Dewa Ngakan Putu Ananda Parwita<sup>1</sup> dan I Made Bagus Arya Palguna<sup>1</sup>

1) Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Bali.  
\*) Email Penulis Korespondensi : [arya.yudistira@unud.ac.id](mailto:arya.yudistira@unud.ac.id)

#### ABSTRACT

This study analyzes the effect of grey water by permanganate content on the physical, mechanical, and bearing capacity properties of clay soil in Kerobokan, which is known for its high plasticity and significant swelling-shrinkage potential. The methodology involved laboratory testing on three soil samples, 1 control sample and 2 samples with different grey water content. The lab test includes water content testing, Specific Gravity, Sieve analysis, Atterberg limits, standard Proctor compaction, unconfined compressive strength, and consolidation tests. The results indicate that the soil is classified as high-plasticity inorganic clay (CH) with an average water content of 47.32%. After exposure to elevated permanganate values, the soil exhibited a 3.03% decrease in specific gravity, increases in liquid limit and plastic limit of 4.96% and 9.58%, respectively, and an 11.71% reduction in unconfined compressive strength. The soil bearing capacity decreased by 2.88% due to the influence of the grey water contaminant. These findings confirm that grey water contamination, as represented by the permanganate value, affects the physical and mechanical characteristics of clay soil as well as its bearing capacity, which is an important consideration in building design and construction planning in the Kerobokan area.

**Keyword:** Clay, Grey water, Soil bearing capacity.

#### 1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk dan intensifikasi aktivitas permukiman di wilayah Kerobokan dalam beberapa tahun terakhir mendorong peningkatan timbulan limbah domestik. Salah satu komponen utama limbah domestik tersebut adalah *grey water*, yaitu limbah cair non-fekal yang berasal dari aktivitas mandi, mencuci, dan dapur. Di banyak kawasan, termasuk area hunian padat, *grey water* sering dialirkan langsung ke lahan terbuka, saluran tanah, maupun sumur resapan sederhana tanpa pengolahan yang memadai. Praktik ini umumnya didasarkan pada asumsi bahwa grey water relatif ringan dibandingkan black water, sehingga dianggap tidak menimbulkan risiko lingkungan yang berarti. [1][2]

*Greywater* atau air limbah rumah tangga yang berasal dari aktivitas mandi dan pencucian, merupakan sumber kontaminan yang semakin signifikan dan berpotensi mempengaruhi sifat fisik tanah, dengan implikasi terhadap perencanaan fondasi rumah atau gedung, perkerasan jalan, serta hingga kestabilan tanah. Ketika greywater bercampur tanah asli dalam rentang waktu yang cukup lama, *grey water* akan membawa surfaktan, garam, minyak, serta peningkatan konsentrasi natrium yang secara fundamental mengubah sifat-sifat geoteknik melalui interaksi fisikokimia. [3][4][5]

Salah satu indikator penting untuk meninjau tingkat pencemaran organik *grey water* adalah kandungan permanganat. Kalium permanganat ( $KMnO_4$ ) sering digunakan sebagai agen pengoksidasi untuk menghilangkan hidrokarbon dan kontaminan organik di tanah. Namun, keberadaan senyawa oksidator ini dalam konsentrasi tinggi justru dapat merusak sifat geoteknik tanah. Peningkatan kandungan permanganat terbukti menurunkan nilai kepadatan kering maksimum (MDD) dan kekuatan mekanis tanah seperti *California Bearing Ratio* (CBR)[6].

Secara ilmiah, *grey water* mengandung kontaminan organik seperti surfaktan, minyak, dan lemak[7]. Kandungan kimia ini berpotensi mengubah sifat fisik dan mekanis tanah melalui interaksi fisikokimia[1]. Tanah lempung sangat sensitif terhadap perubahan komposisi cairan pori tersebut[8]. Pencemaran limbah cair domestik dapat meningkatkan nilai batas Atterberg seperti *liquid limit* (LL) dan *plastic limit* (PL). Selain itu, kontaminasi limbah dapat menurunkan nilai kohesi dan sudut geser internal tanah[4]. Perubahan ini berdampak langsung pada penurunan stabilitas tanah dan daya dukung fondasi bangunan[2]. Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji dampak limbah rumah tangga terhadap parameter konsistensi tanah lempung. Namun, studi-studi tersebut umumnya hanya berfokus pada parameter *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) dan *Chemical Oxygen Demand* (COD) secara umum. Masih terdapat keterbatasan informasi mengenai hubungan spesifik antara kandungan *grey water* yang pada penelitian ini dilihat dari nilai kandungan permanganat dengan perubahan sifat mekanis tanah lempung pada lokasi spesifik di Kerobokan.

Secara lokal, wilayah Kerobokan memiliki karakter penggunaan lahan campuran (permukiman, usaha kecil, dan aktivitas pariwisata) dengan sistem drainase dan pengelolaan limbah yang belum sepenuhnya tertata. Di sejumlah titik, *grey water* dibuang langsung ke permukaan tanah dan meresap pada lapisan lempung setempat. Kondisi ini menimbulkan dugaan bahwa sifat fisik tanah di area tersebut mengalami perubahan akibat paparan berkepanjangan, namun bukti empiris berbasis pengujian laboratorium masih terbatas.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh pencemaran *grey water* terhadap sifat fisik tanah lempung di Kerobokan melalui serangkaian pengujian laboratorium standar. Fokus penelitian diarahkan pada parameter indeks tanah seperti kadar air, berat jenis butiran (Gs), batas-batas Atterberg, batas cair, nilai kepadatan kering maksimum (proctor) dan indeks pemampatan sebelum dan sesudah perlakuan perendaman dengan *grey water* yang ditinjau dari nilai Kalium Permanganatnya ( $KMnO_4$ ).

## 2. METODE

### 2.1. Pengumpulan dan Persiapan Sampel Tanah

Penelitian ini menggunakan dua sampel tanah lempung yang diambil dari wilayah Kerobokan, Bali. Sampel tanah diambil menggunakan teknik *disturbed sampling* pada kedalaman 0 hingga 1,0 meter di bawah permukaan tanah asli. Pemilihan kedalaman ini didasarkan pada zona yang paling rentan terpapar langsung oleh pembuangan limbah cair domestik (*grey water*) dari permukaan

### 2.2. Prosedur Pencampuran Limbah dan Pemadatan

Limbah cair yang digunakan dalam eksperimen ini adalah *grey water* yang dicampur dengan variasi kandungan kalium permanganat ( $KMnO_4$ ) yang berbeda sesuai dengan kadar sampel yang diambil di lokasi penelitian. Prosedur pencampuran dilakukan dengan metode perendaman dan pengadukan menggunakan alat pemadat standar (*Standard Proctor*) sesuai standar ASTM D698. Rasio antara tanah kering dengan limbah *grey water* ditentukan berdasarkan nilai kadar air optimum (OMC) yang diperoleh dari uji pemadatan awal. Variasi konsentrasi permanganat dicampurkan ke dalam limbah untuk mensimulasikan berbagai tingkat pencemaran organik pada tanah lempung tersebut.

### 2.3. Pengujian Laboratorium

Seluruh pengujian geoteknik dilakukan dengan mengikuti standar internasional yang berlaku:

- Uji Kadar Air: Dilakukan sesuai ASTM D2216 untuk menentukan kandungan air alami dan setelah pencampuran limbah.
- Uji Berat Jenis: Dilakukan berdasarkan ASTM D854 menggunakan piknometer.
- Batas-Batas Atterberg: Penentuan Batas Cair (LL) dan Batas Plastis (PL), merujuk pada standar ASTM D4318 untuk mengamati perubahan sifat plastisitas tanah akibat kontaminasi grey water.
- Analisa Saringan: bertujuan untuk menentukan distribusi ukuran partikel (gradasi) tanah dengan cara menyaring sampel kering menggunakan satu set ayakan standar.
- Pemadatan tanah (proctor): bertujuan menentukan kadar air optimum dan berat isi kering maksimum tanah yang tercemar grey water sesuai dengan standar ASTM D698.
- Uji Kuat Tekan Bebas: Pengujian ini bertujuan menentukan kuat tekan bebas ( $q_u$ ) tanah lempung sesuai dengan standar ASTM D2166.

Setiap jenis pengujian dilakukan dengan dua kali pengulangan untuk menjamin akurasi dan konsistensi data.

### 2.4. Analisis Kapasitas Dukung Terzaghi

Data parameter yang diperoleh digunakan untuk menghitung kapasitas dukung ultimit tanah ( $q_{ult}$ ) menggunakan rumus umum Terzaghi:

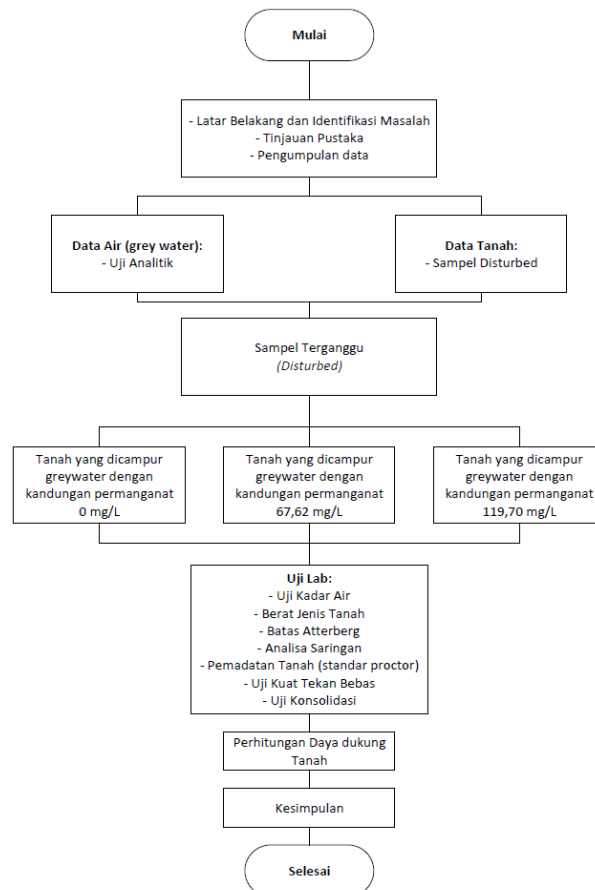
$$q_{ult} = cN_c + qN_q + 0,5\gamma BN_\gamma \quad (1)$$

Pada penelitian ini digunakan:

- Jenis Pondasi: Analisis difokuskan pada fondasi dangkal (*shallow foundation*) seperti fondasi menerus atau fondasi telapak yang umum digunakan pada bangunan perumahan.
- Kondisi Drainase: Analisis dilakukan dengan asumsi kondisi tak terdrainase (*undrained*) mengingat tanah lempung memiliki permeabilitas yang rendah ( $k < 10^{-7}$  cm/det) sehingga air pori tidak sempat mengalir saat beban bekerja.
- Parameter  $N_c, N_q, N_\gamma$ : Parameter-parameter ini merupakan faktor kapasitas dukung tak berdimensi. Dikarenakan tanah lempung, diambil pendekatan bahwa sudut geser internal ( $\phi$ ) tanah adalah  $0^\circ$ .

### 2.5. Diagram Alir Penelitian

Alur penelitian ini secara sistematis disajikan pada Gambar 1. Penelitian diawali dengan studi literatur dan pengumpulan data, yang terbagi menjadi dua jalur paralel, yaitu pengambilan sampel *greywater* untuk uji analitik dan pengambilan sampel tanah terganggu (*disturbed sample*) dari lokasi penelitian di Kerobokan. Sampel tanah selanjutnya dicampur dengan *greywater* pada tiga variasi konsentrasi permanganat, kemudian diuji melalui serangkaian pengujian laboratorium yang meliputi uji sifat fisik, mekanik, dan konsolidasi tanah, untuk selanjutnya digunakan sebagai dasar perhitungan daya dukung tanah hingga diperoleh kesimpulan penelitian.



**Gambar 1.** Flowchart Penelitian

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Kandungan Air Limbah

Hasil uji laboratorium terhadap sampel air limbah menunjukkan bahwa nilai permanganat ( $KMnO_4$ ) sebesar 67,624 mg/L dan 119,701 mg/L. Selain itu, nilai parameter lainnya seperti BOD, COD dan TSS tergolong tinggi atau melewati batas yang diizinkan menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (LHK) No. P.68 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik[9]. Nilai ini menunjukkan kandungan bahan organik dalam air limbah cukup tinggi dan berpotensi mempengaruhi karakteristik tanah jika terjadi kontak langsung.

**Tabel 1.** Kandungan Air Limbah

No	Parameter	Satuan	Sampel 1	Sampel 2
1	pH	-	7,62	7,50
2	DO	mg/L	0,504	0,000
3	BOD <sub>5</sub>	mg/L	156,230	257,030
4	COD	mg/L	377,157	498,967
5	KMnO <sub>4</sub>	mg/L	67,624	119,701
6	TDS	mg/L	1,980	1,660
7	TSS	mg/L	73,333	430,0

Sumber: Hasil penelitian, 2025

### 3.2. Kadar Air Tanah

Pengujian kadar air dilakukan untuk mengetahui kadar air pada tanah asli. Kadar air tanah merupakan massa air pada kandungan tanah dibagi massa butiran tanah.

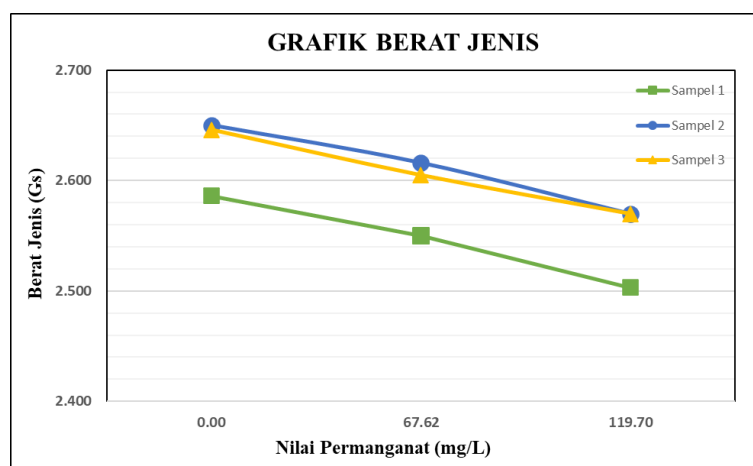
**Tabel 2.** Hasil Analisa Kadar Air Tanah

Kadar Air Tanah (wc) %	
Sampel Tanah	Kadar air tanah
1	45,14
2	48,52
3	48,31
Rata-Rata	47,32

Dari hasil pengujian didapat kadar air rata-rata sebesar 47,32 %

### 3.3. Berat Jenis Tanah

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan berat jenis suatu tanah. Berat jenis merupakan densitas tanah dibagi dengan densitas air pada temperatur 4°C atau didefinisikan sebagai kerapatan.



**Gambar 2.** Grafik Hubungan Antara Penambahan Nilai Permanganat Terhadap Berat Jenis

Gambar 2 menunjukkan hubungan antara kadar terhadap nilai berat jenis tanah (*specific gravity*, Gs) pada ketiga sampel yang diuji. Secara keseluruhan, ketiga sampel memperlihatkan tren penurunan nilai Gs yang konsisten seiring dengan meningkatnya kadar grey water yang dilihat dari nilai kandungan permanganat ( $KMnO_4$ ).

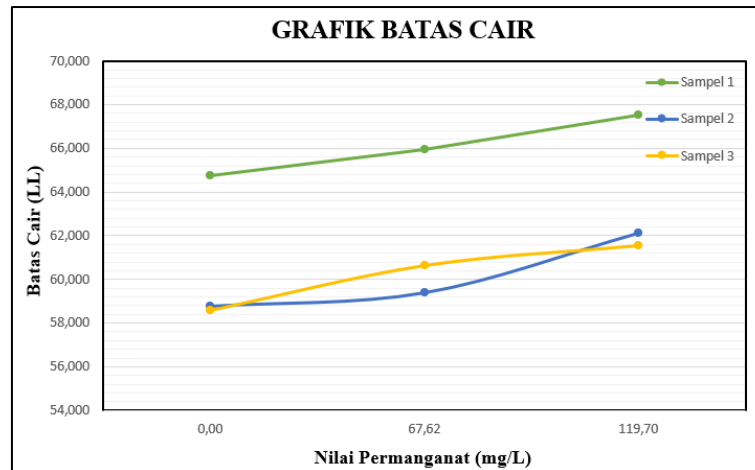
Pada kondisi awal (kadar = 0 mg/L), nilai Gs Sampel 1, Sampel 2, dan Sampel 3 berturut-turut adalah 2,586; 2,650; dan 2,646. Nilai-nilai ini berada dalam rentang tipikal tanah mineral, yaitu antara 2,60–2,80[9]. Sampel 2 dan Sampel 3 menunjukkan nilai awal yang relatif berdekatan, sedangkan Sampel 1 sedikit lebih rendah, yang mengindikasikan adanya perbedaan komposisi mineralogi antar sampel.

Dengan meningkatnya kadar permanganat hingga 67,62 mg/L, nilai Gs ketiga sampel mengalami penurunan masing-masing menjadi 2,550; 2,616; dan 2,605. Penurunan berlanjut pada kadar permanganat tertinggi sebesar 119,70 mg/L, dengan nilai Gs akhir sebesar 2,503 (Sampel 1), 2,570 (Sampel 2), dan 2,570 (Sampel 3). Kecenderungan ini mengindikasikan bahwa peningkatan kadar *grey water* atau permanganat berpengaruh terhadap penurunan nilai berat jenis tanah secara linier, kemungkinan disebabkan oleh substitusi partikel tanah dengan material berbobot jenis lebih rendah.

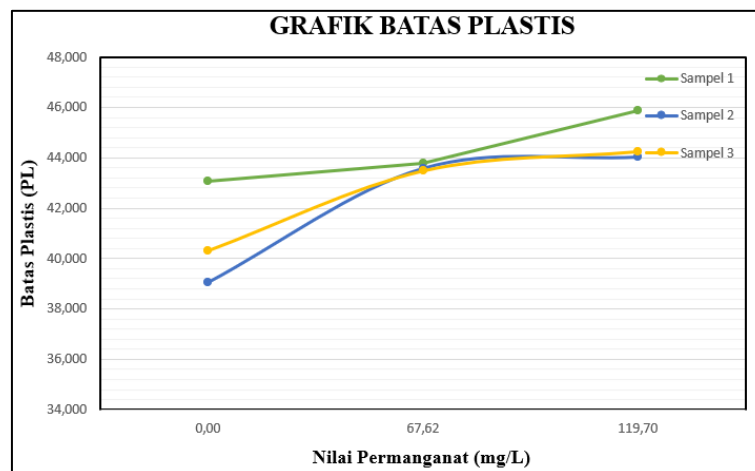
Pola penurunan yang serupa pada ketiga sampel menunjukkan konsistensi hasil pengujian dan keandalan prosedur percobaan yang digunakan.

### 3.4. Batas Atterberg

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan konsistensi tanah lempung dalam berbagai kondisi kadar air. Batas-batas ini membantu mengidentifikasi perilaku tanah saat berubah dari kondisi padat ke cair.



Gambar 3. Grafik Hubungan Antara Penambahan Nilai Permanganat Terhadap batas Cair



Gambar 4. Grafik Hubungan Antara Penambahan Nilai Permanganat Terhadap Batas Plastis

Gambar 3 menunjukkan pengaruh penambahan kalium permanganat ( $\text{KMnO}_4$ ) terhadap nilai batas cair (LL) pada ketiga sampel tanah. Secara umum, ketiga sampel memperlihatkan tren peningkatan nilai LL seiring dengan meningkatnya konsentrasi  $\text{KMnO}_4$ . Pada kondisi tanpa perlakuan (kadar  $\text{KMnO}_4 = 0$  mg/L), Sampel 1 memiliki nilai LL yang lebih tinggi (64,5%) dibandingkan Sampel 2 dan Sampel 3 yang menunjukkan nilai serupa (58,5%). Hal ini mengindikasikan bahwa Sampel 1 memiliki karakteristik plastisitas awal yang lebih tinggi, kemungkinan akibat kandungan mineral lempung yang lebih dominan.

Dengan meningkatnya kadar  $\text{KMnO}_4$  hingga 119,70 mg/L, nilai LL Sampel 1 meningkat menjadi 67,5%, sementara Sampel 2 dan Sampel 3 mengalami peningkatan yang lebih signifikan secara proporsional, masing-masing mencapai 62,0%. Peningkatan nilai LL ini dapat dikaitkan dengan kemampuan ion  $\text{MnO}_4^-$  dalam memodifikasi interaksi elektrokimia pada permukaan partikel lempung[6], sehingga meningkatkan daya ikat air antar partikel dan memperluas rentang perilaku plastis tanah.

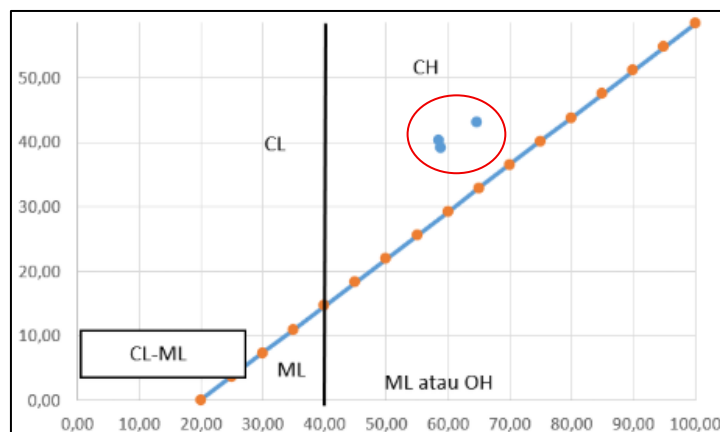
Gambar 4 menampilkan hubungan antara kadar  $KMnO_4$  dan nilai batas plastis (PL) ketiga sampel. Berbeda dengan tren pada batas cair, peningkatan PL antar sampel menunjukkan pola yang menarik. Pada kondisi awal (0 mg/L), terdapat variasi yang cukup signifikan antara ketiga sampel: Sampel 1 (43,0%), Sampel 3 (40,5%), dan Sampel 2 (39,0%). Namun, pada kadar  $KMnO_4$  tertinggi (119,70 mg/L), nilai PL ketiga sampel cenderung menuju nilai yang berdekatan, yaitu Sampel 1 (45,5%), Sampel 2 (44,5%), dan Sampel 3 (44,5%). Nilai ini mengindikasikan bahwa penambahan  $KMnO_4$  memberikan pengaruh homogenisasi terhadap perilaku plastis tanah, di mana sampel dengan nilai PL awal yang lebih rendah mengalami laju peningkatan yang lebih besar.

### 3.5. Analisa Saringan

Berdasarkan hasil pengujian Analisa saringan dan pengujian batas-batas Atterberg serta pengeplotan pada diagram plastisitas USCS (*Unified Soil Classification System*), seluruh sampel tanah pada setiap variasi kadar permanganat ( $KMnO_4$ ) yang diuji terklasifikasi sebagai CH (*Fat Clay / Lempung Anorganik Plastisitas Tinggi*). Klasifikasi ini didasarkan pada dua kriteria utama: (1) nilai LL yang secara konsisten melebihi 50% pada semua kondisi pengujian, dan (2) nilai PI yang seluruhnya berada di atas Garis A ( $PI = 0,73 \times (LL - 20)$ ) pada diagram plastisitas Casagrande pada Gambar 4.

Meskipun penambahan  $KMnO_4$  hingga konsentrasi 119,70 mg/L menyebabkan pergeseran posisi titik-titik data ke arah nilai LL dan PI yang lebih tinggi pada Sampel 1, serta perubahan nilai PI yang bervariasi pada Sampel 2 dan Sampel 3, pergeseran tersebut tidak cukup signifikan untuk mengubah klasifikasi tanah dari zona CH. Hal ini mengindikasikan bahwa perlakuan  $KMnO_4$  pada rentang konsentrasi yang diuji memodifikasi karakteristik plastisitas tanah secara kuantitatif, namun tidak mengubah karakter mineralogi dominan tanah yang bersifat lempung ekspansif plastisitas tinggi.

Konsistensi klasifikasi CH pada seluruh sampel menunjukkan bahwa tanah yang diuji memiliki potensi kembang-susut (*swelling-shrinkage*) yang tinggi, yang perlu menjadi pertimbangan utama dalam perencanaan pondasi dan stabilisasi tanah di lokasi penelitian ini.



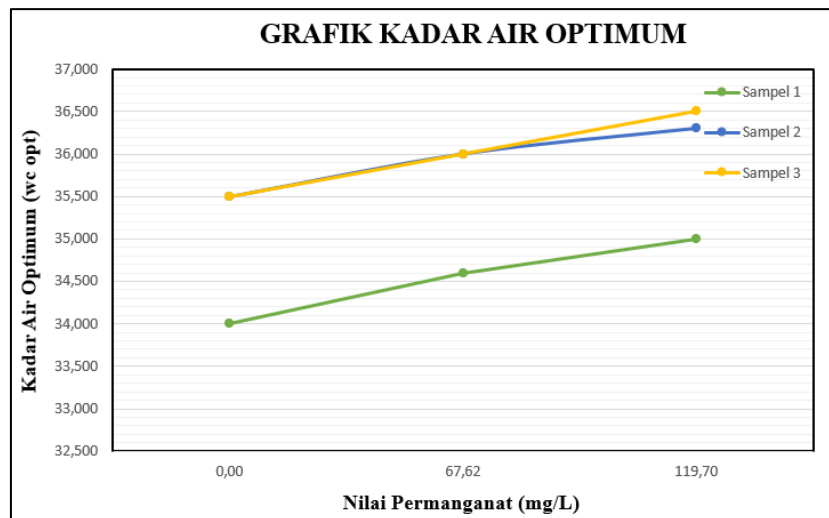
Gambar 5. Grafik Plastisitas

### 3.6. Pemadatan Tanah (*Standard Proctor*)

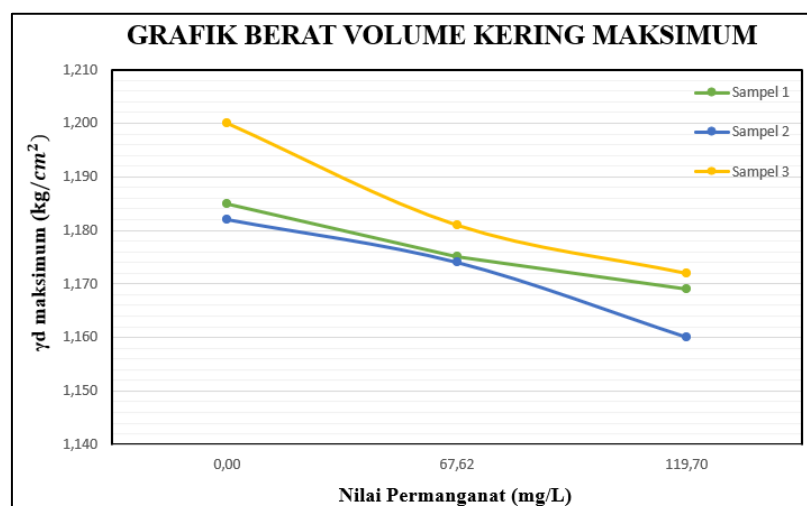
Pengujian proctor dilakukan untuk menentukan hubungan antara kadar air dengan kepadatan (densitas kering atau kerapatan). Gambar 6 menunjukkan hubungan antara kadar permanganat dan kadar air optimum (OMC) pada tiga sampel tanah yang diuji. Berdasarkan hasil uji pemadatan standar (*Standard Proctor Test*), terlihat bahwa kadar air optimum cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi permanganat pada seluruh sampel.

Pada kondisi tanah asli (kadar permanganat 0,00 mg/L), kadar air optimum Sampel 1, Sampel 2, dan Sampel 3 masing-masing tercatat sebesar 34,00%, 35,50%, dan 35,50%. Seiring meningkatnya kadar permanganat menjadi 67,62 mg/L, nilai kadar air optimum mengalami peningkatan menjadi 34,60%, 36,00%, dan 36,00% untuk ketiga sampel secara berurutan. Pada konsentrasi permanganat tertinggi,

yaitu 119,70 mg/L, kadar air optimum mencapai nilai tertinggi sebesar 35,00%, 36,20%, dan 36,50% untuk Sampel 1, Sampel 2, dan Sampel 3.



Gambar 6. Grafik Hubungan Antara Penambahan Nilai Permanganat terhadap Kadar Air Optimum



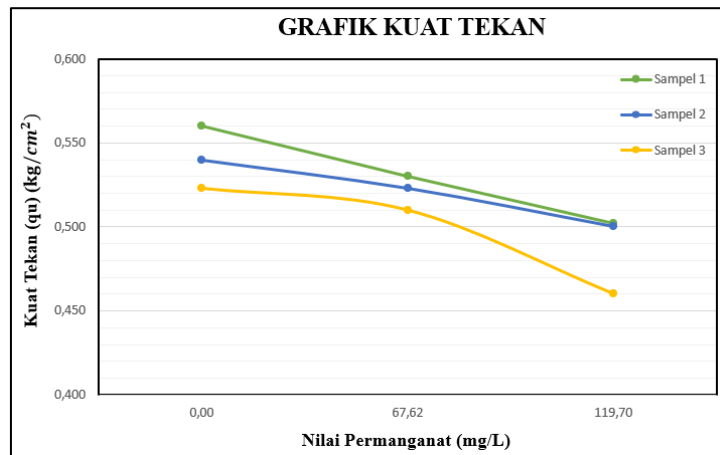
Gambar 7. Grafik Hubungan Antara Penambahan Nilai Permanganat terhadap Berat Volume Kering

Peningkatan kadar air optimum ini mengindikasikan bahwa penambahan permanganat memengaruhi karakteristik hidrasi partikel tanah, kemungkinan akibat reaksi oksidasi yang mengubah sifat permukaan partikel tanah sehingga membutuhkan lebih banyak air untuk mencapai kondisi pemadatan optimum. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya [6] yang menyatakan bahwa bahan aditif kimia dapat memodifikasi kapasitas penyerapan air pada tanah berbutir halus.

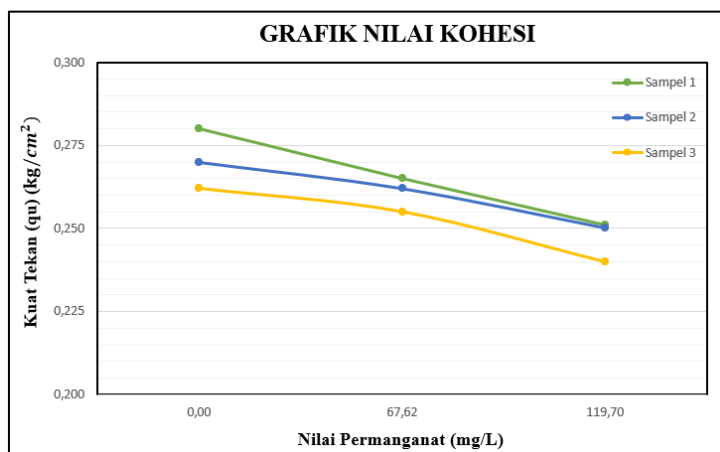
Gambar 7 menyajikan pengaruh kadar permanganat terhadap berat volume kering maksimum ( $\gamma_{d\text{maks}}$ ) dari ketiga sampel tanah. Berbanding terbalik dengan kadar air optimum, hasil pengujian menunjukkan bahwa berat volume kering maksimum mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya konsentrasi permanganat pada seluruh sampel. Pada kondisi tanah asli (0,00 mg/L), nilai  $\gamma_{d\text{maks}}$  Sampel 1, Sampel 2, dan Sampel 3 masing-masing adalah 1,185; 1,182; dan 1,200 kg/cm<sup>2</sup>. Pada konsentrasi 67,62 mg/L, nilai  $\gamma_{d\text{maks}}$  menurun menjadi 1,178; 1,175; dan 1,181 kg/cm<sup>2</sup>. Penurunan yang lebih signifikan terjadi pada konsentrasi tertinggi 119,70 mg/L, dengan nilai  $\gamma_{d\text{maks}}$  masing-masing sebesar 1,170; 1,160; dan 1,172 kg/cm<sup>2</sup>.

### 3.7. Uji Kuat Tekan Bebas

Tujuan pengujian tekan bebas yaitu untuk menentukan kuat tekan bebas tanah kohesif.



**Gambar 8.** Grafik Hubungan Antara Penambahan Nilai Permanganat Terhadap Kuat Tekan ( $q_u$ ) UCS



**Gambar 9.** Grafik Hubungan Antara Penambahan Nilai Permanganat Terhadap Kohesi ( $c_u$ ) UCS

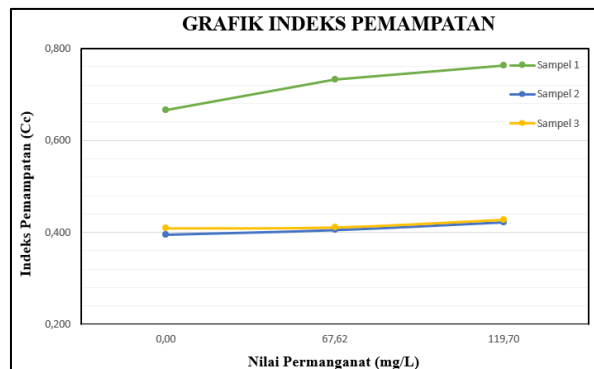
Gambar 8 dan Gambar 9 menyajikan hasil pengujian kuat tekan bebas (*Unconfined Compression Test*, UCS) dan nilai kohesi tanah pada tiga sampel dengan variasi konsentrasi permanganat sebesar 0,00; 67,62; dan 119,70 mg/L. Kedua parameter ini dianalisis secara bersamaan mengingat hubungan langsungnya, di mana nilai kohesi ( $C_u$ ) diperoleh dari setengah nilai kuat tekan bebas ( $q_u$ ), sesuai dengan persamaan:  $C_u = q_u/2$ . Hasil pengujian menunjukkan bahwa baik kuat tekan bebas ( $q_u$ ) maupun kohesi ( $c_u$ ) mengalami penurunan yang konsisten seiring dengan meningkatnya konsentrasi permanganat pada seluruh sampel yang diuji. Pola penurunan ini bersifat progresif, mengindikasikan adanya hubungan negatif yang sistematis antara konsentrasi permanganat dengan kekuatan geser tanah dalam kondisi undrained.

Pada kondisi tanah asli tanpa paparan permanganat (0,00 mg/L), nilai Sampel 1, Sampel 2, dan Sampel 3 masing-masing tercatat sebesar 0,560; 0,538; dan 0,520 kg/cm<sup>2</sup>, dengan Sampel 1 menunjukkan nilai tertinggi di antara ketiga sampel pada seluruh variasi konsentrasi. Pada konsentrasi permanganat 67,62 mg/L, nilai mengalami penurunan menjadi 0,530; 0,520; dan 0,508 kg/cm<sup>2</sup> untuk Sampel 1, Sampel 2, dan Sampel 3 secara berurutan. Penurunan yang paling signifikan terjadi pada konsentrasi permanganat tertinggi, yaitu 119,70 mg/L, di mana nilai Sampel 1, Sampel 2, dan Sampel 3 masing-masing turun menjadi 0,502; 0,500; dan 0,460 kg/cm<sup>2</sup>. Perlu dicatat bahwa Sampel 3 mengalami degradasi kekuatan yang paling besar dibandingkan dua sampel lainnya, dengan penurunan

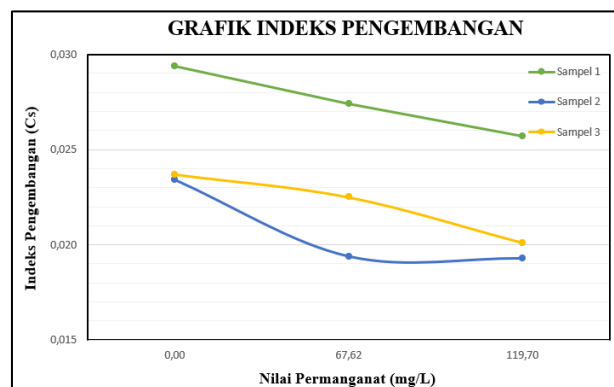
total sebesar  $\pm 11,5\%$  dari nilai awalnya, sementara Sampel 1 dan Sampel 2 mengalami penurunan yang lebih kecil masing-masing sebesar  $\pm 10,4\%$  dan  $\pm 7,1\%$ .

### 3.8. Konsolidasi

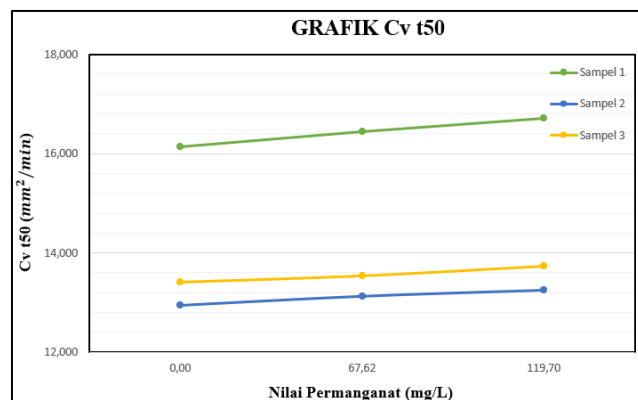
Tujuan dari pemeriksaan konsolidasi ini adalah untuk menentukan sifat pemampatan suatu jenis tanah, yaitu sifat-sifat perubahan isi dan proses keluarnya air dari dalam pori tanah yang diakibatkan adanya perubahan tekanan vertikal yang bekerja pada tanah tersebut.



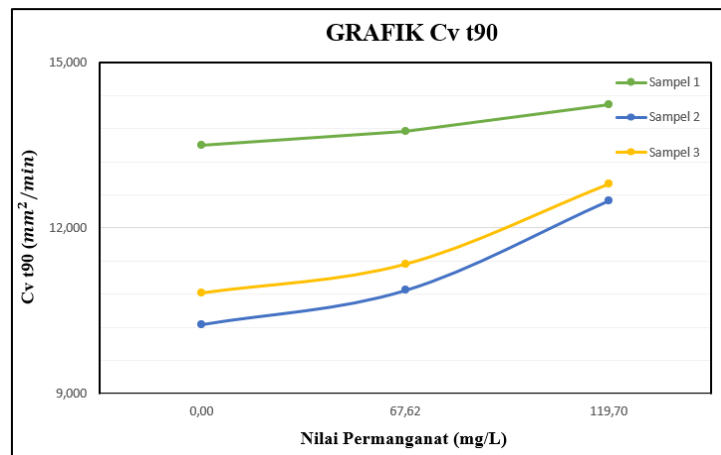
**Gambar 10.** Grafik Hubungan Antara Penambahan Nilai Permanganat Terhadap Nilai Indeks Pemampatan (Cc)



**Gambar 11.** Grafik Hubungan Antara Penambahan Nilai Permanganat Terhadap Nilai Indeks Pengembangan (Cs)



**Gambar 12.** Grafik Hubungan Antara Nilai Permanganat Terhadap Koefisien Konsolidasi Tanah ( $Cv t_{50}$ )



**Gambar 13.** Grafik Hubungan Antara Nilai Permanganat Terhadap Koefisien Konsolidasi Tanah ( $C_v t_{90}$ )

Gambar 10 hingga Gambar 13 menyajikan hasil pengujian konsolidasi satu dimensi (*one-dimensional consolidation test*) yang meliputi empat parameter utama, yaitu indeks pemampatan ( $C_c$ ), indeks pengembangan ( $C_s$ ), serta koefisien konsolidasi berdasarkan metode  $t_{50}$  dan metode  $t_{90}$ , pada tiga sampel tanah dengan variasi konsentrasi permanganat sebesar 0,00; 67,62; dan 119,70 mg/L. Berdasarkan Gambar 10, nilai indeks pemampatan ( $C_c$ ) seluruh sampel menunjukkan tren peningkatan seiring bertambahnya konsentrasi permanganat. Sampel 1 secara konsisten mencatat nilai tertinggi di antara ketiga sampel, yakni sebesar 0,660 pada konsentrasi 0,00 mg/L, meningkat menjadi 0,730 pada 67,62 mg/L, dan mencapai 0,760 pada konsentrasi tertinggi 119,70 mg/L. Sementara itu, Sampel 2 dan Sampel 3 menunjukkan nilai yang relatif berdekatan satu sama lain, yakni berada pada kisaran 0,400 pada konsentrasi 0,00 mg/L dan meningkat hingga sekitar 0,420–0,430 pada konsentrasi 119,70 mg/L. Berbanding terbalik dengan , nilai indeks pengembangan ( $C_s$ ) pada seluruh sampel menunjukkan tren penurunan seiring meningkatnya konsentrasi permanganat, sebagaimana disajikan pada Gambar 11. Sampel 1 kembali mencatat nilai tertinggi dengan sebesar 0,0295 pada kondisi tanah asli (0,00 mg/L), yang kemudian menurun menjadi 0,0270 pada 67,62 mg/L, dan turun lebih lanjut menjadi 0,0260 pada 119,70 mg/L. Sampel 2 dan Sampel 3 menunjukkan pola serupa, dengan nilai awal masing-masing sekitar 0,0232 dan 0,0232, yang menurun secara progresif hingga mencapai 0,0190 dan 0,0202 pada konsentrasi permanganat tertinggi. Penurunan nilai ini menunjukkan bahwa kapasitas pengembangan kembali (*swelling*) tanah berkurang akibat paparan *grey water* yang dilihat dari nilai permanganat. Gambar 12 dan Gambar 13 menyajikan nilai koefisien konsolidasi ( $C_v$ ) yang diperoleh melalui dua metode analisis berbeda, yaitu metode Casagrande ( $t_{50}$ ) dan metode Taylor ( $t_{90}$ ). Kedua grafik secara konsisten menunjukkan bahwa nilai meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi permanganat pada seluruh sampel. Pada grafik , Sampel 1 mencatat nilai tertinggi yakni 16,20 mm<sup>2</sup>/min pada 0,00 mg/L, meningkat menjadi 16,50 mm<sup>2</sup>/min pada 67,62 mg/L, dan mencapai 17,00 mm<sup>2</sup>/min pada 119,70 mg/L. Sampel 2 dan Sampel 3 yang berada pada kisaran nilai lebih rendah juga menunjukkan pola peningkatan serupa, masing-masing dari sekitar 13,00 dan 13,40 mm<sup>2</sup>/min pada kondisi tanah asli, meningkat hingga sekitar 13,30 dan 13,70 mm<sup>2</sup>/min pada konsentrasi tertinggi. Hasil yang sejalan juga diperoleh dari grafik , di mana Sampel 1 meningkat dari sekitar 13,20 mm<sup>2</sup>/min menjadi 13,80 mm<sup>2</sup>/min, sementara Sampel 2 dan Sampel 3 meningkat lebih tajam dari kisaran 10,40–11,00 mm<sup>2</sup>/min menjadi sekitar 12,40–12,80 mm<sup>2</sup>/min. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa laju konsolidasi tanah menjadi semakin cepat seiring dengan paparan permanganat, yang dapat dijelaskan melalui modifikasi sifat hidrolik tanah.

Secara keseluruhan, keempat parameter konsolidasi yang dianalisis menunjukkan bahwa paparan permanganat memberikan pengaruh signifikan terhadap perilaku konsolidasi tanah, dengan implikasi berupa peningkatan kompresibilitas primer ( $C_c$ ), penurunan kapasitas pengembangan elastis ( $C_s$ ), serta percepatan laju konsolidasi ( $C_v$ ). Kombinasi kondisi ini perlu mendapat perhatian khusus dalam konteks rekayasa geoteknik, terutama pada lokasi yang terpapar *grey water* atau kontaminan berbasis oksidan,

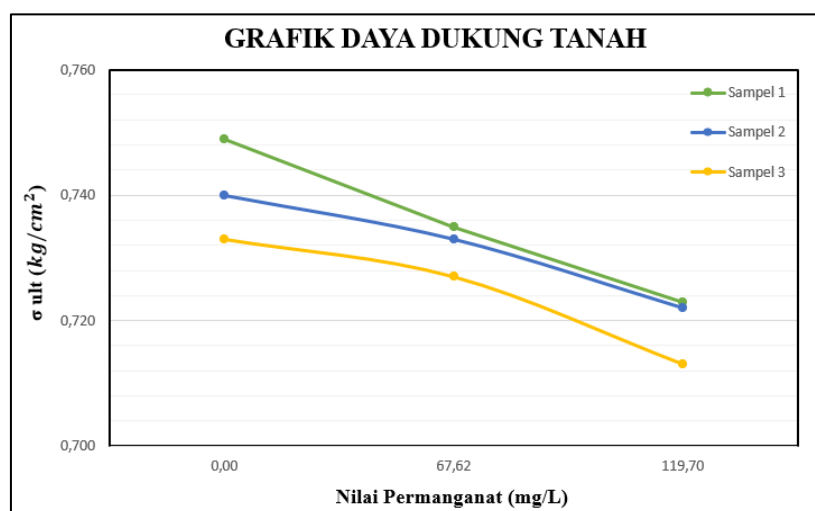
karena peningkatan secara langsung berimplikasi pada besarnya penurunan (*settlement*) jangka panjang yang berpotensi terjadi pada struktur yang dibangun di atasnya.

### 3.9. Daya Dukung Tanah

Analisis daya dukung tanah ultimate ( $q_{ult}$ ) dilakukan menggunakan persamaan Terzaghi untuk pondasi dangkal berbentuk persegi panjang (*strip footing*) dengan lebar  $B = 2 \text{ m}$  yang diletakkan pada kedalaman pondasi  $df = 1 \text{ m}$ , dengan asumsi beban bekerja secara sentris tanpa eksentrisitas dan tanah dianggap homogen pada setiap lapisan yang ditinjau. Persamaan daya dukung Terzaghi yang digunakan adalah sebagai berikut:  $q_{ult} = cN_c + qN_q + 0,5\gamma BN_\gamma$ .

di mana  $c$  adalah kohesi tanah ( $\text{kg/cm}^2$ ),  $q$  adalah tegangan overburden efektif pada dasar pondasi ( $\text{kg/cm}^2$ ),  $\gamma$  adalah berat volume tanah ( $\text{kg/cm}^3$ ),  $B$  adalah lebar pondasi (cm), serta  $N_c$ ,  $N_q$  dan  $N_\gamma$  adalah faktor-faktor daya dukung Terzaghi yang merupakan fungsi dari sudut geser dalam ( $\phi$ ). Mengingat pengujian kuat tekan bebas (UCT) dilakukan dalam kondisi *undrained* pada tanah jenuh, maka analisis daya dukung dilakukan dalam kondisi *undrained* ( $\phi = 0$ ), sehingga faktor daya dukung yang berlaku adalah  $N_c = 5,14$ ,  $N_q = 1,00$  dan  $N_\gamma = 0,00$  sesuai dengan kondisi tanah lempung jenuh. Gambar 14 menyajikan nilai  $q_{ult}$  dari ketiga sampel tanah pada variasi konsentrasi permanganat 0,00; 67,62; dan 119,70 mg/L. Secara umum, seluruh sampel menunjukkan tren penurunan  $q_{ult}$  yang konsisten seiring meningkatnya konsentrasi permanganat, yang sejalan dengan penurunan nilai kohesi ( $c_u$ ) sebagaimana telah dibahas pada analisis UCS. Pada kondisi tanah asli (0,00 mg/L), nilai Sampel 1, Sampel 2, dan Sampel 3 masing-masing tercatat sebesar 0,750; 0,740; dan 0,732  $\text{kg/cm}^2$ . Pada konsentrasi 67,62 mg/L, nilai mengalami penurunan menjadi 0,735; 0,733; dan 0,728  $\text{kg/cm}^2$ , dan pada konsentrasi tertinggi 119,70 mg/L, nilai kembali menurun menjadi 0,723; 0,722; dan 0,714  $\text{kg/cm}^2$  untuk masing-masing sampel. Penurunan tertinggi secara absolut dialami oleh Sampel 3, yang mengalami reduksi sebesar  $\pm 0,018 \text{ kg/cm}^2$  atau setara dengan  $\pm 2,46\%$  dari nilai awalnya, sementara Sampel 1 dan Sampel 2 mengalami penurunan masing-masing sebesar  $\pm 0,027 \text{ kg/cm}^2$  ( $\pm 3,60\%$ ) dan  $\pm 0,018 \text{ kg/cm}^2$  ( $\pm 2,43\%$ ).

Penurunan yang terjadi pada rentang konsentrasi permanganat yang diuji berada dalam kisaran 2,43% hingga 3,60% atau apabila dirata-ratakan seluruh sampel mencapai sekitar 2,88%. Dalam konteks rekayasa geoteknik, penurunan sebesar ini secara numerik tergolong kecil dan berada di bawah ambang batas signifikansi praktis yang umumnya ditetapkan sebesar 5–10% dalam perencanaan pondasi [10]. Hal ini berarti bahwa pada konsentrasi permanganat hingga 119,70 mg/L, kapasitas dukung tanah tidak mengalami penurunan yang berarti secara rekayasa, dan pondasi yang telah direncanakan berdasarkan kondisi tanah asli masih memiliki cadangan keamanan yang memadai. Namun demikian, penurunan ini tidak dapat diabaikan begitu saja dari perspektif jangka panjang, terutama apabila konsentrasi permanganat di lapangan berpotensi meningkat melampaui batas yang diuji dalam penelitian ini.



**Gambar 14.** Grafik Hubungan Antara Penambahan Nilai Permanganat Terhadap Nilai Daya Dukung Ultimit Tanah

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, beberapa kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini mengkaji pengaruh kontaminasi *grey water* yang dilihat dari nilai permanganat terhadap karakteristik geoteknik tanah lempung di daerah Kerobokan pada tiga variasi konsentrasi, yaitu 0,00; 67,62; dan 119,70 mg/L. Tanah asli Kerobokan terklasifikasi sebagai lempung inorganik plastisitas tinggi (CH) berdasarkan sistem klasifikasi USCS, dengan parameter indeks meliputi kadar air rata-rata 47,32%, batas cair 60,71%, batas plastis 40,80%, dan berat jenis 2,627 yang secara keseluruhan mencerminkan tanah dengan potensi kembang-susut tinggi dan kompresibilitas sedang hingga tinggi.
2. Paparan *grey water* terbukti menurunkan kualitas geoteknik tanah secara sistematis dan progresif pada seluruh parameter yang diuji. Dari sisi kekuatan, nilai kuat tekan bebas ( $q_u$ ) dan kohesi ( $c_u$ ) mengalami penurunan berkisar antara 7,1% hingga 11,5% pada konsentrasi tertinggi, yang merupakan degradasi paling signifikan di antara seluruh parameter yang diamati. Penurunan ini diiringi oleh peningkatan kadar air optimum sebesar rata-rata 2,67% dan penurunan berat volume kering maksimum ( $\gamma_d$ ) sebesar rata-rata 2,44%, yang mengindikasikan melemahnya struktur ikatan antar partikel akibat reaksi oksidasi permanganat terhadap senyawa penyemen mineral tanah. Pada parameter konsolidasi, peningkatan indeks pemampatan ( $c_c$ ) sebesar rata-rata 9,65% dan percepatan koefisien konsolidasi ( $c_v$ ) yang mencapai 14,32% pada metode mengisyaratkan bahwa tanah yang terpapar permanganat berpotensi mengalami penurunan (*settlement*) yang lebih besar namun berlangsung lebih cepat, suatu kondisi yang perlu diperhitungkan dalam perencanaan pondasi pada lingkungan yang tercemar. Di sisi lain, penurunan indeks pengembangan ( $c_s$ ) sebesar rata-rata 14,90% menunjukkan berkurangnya kemampuan elastis tanah untuk memulihkan deformasi setelah pelepasan beban.
3. Implikasi terhadap kapasitas dukung tanah yang dihitung menggunakan persamaan Terzaghi menunjukkan penurunan rata-rata sebesar 2,88%, yang secara numerik berada di bawah ambang signifikansi praktis rekayasa pondasi. Meskipun demikian, mengingat tren penurunan yang bersifat konsisten dan progresif, konsentrasi permanganat yang melebihi batas yang diuji berpotensi menurunkan daya dukung tanah hingga pada tingkat yang tidak dapat diabaikan secara rekayasa. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah berupa kuantifikasi pengaruh kontaminasi permanganat terhadap parameter geoteknik tanah lempung CH, yang dapat menjadi acuan dalam evaluasi kelayakan tanah dasar pada kawasan yang terpapar limbah industri maupun *grey water* yang mengandung senyawa oksidan, serta menjadi dasar pertimbangan dalam penetapan baku mutu kontaminan tanah dari perspektif geoteknik

Sedangkan saran dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan evaluasi dan penyesuaian desain pondasi yang mempertimbangkan kondisi tanah terkontaminasi bahan organik. Penggunaan teknik perbaikan tanah seperti stabilisasi kimia atau mekanik sangat disarankan untuk meningkatkan kestabilan dan daya dukung tanah sebelum pembangunan.
2. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai parameter air limbah (*grey water*) yang mempengaruhi karakteristik tanah lempung di daerah Kerobokan untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam tentang bagaimana berbagai komponen kimia dan fisik dalam air limbah tersebut memengaruhi sifat fisik, mekanik, dan daya dukung tanah lempung, sehingga dapat dijadikan dasar ilmiah dalam pengelolaan lingkungan dan perencanaan teknik sipil yang lebih tepat dan efektif di wilayah tersebut.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan variasi nilai permanganat yang lebih luas dan sampel tanah yang lebih banyak untuk mendapatkan gambaran yang lebih komprehensif mengenai pengaruh pencemaran bahan organik terhadap tanah lempung. Selain itu, pengujian jangka panjang terhadap perubahan sifat tanah akibat paparan nilai permanganat juga perlu dilakukan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. A. Ganiyu, O. T. Olurin, and M. O. Olobadola, "Physico - chemical and geotechnical properties of greywater - polluted soils treated with cereal gruel supernatant," *Discov. Geosci.*, 2025, doi: 10.1007/s44288-025-00166-x.
- [2] S. A. Ganiyu, O. T. Olurin, S. Y. Makanjuola, A. Okeh, A. Oluwatoyin, and R. A. Lasisi, "African Scientific Reports Assessing the physical and geotechnical properties of subsoils within an active municipal solid waste dumpsite for secured," vol. 3, pp. 1–12, 2024.
- [3] H. D. A.- Hamaiedeh, "The Impact of Greywater Reuse in Irrigation on Public Health and Safety," *Electron. J. Geotech. Eng.*, vol. 15, pp. 1131–1138, 2010.
- [4] I. N. Aribudiman, I. W. Redana, K. D. Harmayani, and Y. Ciawi, "Analysis Model Of Clay Soil Characteristic Behavior Due To The Influence Of Household Wastewater ( Grey Water )," vol. 10, no. 10, pp. 181–189, 2019.
- [5] P. Sen, M. Dixit, and R. Chitra, "Effect of Chemicals on Index Properties of Soil," vol. 4, no. 1, pp. 352–359, 2016.
- [6] S. A. Ola, O. A. Usifoh, and E. S. Nnochiri, "THE EFFECTS OF POTASSIUM PERMANGANATE ON THE GEOTECHNICAL PROPERTIES OF SOILS," vol. 63, no. 4, pp. 260–267, 2023.
- [7] S. A. Ganiyu, K. S. Are, and O. T. Olurin, "Assessment of geotechnical and physico - chemical properties of age - long greywater - contaminated soils in basement complex areas , southwest Nigeria," *Appl. Water Sci.*, vol. 10, no. 5, pp. 1–15, 2020, doi: 10.1007/s13201-020-01201-7.
- [8] E. A. El Kasaby, A. A. Eissa, and A. F. Essa, "Study the effect of Industrial Dairy and Textile Waste Water on the Engineering and Geotechnical Properties of Fine-Grained Soil," no. 9, pp. 75–91, 2023.
- [9] Indonesia, "Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik," 2016, *Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Jakarta*.
- [10] J. E. Bowles, *Foundation Analysis and Design*. in Civil engineering series. McGraw-Hill, 1988. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=eNxRAAAAMAAJ>