

Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif Menggunakan Variasi Campuran *Fly ash* dan Semen Untuk Pondasi Rumah 2 Lantai
Stabilization of Expansive Clay Soil Using Variations of Fly ash and Cement Mixture for 2-Storey House Foundations

Devina Amelia Eka Putri¹⁾, Arief Alihudien²⁾, Hilfi Harisan Ahmad³⁾

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Jember
email: devinamelia29@gmail.com

²Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Jember
email: ariefalihudien@unmuhjember.ac.id

³Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Jember
email: hilfiharisan@unmuhjember.ac.id

Abstrak

Kestabilan suatu bangunan sangat dipengaruhi oleh kekuatan pondasi dan kapasitas dukung tanah di bawahnya. Perubahan kadar air akibat pergantian musim hujan dan kemarau pada wilayah tropis seperti Indonesia dapat memengaruhi volume tanah, terutama pada tanah lempung ekspansif. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan daya dukung tanah lempung melalui metode stabilisasi dengan penambahan variasi semen dan *fly ash* dimana kedua bahan tersebut termasuk *Stabilizing agent*. Sampel tanah berasal dari Desa Kebonsari, Kecamatan Summersari, Kabupaten Jember, yang termasuk jenis tanah lempung ekspansif dan diklasifikasikan ke dalam kelompok A-7-6 menurut AASHTO serta CH menurut USCS. Hasil uji menunjukkan bahwa variasi campuran 16% *fly ash* dan 4% semen dengan waktu pemeraman 7 hari menghasilkan kuat dukung ultimit (q_u) sebesar 1305,03 kN/m² dan daya dukung izin (q_{all}) sebesar 435,01 kN/m² pada kedalaman 0,75 meter. Nilai tersebut cukup untuk menahan beban aksial rumah tinggal dua lantai sebesar 273,83 kN/m², sehingga campuran ini dinyatakan efektif dalam meningkatkan kualitas tanah lempung ekspansif.

Kata Kunci: *Fly ash*; Pondasi; Semen; *Stabilizing agent*; Tanah lempung ekspansif

Abstract

The stability of a building is highly influenced by the strength of its foundation and the bearing capacity of the supporting soil. Changes in moisture content due to alternating rainy and dry seasons in tropical regions like Indonesia can affect soil volume, particularly in expansive clay soils. This research aims to enhance the load-bearing capacity of clay soil through stabilization methods by adding variations of cement and *fly ash*, both of which are included as *stabilizing agents*. The soil samples were taken from Kebonsari Village, Summersari District, Jember Regency, and are classified as expansive clay under group A-7-6 based on AASHTO and CH based on the USCS classification. The test results indicate that a mixture of 16% *fly ash* and 4% cement with a curing period of 7 days produces an ultimate bearing capacity (q_u) of 1305.03 kN/m² and an allowable bearing capacity (q_{all}) of 435.01 kN/m² at a foundation depth of 0.75 meters. These values are sufficient to support the axial load of a two-story residential building of 273.83 kN/m², indicating that this mixture is effective in enhancing the engineering properties of expansive clay soil..

Keywords: *Fly ash*; Foundation; Cement; *Stabilizing agent*; Expansive Clay Soil

1. PENDAHULUAN

Negara Indonesia, sebagai negara berkembang yang menopang populasi terbesar keempat di dunia, dihadapkan pada ketersediaan lahan yang terbatas, yang sebagian besar disebabkan oleh kepadatan penduduknya yang semakin meningkat. Menurut (Onggara, 2022), lahan ideal untuk pembangunan rumah semakin sulit ditemukan, sehingga sering kali tersisa tanah dengan daya dukung rendah. Kekuatan pondasi dan kemampuan tanah dalam mendukung beban struktur sangat penting untuk mendirikan bangunan yang stabil. Posisi geografis Indonesia di zona tropis menjadikannya memiliki dua musim dominan, yaitu hujan dan kemarau. Perputaran musim ini secara periodik mengakibatkan tanah mengalami kondisi kering dan basah, yang berimplikasi pada perubahan volume tanah akibat variasi kadar airnya.

Kajian karakteristik tanah penting dilakukan untuk menjamin kestabilan struktur, mengingat daya dukung tanah sangat memengaruhi kemampuan pondasi dalam menahan beban. Tanah lempung, yang termasuk jenis tanah dengan daya dukung rendah, memiliki sifat kompleks dan sensitif terhadap kadar air, yang memengaruhi perilaku kembang-susut serta kohesinya. Lempung dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yakni ekspansif dan non-ekspansif, tergantung pada bagaimana mereka bereaksi terhadap perubahan kadar air (Hangge *et al.*, 2021).

Tanah lempung ekspansif di Kelurahan Kebonsari, Kecamatan Sumbersari, Jember, dikenal karena perubahan volumenya yang signifikan akibat fluktuasi kadar air. Lempung ini akan mengembang saat lembap dan menyusut ketika kering, sebuah perilaku yang berpotensi menyebabkan kerusakan pada struktur bangunan (Setyono *et al.*, 2018). Sistem klasifikasi tanah USCS dan AASHTO mengelompokkan tanah berdasarkan ukuran butir dan plastisitasnya. Tanah dianggap ekspansif jika memiliki Batas Cair (LL) di atas 50, yang menunjukkan plastisitas tinggi dan potensi perubahan volume signifikan (mengembang-menyusut). Karakteristik ini membuat tanah rentan terhadap pergeseran,

yang dapat merusak struktur bangunan seperti menyebabkan lantai tidak rata, dinding retak, pondasi terangkat, hingga jalan bergelombang (Surjandari *et al.*, 2021).

Salah satu pendekatan untuk mengatasi masalah tanah lempung ekspansif adalah dengan stabilisasi tanah. Metode ini berupaya meningkatkan daya dukung, kepadatan, dan kuat tekan bebas tanah. Prosesnya melibatkan penambahan bahan stabilisasi, seperti semen dan fly ash. Dalam studi ini, para peneliti menggunakan tanah asli yang dicampur dengan semen serta fly ash kelas C yang berasal dari PLTU Paiton, yang diketahui memiliki kandungan CaO lebih dari 10% berdasarkan hasil uji XRF (Angdiarto *et al.*, 2018). Semen adalah produk industri, sedangkan fly ash merupakan limbah dari pembakaran batu bara. Jika tidak dimanfaatkan, fly ash ini berpotensi mencemari lingkungan. Menariknya, kedua bahan ini memiliki sifat pozzolanik, yang berarti mereka dapat mengeras ketika bereaksi dengan air, sehingga efektif dalam meningkatkan stabilitas tanah (Hariyanto & Jatmiko, 2021).

Berdasarkan pembahasan sebelumnya, riset ini bertujuan untuk menilai dampak penambahan material stabilisasi terhadap peningkatan daya dukung pondasi dangkal pada tanah lempung ekspansif. Tanah ini umum dipakai untuk pembangunan rumah tinggal dua lantai. Latar belakang penelitian ini berangkat dari pentingnya memahami sifat tanah lempung ekspansif yang sering memicu masalah teknis dalam konstruksi karena sifat kembang-empisnya. Salah satu strategi perbaikan yang diupayakan adalah dengan mencampurkan bahan stabilisasi seperti *fly ash* dan semen, yang diharapkan dapat meningkatkan kualitas tanah dari segi kekuatan dan stabilitasnya.

Dengan demikian, fokus utama dalam penelitian ini mencakup dua aspek, yaitu: pengaruh sifat fisik tanah lempung terhadap klasifikasinya berdasarkan sistem AASHTO dan USCS, serta pengaruh variasi komposisi campuran *fly ash*, semen, dan tanah lempung ekspansif terhadap nilai kuat tekan bebas (q_u). Penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik tanah di lokasi

studi, baik dari sisi fisik maupun mekanis, menganalisis efek stabilisasi terhadap peningkatan kekuatan tanah, serta menentukan komposisi campuran optimal yang mampu meningkatkan daya dukung pondasi untuk konstruksi bangunan dua lantai secara lebih efektif.

Adapun ruang lingkup penelitian ini mencakup pengambilan sampel tanah terganggu dari Desa Kebonsari, Kecamatan Sumbersari, Kabupaten Jember pada kedalaman ± 50 –100 cm, dengan identifikasi tanah ekspansif berdasarkan nilai indeks plastisitas. Penelitian ini tidak menguji sifat kimia tanah. Fly ash yang dipakai adalah tipe C yang didapatkan dari PT PLN Nusantara Power Paiton. Untuk karakterisasi tanah, dilakukan beberapa pengujian laboratorium, meliputi kadar air, berat jenis, batas Atterberg, dan gradasi tanah (melalui analisis ayakan dan hidrometer). Selain itu, kepadatan tanah diuji menggunakan metode Proctor Modified. Variasi komposisi campuran yang diteliti adalah tanah:fly ash:semen dengan perbandingan 0%:11%, 16%, dan 21%:4%. Pengujian kuat tekan bebas dilakukan dengan metode *Unconfined Compression Test* (UCT). Analisis daya dukung pondasi dihitung berdasarkan teori Terzaghi dan pemodelan pembebanan dilakukan dengan bantuan aplikasi SAP2000. Penelitian ini tidak mencakup pengujian terhadap potensi pengembangan dan penurunan tanah, serta tidak melakukan perhitungan biaya. Studi ini juga dibatasi pada analisis bangunan rumah tinggal dua lantai sederhana dengan tinggi maksimal 7 meter dan kedalaman pondasi 0,75 meter tanpa mempertimbangkan tulangan struktur.

2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Tanah Lempung Ekspansif

Tanah lempung ekspansif adalah jenis tanah yang mampu berubah volume secara drastis, mengembang atau menyusut, bergantung pada jumlah air yang dikandungnya. Ketika tanah ini menyerap air, partikel-partikelnya akan memisah, mengakibatkan pengembangan dan penurunan daya dukung. Sebaliknya, saat tanah

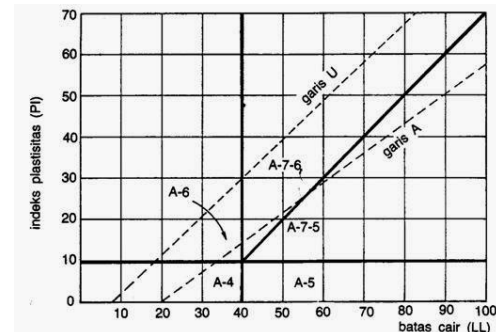
mengering, ia akan menyusut, yang dapat menimbulkan retakan pada permukaan dan meningkatkan daya dukungnya (Hardiyatmo, 2010).

B. Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

1. AASTHO

Sistem Klasifikasi AASTHO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) adalah metode standar untuk mengevaluasi kualitas tanah dalam perencanaan konstruksi jalan, termasuk material untuk lapisan *subbase* dan *subgrade* (Setiyanto *et al.*, 2021). Sistem ini mengategorikan tanah menjadi delapan kelompok utama, dari A-1 hingga A-8. Penentuan kualitas tanah dalam klasifikasi ini didasarkan pada perhitungan indeks kelompok (Group Index/GI), yang dihitung dengan rumus empiris spesifik. **Gambar 1.** memperlihatkan garis pemisah antara batas cair dan indeks plastis pada klasifikasi tanah dalam kelompok tersebut.



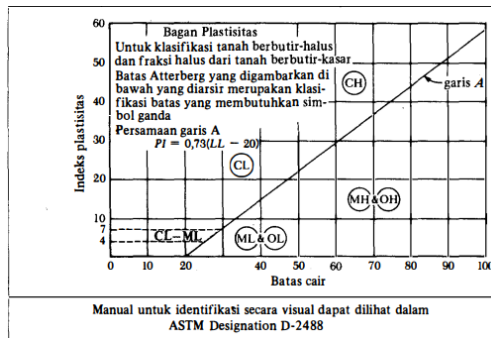
Gambar 1. Klasifikasi Tanah menurut AASTHO.

Sumber: Das, 1995

2. USCS

USCS (*Unified Soil Classification System*) adalah standar yang digunakan untuk mengklasifikasikan jenis tanah berdasarkan ukuran butir dan plastisitasnya. Sistem ini membagi tanah ke dalam dua kategori utama: tanah berbutir kasar (seperti kerikil dan pasir) dan tanah halus (yaitu lanau dan lempung). Selain itu, USCS juga menggunakan simbol tambahan seperti ML, CL, OL,

MH, CH, dan OH untuk menunjukkan karakteristik dominan dari tanah tersebut (Hardiyatmo, 2002). Klasifikasi ini sangat membantu dalam menentukan stabilitas, kekuatan, dan kelayakan tanah. Untuk menentukan klasifikasinya dapat menggunakan **Gambar 2.** dibawah ini.



Gambar 2. Klasifikasi Tanah menurut USCS
Sumber: Das, 1995

C. Pengujian Sifat Fisik

1. Kadar Air

Kadar air (w) didefinisikan sebagai rasio antara massa air yang terkandung dalam sampel tanah dengan massa tanah keringnya (yaitu, massa partikel padat saja) (Das, 1995).

2. Spesific Gravity (Gs)

Specific Gravity (G_s) adalah perbandingan antara massa jenis partikel padat tanah dengan massa jenis air yang diukur pada suhu standar, umumnya 4°C (Hardiyatmo, 2002).

3. Batas-batas Konsistensi Tanah

Atterberg menjelaskan bahwa perubahan sifat tanah halus dipengaruhi oleh kadar air, melalui konsep batas cair (LL), batas plastis (PL), dan batas susut (SL) sebagai indikator utama perilaku plastisitas tanah (Hardiyatmo, 2002).

4. Pembagian Butir

Ukuran partikel tanah sangat memengaruhi klasifikasinya, sehingga uji analisis pembagian butir penting dilakukan. Uji ini bertujuan mengetahui sebaran ukuran partikel

tanah. Dua metode utama yang digunakan adalah analisis saringan dan analisis hidrometer.

5. Uji Pemadatan

Pemadatan merupakan proses meningkatkan kerapatan tanah dengan cara mengurangi rongga udara di antara partikel melalui pemberian energi mekanis, sehingga butiran tanah lebih rapat dan tanah menjadi lebih stabil (Bulang, 2016). Hasilnya berupa kurva yang menggambarkan hubungan antara kadar air dan berat volume kering maksimum tanah.

D. Pengujian Sifat Mekanis

1. Unconfine Compression Test

Uji kuat tekan bebas adalah metode umum untuk menilai karakteristik kekuatan tanah kohesif, terutama dalam konteks stabilisasi. Pengujian ini bertujuan mengetahui seberapa besar tekanan yang dapat ditahan tanah tanpa mengalami keruntuhan atau lepasnya ikatan antar partikel. Selama pengujian, tanah diberi beban tekan secara bertahap hingga terjadi kegagalan, dan nilai kekuatannya dicatat (AMANIA *et al.*, 2022).

E. Stabilitas Tanah

Stabilisasi tanah umumnya dilakukan dengan menambahkan bahan stabilizer atau agen penstabil yang dapat meningkatkan kekuatan dan kestabilan tanah. Bahan-bahan ini meliputi semen, kapur, *fly ash*, dan bahan kimia lainnya yang bekerja dengan cara memperbaiki struktur partikel tanah, mengurangi plastisitas, serta meningkatkan daya ikat antar butiran. Pemilihan jenis stabilizer disesuaikan dengan karakteristik tanah dan tujuan perbaikan yang diinginkan (Joni *et al.*, 2024).

F. Fly ash

Fly ash adalah partikel abu-abu halus yang terbentuk dari proses pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap. Material ini bersifat pozzolanik, artinya mampu bereaksi dengan kapur dan air untuk menghasilkan

senyawa yang kuat dan stabil. Komponen utamanya meliputi silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), oksida besi (Fe_2O_3), dan kalsium oksida (CaO). Berkat karakteristik ini, *fly ash* sering dimanfaatkan dalam pekerjaan teknik sipil sebagai bahan stabilisasi, khususnya untuk meningkatkan kualitas tanah lempung ekspansif.

G. Semen

Semen adalah bahan pengikat yang mampu merekatkan partikel mineral menjadi massa padat dan kuat. Secara umum, semen terbagi menjadi dua kategori: semen hidrolis dan non-hidrolis. Semen hidrolis memiliki kemampuan untuk mengeras melalui reaksi kimia dengan air dan mempertahankan stabilitasnya bahkan saat terpapar kelembapan. Contoh paling umum dari jenis ini adalah semen Portland, yang diproduksi dari campuran batu kapur kaya kalsium (CaO) dan tanah liat yang mengandung silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), serta oksida besi (Fe_2O_3). Bahan-bahan ini kemudian dibakar dalam tungku pada suhu sekitar 14°C . (Andriani *et al.*, 2012).

H. Daya Dukung Tanah

Pada teknik pondasi, terdapat berbagai metode untuk menghitung daya dukung pondasi dangkal. Salah satu metode yang paling sering dipakai adalah metode Terzaghi (1943), yang didasarkan pada asumsi keruntuhan geser umum (*general shear failure*). Dalam modelnya, Terzaghi mengandaikan fondasi berbentuk memanjang tak terbatas dengan lebar B , yang berada di atas tanah homogen. (Aisah & Dhiniati, 2023).

Pondasi berbentuk persegi atau lingkaran, kapasitas daya dukung maksimum tanah pada kondisi keruntuhan geser setempat dapat dihitung dengan mempertimbangkan geometri spesifik pondasi tersebut, dengan rumus:

$$q_{ult} = 1,3 c N_c + D_f \gamma N_q + 0,4 \gamma B N_\gamma \quad (1)$$

dengan:

Q_u = Daya dukung ultimate (kN/m^2)
 c = Kohesi tanah
 B = Lebar pondasi (m)
 q = Tekanan overburden efektif (kN/m^2)
 N_c, N_q, N_γ = Faktor kapasitas

Setelah diperoleh nilai daya dukung ultimit (Q_u), nilai daya dukung izin ditentukan dengan membaginya terhadap faktor keamanan (*Safety Factor*).

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{SF} \quad (2)$$

3. METODE PENELITIAN

A. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Tanah, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember. Sementara itu, pengambilan sampel tanah dan pengumpulan data dilakukan di Desa Kebonsari, Kecamatan Summersari, Kabupaten Jember.

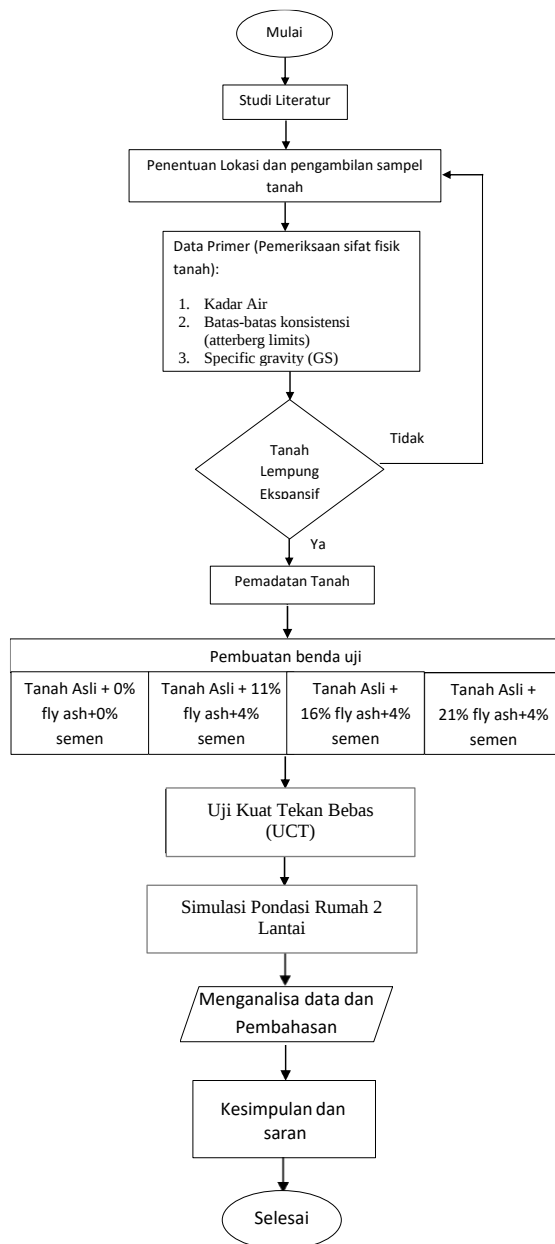


Gambar 3. Lokasi Penelitian

Sumber: Google Earth, 2024

B. Diagram Alir

Bagan alir penelitian merupakan komponen penting yang menggambarkan tahapan pelaksanaan penelitian secara sistematis. Alur penelitian dalam studi ini ditampilkan pada **Gambar 4.** berikut



Gambar 4. Diagram Alir
Sumber: Anlisa Penulis, 2024

C. Pembuatan Benda Uji

Pencampuran tanah dilakukan dengan menambahkan *fly ash* dan semen dalam beberapa variasi komposisi sesuai persentase yang telah ditentukan sebelumnya. Persentase tersebut merujuk pada hasil penelitian terdahulu yang kemudian dikembangkan dengan variasi berbeda. Jumlah *fly ash* dan semen ditentukan berdasarkan berat kering tanah. Rincian mengenai berbagai komposisi

campuran *fly ash* dan semen akan disajikan lebih lanjut pada **Tabel 1.** berikut.

Tabel 1. Variasi Campuran

Jenis Sampel	Komposisi
Variasi I	Tanah Asli + 0% Semen + 0% <i>Fly ash</i>
Variasi II	Tanah Asli + 4% Semen + 11% <i>Fly ash</i>
Variasi III	Tanah Asli + 4% Semen + 16% <i>Fly ash</i>
Variasi IV	Tanah Asli + 4% Semen + 21% <i>Fly ash</i>

Sumber: Analisa Penulis, 2025

Komposisi campuran *fly ash* dan semen pada pengujian *Unconfined Compression Test* (UCT) dibuat sedikit berbeda karena melibatkan proses curing selama 7 dan 14 hari. Selama periode ini, sampel disimpan dalam toples kaca untuk menjaga kestabilan kadar air serta memberikan waktu yang cukup bagi tanah, *fly ash*, dan semen untuk bereaksi

4. PEMBAHASAN

A. Karakteristik Tanah Asli

Tanah asli di daerah Kebonsari, Summersari, Jember memiliki ciri khas warna hitam saat basah dan abu-abu kehitaman saat kering, serta menjadi keras dan padat saat mengering. Hasil uji laboratorium menunjukkan parameter penting seperti kadar air, kepadatan, GS, batas Atterberg, gradasi, dan kuat tekan bebas, yang berperan penting dalam menentukan kelayakan tanah untuk konstruksi. Berikut adalah hasil pengujian karakteristik tanah dapat dilihat pada **Tabel 2.**

Tabel 2. Karakteristik Tanah Asli

	Parameter	Hasil	Satuan
A	Sifat-sifat fisik		
	Kadar air (w)	33,22	%
	Berat spesifik (Specific Gravity)	2,69	%
	Betas cair (Liquid Limit)	62,53	%
	Batas plastis (Plastic Limit)	27,08	%
	Batas susut (Shrinkage Limit)	28,61	%

Indeks plastisitas (<i>Plasticity Index</i>)	35,44	%
Butiran lolos saringan No. 200 (butiran halus)	56,22	%
B Sifat-sifat mekanis		
Kadar air optimum	25,98	%
Berat volume kering maksimum	1,32	%
Nilai daya dukung tanah (q_u)	0,71	(kg/cm ²)
Nilai kohesi undrained tanah (c_u)	0,35	(kg/cm ²)

Sumber: Hasil Penelitian, 2025

Merujuk pada Tabel 4.1, sifat fisik tanah menunjukkan bahwa tanah termasuk dalam kategori lempung kohesif dengan tingkat plastisitas tinggi, ditandai oleh nilai indeks plastisitas yang >17 .

B. Klasifikasi Tanah Asli

Karakteristik jenis tanah ditentukan berdasarkan sistem klasifikasi *American Association of State Highway and Transportation* (AASHTO) dan *Unified Soil Classification System* (USCS).

1. Klasifikasi Tanah menurut AASHTO

Berdasarkan kriteria klasifikasi tanah AASHTO, tanah asli di area studi ini masuk kategori A-7-6. Klasifikasi ini didapat karena persentase butiran halus yang melewati saringan No. 200 setidaknya 35%, nilai batas cair (LL) ≥ 41 , dan indeks plastisitas (PI) minimum 17. Tanah dalam kelompok ini umumnya memiliki karakteristik yang kurang stabil dan cenderung mengalami penyusutan yang signifikan ketika terjadi perubahan kadar air.

2. Klasifikasi Tanah menurut USCS

Penentuan jenis tanah dilakukan dengan memplot nilai batas cair (*Liquid Limit/LL*) dan indeks plastisitas (*Plasticity Index/PI*) ke dalam diagram plastisitas. Berdasarkan hasil pemetaan pada Plasticity Chart, titik data dari tanah di lokasi penelitian terletak di atas garis A, serta berada pada wilayah dengan nilai batas cair lebih dari 50%.

Hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa nilai LL mencapai 62,53%, sedangkan nilai PI sebesar 35,44%, yang berarti lebih dari 17. Berdasarkan klasifikasi yang disebutkan, tanah ini tergolong dalam kelompok CH, yang mengindikasikan bahwa ini adalah tanah lempung anorganik dengan tingkat plastisitas yang tinggi.

Tanah berbutir halus seperti ini umumnya memiliki plastisitas yang tinggi, yang dapat memengaruhi daya dukung dan kestabilan struktur bangunan. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi lanjutan untuk menjamin keamanan dan keberlanjutan dalam pelaksanaan proyek infrastruktur di atas tanah tersebut.

C. Stabilitas Tanah dengan *Fly ash* dan Semen

Dalam penelitian ini, uji kuat tekan bebas (*Unconfined Compression Test* atau UCT) dilakukan untuk menentukan besarnya tegangan geser tanah. Pengujian dilakukan pada sampel tanah yang distabilisasi dengan penambahan semen sebesar 4% secara tetap, serta variasi *fly ash* sebesar 11%, 16%, dan 21%. Dari hasil uji tersebut diperoleh nilai daya dukung tanah (q_u) serta nilai kohesi tidak terdrainase (c_u), yang dihitung sebagai setengah dari nilai q_u ($c_u = \frac{1}{2} q_u$). Hasil lengkap dari uji UCT dapat dilihat pada Lampiran 8 hingga 14, sedangkan ringkasan karakteristik tanah tersaji pada **Tabel 3**.

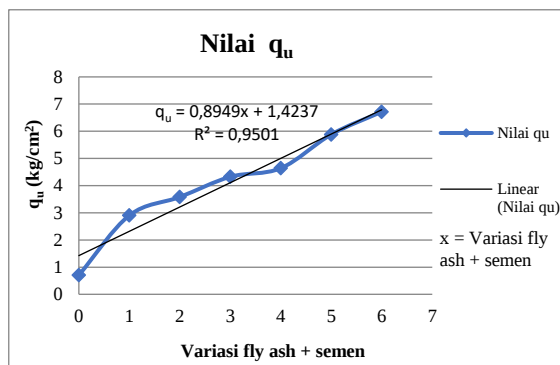
Tabel 3. Hasil Kuat Tekan Bebas (UCT)

No	Sampel	q_u (kg/c m ²)	c_u (kg/c m ²)
0	Tanah Asli	0,71	0,35
1	Semen 4% + 11% <i>fly ash</i> (Waktu curing 7 Hari)	2,90	1,45
2	Semen 4% + 16% <i>fly ash</i> (Waktu curing 7 Hari)	3,58	1,79
3	Semen 4% + 21% <i>fly ash</i> (Waktu curing 7 Hari)	4,33	2,16

- | | | | |
|---|--|------|------|
| 4 | Semen 4% + 11% <i>fly ash</i> (Waktu curing 14 Hari) | 4,64 | 2,32 |
| 5 | Semen 4% + 16% <i>fly ash</i> (Waktu curing 14 Hari) | 5,88 | 2,94 |
| 6 | Semen 4% + 21% <i>fly ash</i> (Waktu curing 14 Hari) | 6,72 | 3,36 |

Sumber: Hasil Penelitian, 2025

Berdasarkan data pada tabel, dapat disimpulkan bahwa peningkatan kadar semen dan *fly ash* memberikan dampak positif terhadap nilai daya dukung tanah (q_u) dan kohesi tidak terdrainase (c_u). Kedua parameter tersebut mengalami peningkatan yang signifikan bila dibandingkan dengan tanah dalam kondisi alami. Perkembangan nilai daya dukung tanah (q_u) akibat variasi stabilisasi ini dapat dilihat secara visual pada **Gambar 5.** dan **Gambar 6.**

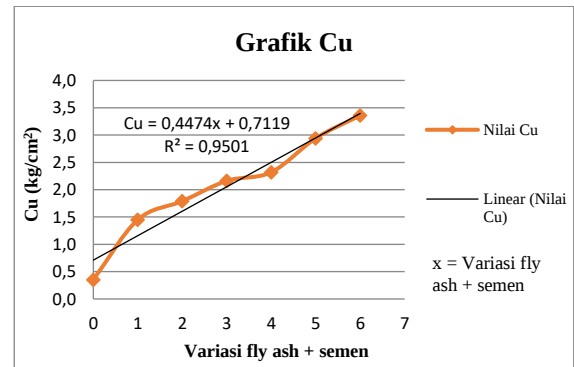


Gambar 5. Grafik q_u

Sumber: Hasil Penelitian, 2025

Berdasarkan grafik yang ditampilkan, garis tren menunjukkan adanya hubungan positif yang jelas, di mana peningkatan kombinasi antara *fly ash* dan semen berbanding lurus dengan kenaikan nilai daya dukung tanah (q_u). Hubungan ini digambarkan melalui persamaan linier $y=0,8949x+1,4237$, yang mencerminkan keterkaitan langsung antara variabel x dan y . Nilai 0,8949 merupakan gradien garis, yang berarti setiap kenaikan satu satuan pada kombinasi *fly ash* dan semen akan meningkatkan nilai q_u sebesar kurang lebih 0,8949 kg/cm². Sementara itu, angka 1,4237 adalah titik potong sumbu Y , yang

menunjukkan nilai awal q_u saat tidak ada penambahan bahan stabilisasi ($x = 0$).



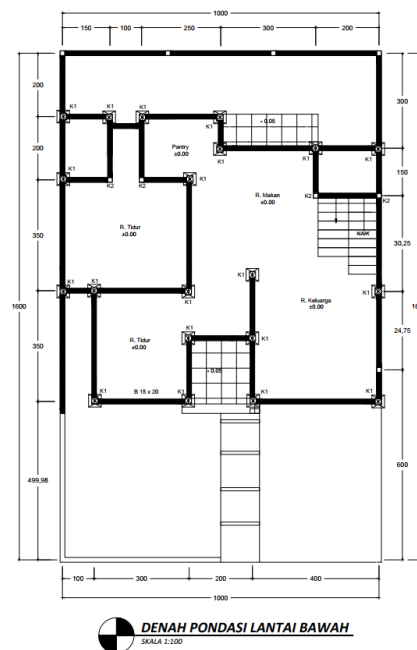
Gambar 6. Grafik C_u

Sumber: Hasil Penelitian, 2025

Keakuratan model ini diperkuat oleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 95,01%, yang mengindikasikan bahwa sekitar 95% variasi dalam nilai q_u dipengaruhi oleh penambahan *fly ash* dan semen. Sisanya, sebesar 4,99%, diperkirakan berasal dari variabel lain di luar kedua bahan tersebut.

D. Pemodelan Struktur

Denah bangunan yang disajikan pada **Gambar 7.** memperlihatkan susunan tata letak serta pembagian ruang secara detail dan sistematis.



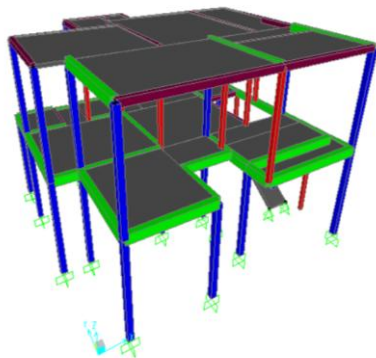
Gambar 7. Denah Pondasi

Sumber: Hasil Penelitian, 2025

Adapun Spesifikasi jenis material yang digunakan pada konstruksi bangunan rumah tinggal 2 lantai ini antara lain:

1. Pondasi yang digunakan adalah Pondasi footplate dengan dimensi:
P1 = 100 x 100 cm
2. Kolom beton yang digunakan dengan dimensi:
K1 = 20 x 20 cm
Kp = 15 x 15 cm
3. Balok yang digunakan dengan dimensi:
B1 = 15 x 20 cm
B2 = 20 x 30 cm
4. Plat lantai tebal 12 cm, Plat atap tebal 10 cm.
5. Mutu pada beton yang digunakan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut:
 - a. Beton K250 : Digunakan pada pondasi Footplate, kolom, dan balok
6. Mutu pada baja beton yang digunakan untuk proyek rumah tinggal 2 lantai adalah:
 - a. BJTS 40 (Besi utama)
 - b. BJTP 24 (Sengkang)
7. Modulus Elastisitas Baja Tulangan = 200000 Mpa
8. Modulus Elastisitas Beton = $4700 \sqrt{f_c'} = 21409,52 \text{ Mpa}$

Berdasarkan denah yang telah ditentukan, pemodelan struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak SAP2000 v.14 dengan memasukkan spesifikasi material yang sesuai dengan perencanaan, semua data pembebanan dan parameter gempa. Hasil pemodelan tersebut dapat dilihat pada **Gambar 8.** berikut



Gambar 8. Permodelan pada SAP2000
Sumber: Hasil Penelitian, 2025

E. Hasil Input Pembebanan

Setelah semua data pembebanan dan parameter gempa dimasukkan ke dalam perangkat lunak SAP2000 versi 14, serta seluruh jenis beban diinput ke dalam model struktur, diperoleh hasil berupa reaksi tumpuan (*joint reaction*). Hasil ini digunakan untuk mengetahui besarnya beban maksimum dari struktur atas yang diterima oleh masing-masing pondasi. Beban tertinggi ditemukan pada sambungan (*joint*) 84:

$$\begin{aligned} P (F3) &: 273,825 \text{ kN} \\ M1 &: 11,119 \text{ kN-m} \\ M2 &: 5,403 \text{ kN-m} \end{aligned}$$

F. Perhitungan Daya Dukung Pondasi Footplate

Menurut Terzaghi (1943) dalam kutipan Muda (2016), kapasitas daya dukung ultimit pondasi dangkal berbentuk bujur sangkar dapat dihitung menggunakan persamaan (1) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} q_u &= 1,3 c N_c + D_f \gamma N_q + 0,4 \gamma B N_\gamma \\ &= 1,3 \times 34,51 \times 1 + 0,75 \times 1,66 \times 0 + \\ &\quad 0,4 \times 1,66 \times 1 \times 5,71 \\ &= 198,87 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan daya dukung dengan beberapa perbandingan variasi sampel dapat dilihat pada tabel **Tabel 4.** dibawah ini :

Tabel 4. Presentase daya dukung dan q_{all} (izin)

Variasi sampel	Daya Dukung (kN/m ²)	q_{all} (izin) (kN/m ²)
Tanah Asli	198,87	66,29
Semen 4% + 11% fly ash (Waktu curing 7 Hari)	1057,90	352,63
Semen 4% + 16% fly ash (Waktu curing 7 Hari)	1305,03	435,01
Semen 4% + 21% fly ash (Waktu curing 7 Hari)	1575,43	525,14
Semen 4% + 11% fly ash (Waktu curing 14 Hari)	1690,34	563,45
Semen 4% + 16% fly ash (Waktu curing 14 Hari)	2142,48	714,16
Semen 4% + 21% fly ash (Waktu curing 14 Hari)	2446,55	815,52

Sumber: Hasil Penelitian, 2025

G. Kontrol Tegangan Tanah

Kontrol terhadap tegangan tanah diperlukan guna menjamin kestabilan struktur dan keandalannya dalam jangka panjang. Proses ini berfungsi untuk mengevaluasi respons tanah terhadap beban yang diterima, memastikan daya dukung tanah mencukupi, serta memprediksi besarnya penurunan yang mungkin terjadi. Oleh karena itu, perancangan pondasi dapat dimaksimalkan supaya memenuhi aspek keamanan dan efisiensi biaya. Perhitungan yang digunakan disajikan sebagai berikut:

1. Perhitungan eksentrisitas
Pada evaluasi eksentrisitas terhadap sumbu x maupun sumbu y, disyaratkan bahwa nilai eksentrisitas $e_x < B/6$ dan $e_y < L/6$, sebagaimana ditunjukkan pada perhitungan berikut:
Cek $e_x = 0,04 \text{ m} < 0,17 \text{ m}$ (terpenuhi)

- Cek $e_y = 0,02 \text{ m} < 0,17 \text{ m}$ (terpenuhi)
2. Tegangan yang terjadi pada Pondasi

$$q_{\max} = \frac{Pu}{A} + \frac{Mux}{Wx} + \frac{Muy}{Wy} + q$$

$$= \frac{273,825}{1} + \frac{11,1193}{0,17} + \frac{5,4031}{0,17} + 4,13$$

$$= 377,089 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{\max} < q_u \rightarrow \text{AMAN (OK)} (\text{Untuk metode Terzaghi})$$
 3. Tegangan tanah minimum yang terjadi pada pondasi

$$q_{\min} = \frac{Pu}{A} - \frac{Mux}{Wx} - \frac{Muy}{Wy} + q$$

$$= \frac{273,825}{1} - \frac{11,1193}{0,17} - \frac{5,4031}{0,17} + 4,13$$

$$= 178,821 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{\min} > 0 \rightarrow \text{AMAN (Tidak terjadi tegangan)}$$

Hasil perhitungan dan nilai-nilai yang diperoleh secara keseluruhan dapat diakses dan diperiksa secara detail pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Hasil Kontrol Tegangan

No.	Variasi sampel tanah	q max (kN/m ²)	q min (kN/m ²)	q izin (kN/m ²)	q _{max} < q izin	q _{min} > 0
0	Tanah Asli	377,089	177,50	66,29	TRY AGAIN	OK!
1	Semen 4% + 11% <i>fly ash</i> (Waktu curing 7 Hari)	377,089	177,50	352,63	TRY AGAIN	OK!
2	Semen 4% + 16% <i>fly ash</i> (Waktu curing 7 Hari)	377,089	177,50	435,01	OK!	OK!
3	Semen 4% + 21% <i>fly ash</i> (Waktu curing 7 Hari)	377,089	177,50	525,14	OK!	OK!
4	Semen 4% + 11% <i>fly ash</i> (Waktu curing 14 Hari)	377,089	177,50	563,45	OK!	OK!
5	Semen 4% + 16% <i>fly ash</i> (Waktu curing 14 Hari)	377,089	177,50	714,16	OK!	OK!
6	Semen 4% + 21% <i>fly ash</i> (Waktu curing 14 Hari)	377,089	177,50	815,52	OK!	OK!

Sumber: Hasil Penelitian, 2025

Berdasarkan data yang disajikan dalam tabel, terlihat bahwa pada variasi campuran ke-0 dan ke-1, nilai tegangan izin tanah (qizin) masing-masing sebesar 66,29 kN/m² dan 352,63 kN/m². Sementara itu, tegangan maksimum (qmaks) yang terjadi pada pondasi mencapai 377,089 kN/m². Kondisi ini menunjukkan ketidaksesuaian, karena nilai qmaks melebihi qizin, yang berarti pondasi tidak mampu menahan beban bangunan dua lantai pada kedua variasi campuran tersebut.

Sebaliknya, pada variasi campuran ke-2 hingga ke-6, terjadi peningkatan signifikan

pada nilai qizin, yaitu masing-masing sebesar 435,01 kN/m², 525,14 kN/m², 563,45 kN/m², 714,16 kN/m², dan 815,52 kN/m². Seluruh nilai qizin tersebut lebih besar dari qmaks, yang mengindikasikan bahwa variasi campuran tersebut mampu mendukung beban struktur secara aman.

Sehingga variasi campuran *fly ash* 16% + semen 4% dengan waktu curing 7 hari menunjukkan paling efektif dalam meningkatkan daya dukung tanah dan mampu menahan beban aksial rumah tinggal 2 lantai di atasnya.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berikut adalah beberapa kesimpulan yang didapatkan dari uraian hasil penelitian dan pembahasan yang telah dipaparkan sebelumnya:

1. Karakteristik fisik tanah lempung, seperti batas cair (LL), indeks plastisitas (PI), dan persentase material yang melewati saringan No. 200, memiliki pengaruh krusial dalam proses klasifikasi jenis tanah. Berdasarkan metode AASHTO, tanah di lahan Desa Kebonsari tergolong dalam kelompok A-7-6 karena memiliki nilai $LL > 41\%$, $PI > 17\%$, dan persen lolos saringan No. 200 $> 35\%$, yang menunjukkan tanah lempung dengan daya dukung rendah. Sementara itu, berdasarkan klasifikasi USCS, tanah tersebut tergolong dalam kelompok CH, yang mengidentifikasikannya sebagai lempung anorganik dengan tingkat plastisitas tinggi. Kedua sistem klasifikasi ini menunjukkan bahwa tanah di lokasi tersebut bersifat ekspansif dan kurang stabil terhadap perubahan kadar air.
2. Berbagai komposisi campuran fly ash dan semen menunjukkan dampak positif terhadap kuat tekan bebas (q_u) pada tanah lempung ekspansif. Penambahan kedua bahan tersebut mampu meningkatkan sifat mekanis tanah secara signifikan, yang ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 95,01%. Artinya, 95% peningkatan nilai q_u disebabkan oleh penambahan fly ash dan semen, sedangkan sisanya sebesar 4,99% dipengaruhi oleh faktor lain. Komposisi terbaik dalam penelitian ini diperoleh pada campuran 16% fly ash dan 4% semen dengan waktu curing selama 7 hari, menghasilkan nilai q_u sebesar 1305,03 kN/m² dan q_{all} sebesar 435,01 kN/m² pada kedalaman 0,75 meter. Nilai tersebut cukup untuk menahan beban aksial bangunan rumah

tinggal dua lantai sebesar 273,83 kN/m², sehingga kombinasi stabilisasi tersebut dinilai efektif dalam meningkatkan daya dukung tanah lempung ekspansif.

B. Saran

Berikut adalah beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya:

1. Jika melihat tanah dilokasi penelitian ini yang merupakan jenis tanah lempung ekspansif, maka perlu juga diteliti penggunaan stabilisasi tanah dengan memakai fly ash dan semen terhadap penurunan lapisan tanah (*Consolidation Settlement*) untuk memastikan kinerja jangka panjang.
2. Penelitian lebih lanjut dapat menggunakan bahan *Stabilizing agent* lain untuk variasi penambahannya.
3. Melihat bahwa pada variasi kedua dalam penelitian ini sudah mampu menahan beban aksial rumah tinggal dua lantai, maka disarankan pada penelitian selanjutnya untuk menguji jenis bangunan yang lebih besar seperti gedung bertingkat, rumah susun, dan sejenisnya.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Aisah, E., & Dhiniati, F. 2023. Kapasitas Daya Dukung Pondasi Dangkal dengan Teori Terzaghi dan Mayerhof. *Konstruksia*, 15 (1):127.
- AMANIA, A., Sarie, F., & Okrobianus, O. 2022. Pengaruh Penambahan Pasir Sirkon, Abu Kayu Dan Fly Ash Pada Tanah Lempung Terhadap Daya Dukung Dan Kuat Geser Tanah. *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi)*, 3 (2):63-70.
- Andriani, A., Yuliet, R., & Fernandez, F. L. 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.
- Angdiarto, S. P., Thomas, C. N., Hardjito, D., & Ash, F. 2018. Pengaruh Variasi Water/Fly Ash Ratio Dan Metode Pencampuran kalsium Pada Pasta 100 % Fly Ash Tipe

- C. *Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 7 (2):59-66.
- Bulang, A. P. 2016. Pengaruh Penggunaan Semen Sebagai Bahan Stabilisasi Tanah Lunak Desa Matang Panyang Terhadap Kuat Geser. *Teras Jurnal*, 6 (1), 57–65.
- Das, B. M. 1995. *Mekanika Tanah Jilid 1(Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik*. Edisi 1. Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Hangge, E. E., Bella, R. A., & Ullu, M. C. 2021. Pemanfaatan Fly Ash Untuk Stabilisasi Tanah Dasar Lempung Ekspansif. *Jurnal Teknik Sipil*. 10 (1): 89–102.
- Hardiyatmo, H. C. 2002. *Mekanika Tanah I Jilid III*. Edisi 3. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H. C. 2010. *Mekanika Tanah H C Hardiyatmo*. Edisi 5. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Hariyanto, H., & Jatmiko, S. 2021. Pengaruh Penggunaan Semen Sebagai Bahan Stabilisasi Tanah Lempung Lunak Di Daerah Grobogan Purwodadi. *Jurnal Ilmiah Teknosains*. 7 (1). 44–51.
- Joni, Y., Yusuf, A. R., & Setiawan, A. 2024. Analisis Penggunaan Renolith Dan Fly Ash Terhadap Kuat Tekan Bebas Dan Kuat Geser Pada Tanah Lempung. *Jurnal Penelitian Teknik Sipil Konsolidasi*. 2 (3): 294-302.
- Onggara, Y. F., Tjandra, D., & Suwono, J. I. 2022. Analisa Stabilisasi Tanah Lunak Dengan Campuran Portland Cement Dan Fly Ash Untuk Diaplikasikan Pada Bangunan Rumah Tinggal 2 Lantai. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 11 (2):230–237.
- Setiyanto, T. T., Yamali, F. R., & Setiawan, A. 2021. Tinjauan Karakteristik Tanah Timbunan Sumber Bahan Di Desa Mendalo Darat Kecamatan Jambi Luar Kota. *Jurnal Talenta Sipil*. 4 (2):176.
- Setyono, E., Sunarto, S., & Wirasetiyo, K. 2018. Pengaruh Bahan Tambah Fly Ash Terhadap Karakteristik Tanah Lempung Ekspansif Di Daerah Dringu Kabupaten Probolinggo. *Jurnal Media Teknik Sipil*. 16 (1): 29-34.
- Surjandari, N. S., Fitri, S. N., Djarwanti, N., Purwana, Y. M., Bambang, S., Indrabaskara, R. H. D. H., & Prakosa, B. B. 2021. *Kajian Potensi Kembang Susut Tanah Ekspansi di Beberapa Wilayah Solo Ray*. Edisi 1. Widina Bhakti Persada. Bandung.