E-ISSN : 3025-1311
https://ejournal.warunayama.org/kohesi

Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek
Volume 10 No 8 Tahun 2026

STABILISASI TANAH LEMPUNG DENGAN CAMPURAN KAPUR DAN ABU SEKAM TERHADAP DAYA DUKUNG PADA LOKASI MEDAYU SURABAYA

Arik Triarso[1] , Mochamad Fariz[2]
[1]Program Studi D4 Teknik Sipil, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Jln. Ketintang, Surabaya.

E-mail : ariktriarso@unesa.ac.id, mochamad.19081@mhs.unesa.ac.id

Abstrak

Tanah lempung ekspansif di kawasan Medayu, Surabaya menunjukkan daya dukung rendah yang menyebabkan distorsi struktural pada bangunan. Penelitian ini mengkaji efektivitas stabilisasi tanah menggunakan kombinasi kapur dan abu sekam padi terhadap peningkatan daya dukung melalui pengujian California Bearing Ratio (CBR). Metode eksperimental diterapkan dengan variasi campuran abu sekam padi 0%, 15%, 30%, dan 45% dengan kapur tetap 10%. Karakterisasi tanah asli menghasilkan batas cair 86%, batas plastis 65,77%, indeks plastisitas 20,23%, dan nilai CBR 0,05%. Hasil pengujian menunjukkan komposisi optimum tercapai pada campuran 30% abu sekam padi dengan 10% kapur, menghasilkan peningkatan nilai CBR hingga 67,47% pada penetrasi 0,1 inci dan 74,93% pada penetrasi 0,2 inci. Peningkatan daya dukung terjadi melalui reaksi pozzolanik antara silika amorf abu sekam dengan kalsium hidroksida membentuk kalsium silikat hidrat yang bersifat cementitious. Campuran 45% abu sekam menurunkan efektivitas stabilisasi menjadi 26,24% dan 33,97% akibat ketidakseimbangan stoikiometrik. Penelitian memvalidasi pemanfaatan limbah agroindustri sebagai material stabilisasi berkelanjutan untuk perbaikan tanah ekspansif pada konstruksi infrastruktur.

***Kata Kunci**: Abu sekam padi, California Bearing Ratio, kapur, stabilisasi tanah, tanah lempung ekspansif*

Abstract

Expansive clay soil in the Medayu area, Surabaya exhibits low bearing capacity causing structural distortion in buildings. This research examines the effectiveness of soil stabilization using a combination of lime and rice husk ash on bearing capacity improvement through California Bearing Ratio (CBR) testing. Experimental methods were applied with variations of rice husk ash mixtures at 0%, 15%, 30%, and 45% with constant 10% lime. Characterization of original soil yielded liquid limit of 86%, plastic limit of 65.77%, plasticity index of 20.23%, and CBR value of 0.05%. Test results indicate optimum composition achieved at 30% rice husk ash mixture with 10% lime, producing CBR value increase up to 67.47% at 0.1-inch penetration and 74.93% at 0.2-inch penetration. Bearing capacity improvement occurs through pozzolanic reaction between amorphous silica from rice husk ash and calcium hydroxide forming calcium silicate hydrate with cementitious properties. The 45% rice husk ash mixture decreased stabilization effectiveness to 26.24% and 33.97% due to stoichiometric imbalance. The research validates utilization of agroindustrial waste as sustainable stabilization material for expansive soil improvement in infrastructure construction.

***Keywords**: California Bearing Ratio, expansive clay soil, lime, rice husk ash, soil stabilization*

Article History
Received: Januari 2026
Reviewed: Januari 2026
Published: Januari 2026

Plagiarism Checker No 826
Prefix DOI : Prefix DOI : 10.8734/Kohesi.v1i2.365
Copyright : Author
Publish by : Kohesi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

PENDAHULUAN

Tanah lempung ekspansif merupakan problematika geoteknik yang signifikan dalam pelaksanaan konstruksi infrastruktur. Material ini memiliki karakteristik plastisitas tinggi, daya dukung rendah, serta sensitivitas terhadap fluktuasi kadar air yang menyebabkan fenomena pengembangan dan penyusutan volumetrik. Kondisi demikian berpotensi menimbulkan distorsi struktural pada bangunan yang didirikan di atasnya. (Kusuma, Mina and Hasibuan, 2017) menegaskan bahwa tanah berperan krusial sebagai landasan fundamental dalam konstruksi gedung, jalan, bendungan, dan jembatan, sehingga memerlukan karakteristik teknis memadai untuk menjamin stabilitas struktural jangka panjang.

Fenomena kerusakan struktural akibat ketidakstabilan tanah lempung teramati di kawasan Medayu, Surabaya, dimana terdapat bangunan residensial yang mengalami distorsi geometris sebelum penyelesaian konstruksi. Observasi lapangan mengindikasikan bahwa tanah dasar di lokasi tersebut tersusun atas lempung dengan konsistensi sangat lunak yang tidak memenuhi persyaratan teknis sebagai lapisan pendukung. (Landangkasiang *et al.*, 2020) menjelaskan bahwa stabilisasi tanah merupakan intervensi rekayasa untuk meningkatkan kapasitas dukung melalui modifikasi sifat fisiko-mekanik dengan penambahan material aditif seperti kapur, semen, atau fly ash. Pendekatan stabilisasi kimiawi dipilih karena mampu mengubah karakteristik fundamental tanah melalui reaksi pozzolanik yang menghasilkan produk sementasi stabil.

Kapur telah terbukti efektif sebagai agen stabilisasi tanah lempung melalui mekanisme pertukaran kation dan reaksi pozzolanik. (Candra *et al.*, 2018) melaporkan bahwa kapur lebih ekonomis dan efisien dibandingkan semen dalam meningkatkan nilai California Bearing Ratio (CBR) serta mereduksi sifat kembang-susut tanah lempung. Ion kalsium yang terlepas dari kapur memperkuat ikatan antarpartikel mineral lempung, sehingga mengurangi potensi ekspansif. (Hangge, Bella and Ullu, 2021) menambahkan bahwa kapur memberikan sifat cementitious ketika bereaksi dengan air, menghasilkan pengerasan dan peningkatan kekuatan struktural tanah.

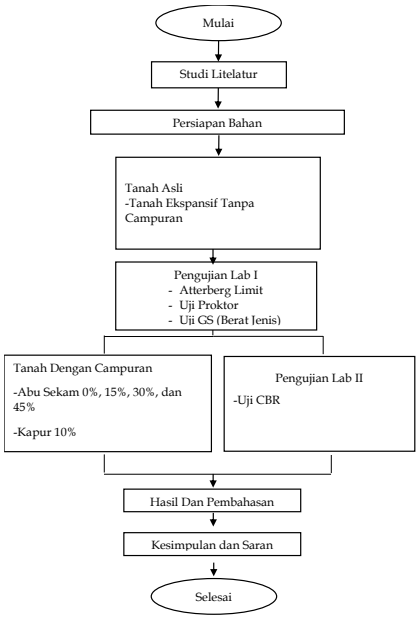
Abu sekam padi merupakan limbah agroindustri yang mengandung silika amorf tinggi dengan aktivitas pozzolanik signifikan. (Raharja, 2013) mengidentifikasi bahwa abu sekam mengandung senyawa silika (SiO_2) yang membentuk massa padat tidak larut dalam air ketika bereaksi dengan kapur pada suhu ambient. (Utami, 2016) melaporkan bahwa penambahan abu sekam dapat mereduksi indeks plastisitas dari 41,25% menjadi 0,96% pada kadar 12-12,5%, serta meningkatkan nilai CBR dari 3,03% menjadi 16,3%. Pemanfaatan abu sekam sebagai material stabilisasi memberikan nilai tambah ekonomis dan ekologis melalui utilisasi limbah pertanian.

Penelitian ini mengkaji efektivitas kombinasi kapur dan abu sekam padi dalam menstabilisasi tanah lempung ekspansif dari kawasan Medayu, Surabaya. Rumusan masalah yang diangkat adalah bagaimana pengaruh penambahan kapur dan abu sekam terhadap daya dukung tanah lempung, serta berapa komposisi optimum abu sekam yang memberikan hasil stabilisasi terbaik. Tujuan penelitian adalah mengevaluasi peningkatan kekuatan tanah lempung setelah diberi campuran kapur dan abu sekam, serta menentukan komposisi paling efektif dalam meningkatkan stabilitas tanah. Penelitian menggunakan metode eksperimental dengan variasi campuran abu sekam 0%, 15%, 30%, dan 45% dengan kapur tetap 10% sebagai variabel kontrol. Parameter yang

dievaluasi meliputi batas Atterberg, kepadatan maksimum dan kadar air optimum melalui uji Proctor, nilai CBR, serta berat jenis spesifik tanah. Hasil penelitian diharapkan memberikan kontribusi praktis bagi pengembangan kawasan Medayu yang sedang mengalami transformasi menjadi zona permukiman dan komersial, serta memperluas basis pengetahuan dalam bidang stabilisasi tanah untuk aplikasi konstruksi infrastruktur.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk mengidentifikasi hubungan kausal antara variasi proporsi abu sekam padi terhadap karakteristik geoteknik tanah lempung yang distabilisasi dengan kapur. Sampel tanah lempung ekspansif diambil dari Jalan Medayu, Surabaya, pada lokasi yang menunjukkan indikasi distorsi struktural bangunan. Prosedur pengambilan sampel dilakukan dengan mengeliminasi lapisan topsoil hingga kedalaman 5-10 cm menggunakan sekop mini untuk menghindari kontaminasi material organik, kemudian penggalian dilanjutkan untuk memperoleh sampel tanah representatif yang disimpan dalam wadah tertutup dengan pelabelan identifikasi.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Desain eksperimental mencakup empat variasi komposisi dengan massa tanah konstan 3000 gram per spesimen, yaitu tanah asli tanpa campuran (kontrol), tanah dengan abu sekam 15% dan kapur 10%, tanah dengan abu sekam 30% dan kapur 10%, serta tanah dengan abu sekam 45% dan kapur 10%. Abu sekam diperoleh dari hasil pembakaran sekam padi yang dikeringkan dan diayak untuk menjamin uniformitas ukuran partikel. Kapur yang digunakan berbentuk kapur tohor atau kapur hidrat dengan kandungan kalsium oksida atau kalsium hidroksida.

Karakterisasi tanah asli dilakukan melalui serangkaian pengujian laboratorium di Laboratorium Transport Universitas Negeri Surabaya. Uji batas Atterberg menggunakan mangkuk Casagrande untuk menentukan batas cair pada 25 pukulan dan metode penggulung manual untuk batas plastis pada diameter 3 mm. Uji pemadatan Proctor standar dilakukan dengan tiga lapis pemadatan dan 25 tumbukan per lapis menggunakan hammer Proctor untuk menentukan kepadatan kering maksimum dan kadar air

optimum. Uji CBR dilaksanakan dengan metode perendaman selama 96 jam menggunakan beban surcharge, diikuti penetrasi dengan kecepatan 1,27 mm/menit. Pengukuran berat jenis spesifik menggunakan piknometer dengan metode ekstraksi udara melalui perebusan dan stabilisasi suhu ruang. Seluruh data hasil pengujian dianalisis secara komparatif untuk mengevaluasi efektivitas stabilisasi dan menentukan komposisi optimum yang memberikan peningkatan daya dukung maksimal terhadap tanah lempung ekspansif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Plastic Limit

Pengujian batas plastis bertujuan menentukan kadar air minimum dimana tanah masih memperlihatkan sifat plastis. Prosedur pengujian mengacu pada SNI 1966:2008 dengan menggunakan tanah lolos saringan No. 40. Sampel tanah dibentuk menjadi gulungan silinder berdiameter 3 mm hingga mulai retak, kemudian kadar air ditentukan melalui pengeringan oven.

Tabel 1. Hasil Uji Plastic Limit

Test No	Parameter	Satuan	1	2	3	4
-	No Cawan	-	2	5	6	10
W1	Berat cawan kosong (W1)	gr	16.79	16.77	16.68	16.75
W2	Berat cawan kosong + Tanah basah (W2)	gr	18.06	18.09	18.28	18.23
W3	Berat cawan + Tanah basah (W3)	gr	17.56	17.56	17.63	17.66
W2-W3	Berat Air, (W2-W3)	gr	0.5	0.53	0.65	0.57
W3-W1	Berat tanah kering (W3-W1)	gr	0.77	0.79	0.95	0.91
-	Kadar air, W (W2-W3)/(W3-W1)X100	%	64.94	67.09	68.42	62.64
-	Batas Plastis (Plastic Limit), PL =	-	-	-	65.77	-

Berdasarkan hasil pengujian pada empat sampel, diperoleh nilai batas plastis rata-rata sebesar 65,77%. Nilai ini mengindikasikan bahwa tanah lempung ekspansif dari lokasi Medayu memiliki kandungan mineral lempung yang cukup tinggi, yang berkontribusi terhadap sifat plastisitas signifikan ketika bercampur dengan air.

Nilai Indeks Plastisitas

Indeks plastisitas merupakan parameter krusial untuk mengklasifikasikan tanah berbutir halus dan mengevaluasi potensi pengembangan volumetrik. Nilai ini diperoleh dari selisih antara batas cair dan batas plastis yang telah ditentukan sebelumnya.

Tabel 2. Hubungan Indeks Plastisitas terhadap Potensial Pengembangan

Indeks Plastisitas (%)	Potensi Pengembangan
0-15	Rendah
15-35	Sedang
20-55	Tinggi
>35	Sangat tinggi

Hasil perhitungan menunjukkan indeks plastisitas sebesar 20,23%, yang diperoleh dari pengurangan nilai liquid limit 86% dengan plastic limit 65,77%. Berdasarkan sistem klasifikasi Unified Soil Classification System (USCS), nilai indeks plastisitas di atas 7% mengindikasikan tanah dengan kandungan lempung tinggi dan potensi pengembangan yang signifikan. Nilai ini menegaskan perlunya stabilisasi untuk meningkatkan karakteristik geoteknik tanah.

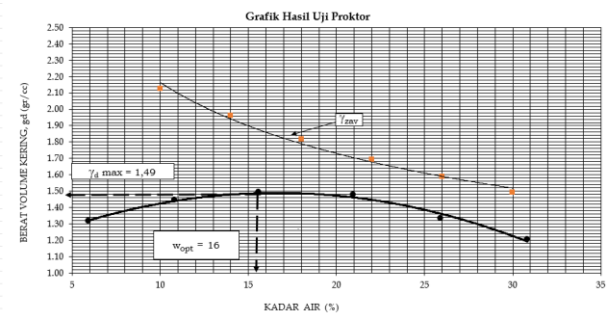
Hasil Pengujian Proctor

Pengujian pemadatan standar dilakukan untuk menentukan hubungan antara kadar air dan kepadatan kering tanah pada energi pemadatan tertentu. Prosedur mengikuti metode Proctor standar dengan tiga lapis pemadatan dan 25 tumbukan per lapis menggunakan massa tanah 2500 gram untuk setiap variasi kadar air.

Tabel 3. Hasil Uji Proctor

Test No	Satuan	1	2	3	4	5	6
Penambahan Air (%)	-	5	10	15	20	25	30
No cawan	-	1	2	3	4	5	6
Berat cawan (W1)	gr	16.74	16.66	16.77	16.66	16.72	16.74
Berat cawan + tanah basah (W2)	gr	23.89	27.42	23.51	22.83	23.52	26.39
Berat cawan + tanah kering (W3)	gr	23.49	26.37	24.53	21.76	22.12	23.33
Berat Mold, (W4)	gr	1700	1700	1700	1700	1700	1700
Berat Mold + tanah basah (W5)	gr	2983	3174	3287	3343	3245	3152
Berat tanah basah (W5-W4)	gr	1283	1474	1587	1643	1545	1452
Volume Mold, V	cm^3	921.03	921.03	921.03	921.03	921.03	921.03
Berat volume, γ = (W5-W4)/V	gr/cm^3	1.393	1.600	1.723	1.784	1.677	1.576
Berat air, W_2 - W_3	gr	0.4	1.05	1.98	20.97	23.93	30.63
Berat volume kering, γd	gr/cm^3	1.315	1.444	1.490	1.475	1.332	1.205
w, untuk mencari kadar γd	-	10	14	15	20	26	30
Kadar air, w = (W_2-W_3)/W_3	gr/cm^3	2.128	1.961	1.818	1.695	1.587	1.493

Pengujian dilaksanakan dengan variasi kadar air 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, dan 30%. Setiap variasi menghasilkan nilai berat volume kering yang berbeda, dimana peningkatan kadar air awalnya meningkatkan kepadatan hingga mencapai titik optimum, kemudian menurun pada kadar air yang lebih tinggi.



Gambar 2. Grafik Hubungan Kadar Air dan Berat Volume Kering

Berdasarkan kurva pemadatan, diperoleh kadar air optimum sebesar 16% dengan berat volume kering maksimum 1,49 gr/cm³. Nilai kadar air optimum ini selanjutnya digunakan sebagai parameter standar dalam persiapan benda uji CBR untuk memastikan konsistensi kondisi pemadatan pada seluruh variasi campuran stabilisasi.

Hasil Pengujian GS

Pengujian berat jenis spesifik dilakukan menggunakan metode piknometer sesuai prosedur standar untuk tanah berbutir halus. Sampel tanah seberat 10 gram lolos saringan No. 40 dimasukkan ke dalam piknometer, kemudian direndam selama 24 jam dan dipanaskan untuk mengeliminasi udara terperangkap sebelum pengukuran akhir.

Tabel 4. Hasil Pengujian Berat Jenis

Test No	Satuan	1	2	3
No Piknometer	-	A1	A2	A3
Berat piknometer kosong, (W1)	gr	78.82	77.29	79.79
Berat piknometer + tanah kering, (W2)	gr	88.62	87.09	89.6
Berat piknometer + tanah kering + air, (W3)	gr	182.75	181.54	184.05
Temperatur campuran tanah + air, (T1)	°C	31	31	31
Berat piknometer + air, (W4)	gr	177.05	175.18	177.63
Berat tanah kering, (W2-W1)	gr	9.8	9.8	9.81
Volume isi tanah, (W4)+(W2-W1)-(W3)	cc	4.10	3.44	3.39
Gs (pada 71 °C)=(W2-W1)/(W4)+(W2-W1)-(W3)	gr/cc	2.390	2.849	2.894
Koreksi, K	-	0.9972	0.9972	0.9972
Gs (pada 20 °C)=Gs (pada T1 °C) x K =	gr/cc	2.384	2.841	2.886
Gs (pada 20 °C) rata-rata =	gr/cc		2.703	

Pengujian menggunakan tiga sampel identik menghasilkan nilai berat jenis spesifik rata-rata 2,703 gr/cm³ setelah dikoreksi dengan faktor K sebesar 0,9972. Nilai berat jenis yang relatif tinggi mengindikasikan komposisi mineral padat dengan kandungan oksida besi atau mineral berat lainnya dalam struktur tanah lempung ekspansif.

Hasil Pengujian CBR

Pengujian CBR rendam dilaksanakan sesuai SNI 1744:2012 untuk mengevaluasi daya dukung tanah setelah stabilisasi dengan kombinasi abu sekam padi dan kapur. Setiap benda uji menggunakan 3000 gram tanah dengan kadar air optimum 17%, dipadatkan dalam mold CBR dengan 56 tumbukan per lapis untuk tiga lapis, kemudian direndam selama 96 jam sebelum penetrasi.

Tabel 5. Hubungan Beban (Penetrasi)

Waktu (menit)	Penetrasi		Pembacaan arloji		Beban (lb)		CBR
	mm	in	Atas	Bawah	Atas	Bawah	%
0	0	0	0	-	0	-	
15	0.32	0.025	0.3	-	0.3	-	
30	0.64	0.025	0.5	-	0.5	-	
60	1.27	0.05	1	-	1	-	
90	1.91	0.075	1.3	-	1.3	-	
120	2.54	0.10	1.5	-	1.5	-	0.05
180	3.81	0.15	1.9	-	1.9	-	
240	5.08	0.20	2	-	2	-	0.04
360	7.62	0.30	2.3	-	2.3	-	
480	10.16	0.40	2.5	-	2.5	-	
600	12.70	0.50	2.60	-	2.6	-	

Tanah tanpa campuran menghasilkan nilai CBR 0,05% pada penetrasi 0,1 inci dan 0,04% pada penetrasi 0,2 inci, mengindikasikan daya dukung sangat rendah yang tidak memenuhi kriteria konstruksi. Hasil ini mengkonfirmasi kondisi awal tanah ekspansif yang memerlukan perbaikan sebelum digunakan sebagai lapisan pendukung struktur.

Tabel 6. Hubungan Beban (Penetrasi) 15% Abu Sekam 10% Kapur

Waktu (menit)	Penetrasi		Pembacaan arloji		Beban (lb)		CBR
	mm	in	Atas	Bawah	Atas	Bawah	%
0	0	0	0	-	0	-	
15	0.32	0.025	1	-	1	-	
30	0.64	0.025	1.3	-	1.3	-	
60	1.27	0.05	1.5	-	1.5	-	
90	1.91	0.075	2	-	2	-	
120	2.54	0.10	3	-	3	-	0.10
180	3.81	0.15	5	-	5	-	
240	5.08	0.20	8	-	8	-	0.18
360	7.62	0.30	16	-	16	-	
480	10.16	0.40	25	-	25	-	
600	12.70	0.50	36	-	36	-	

Penambahan 15% abu sekam dengan 10% kapur meningkatkan nilai CBR menjadi 0,10% dan 0,18% untuk penetrasi 0,1 dan 0,2 inci berturut-turut. Peningkatan ini menunjukkan bahwa reaksi pozzolanik antara silika abu sekam dan kapur mulai memberikan efek penguatan terhadap struktur tanah melalui pembentukan produk sementasi awal.

Tabel 7. Hubungan Beban (Penetrasi) 30% Abu Sekam 10% Kapur

Waktu (menit)	Penetrasi		Pembacaan arloji		Beban (lb)		CBR
	mm	in	Atas	Bawah	Atas	Bawah	%
0	0	0	0	-	0	-	
15	0.32	0.025	3.9	-	3.9	-	
30	0.64	0.025	5	-	5	-	

60	1.27	0.05	6	-	6	-	
90	1.91	0.075	8	-	8	-	
120	2.54	0.10	9	-	9	-	0.30
180	3.81	0.15	11	-	11	-	
240	5.08	0.20	15	-	15	-	0.33
360	7.62	0.30	25	-	25	-	
480	10.16	0.40	40	-	40	-	
600	12.7	0.50	55	-	55	-	

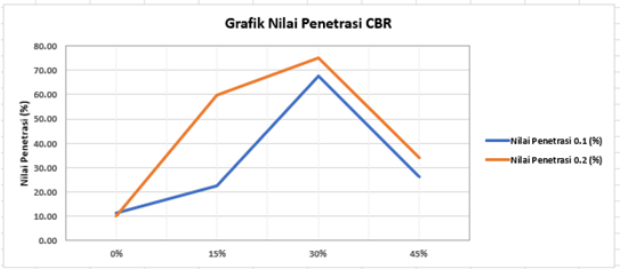
Peningkatan paling signifikan terjadi pada campuran 30% abu sekam dengan 10% kapur, menghasilkan nilai CBR 0,30% dan 0,33%, menunjukkan peningkatan daya dukung hampir enam kali lipat dibandingkan tanah asli. Komposisi ini mencapai keseimbangan optimal antara silika amorf dari abu sekam dan ion kalsium dari kapur untuk menghasilkan kalsium silikat hidrat maksimum yang memperkuat ikatan antarpartikel tanah.

Penambahan abu sekam hingga 45% dengan 10% kapur justru menurunkan nilai CBR menjadi 0,12% dan 0,15%, mengindikasikan bahwa proporsi berlebihan mengurangi efektivitas stabilisasi akibat ketidakseimbangan reaksi pozzolanik. Kelebihan abu sekam yang tidak bereaksi dengan kapur tersedia berfungsi sebagai filler inert yang melemahkan struktur tanah terstabilisasi.

Perbandingan komprehensif nilai CBR untuk seluruh variasi campuran pada kedua tingkat penetrasi standar. Data tabulasi mengkonfirmasi bahwa terdapat hubungan non-linear antara proporsi abu sekam dengan nilai CBR, dimana peningkatan kadar abu sekam tidak selalu menghasilkan peningkatan daya dukung proporsional. Pola kurva parabola dengan puncak pada kadar 30% abu sekam menunjukkan pentingnya optimasi komposisi untuk mencapai efektivitas stabilisasi maksimal.

Nilai Penetrasi

Perhitungan nilai penetrasi menggunakan beban standar sesuai ketentuan pengujian CBR, yaitu 13,34 kN untuk penetrasi 0,1 inci dan 20,02 kN untuk penetrasi 0,2 inci. Hasil konversi menunjukkan pola peningkatan konsisten dimana tanah tanpa campuran menghasilkan CBR 11,24% dan 9,99% untuk kedua tingkat penetrasi. Campuran 15% abu sekam menghasilkan nilai 22,49% dan 59,97%, sementara campuran optimum 30% abu sekam mencapai nilai maksimum 67,47% dan 74,93%.



Gambar 3. Grafik Penetrasi

Grafik memperlihatkan kurva parabola dengan puncak pada kadar 30% abu sekam, dimana setelah titik ini terjadi penurunan hingga nilai 26,24% dan 33,97% pada campuran 45% abu sekam. Pola ini mengkonfirmasi bahwa terdapat proporsi optimum dalam stabilisasi tanah lempung menggunakan kombinasi abu sekam dan kapur.

Pembahasan

Analisis komprehensif terhadap seluruh data pengujian mengindikasikan bahwa stabilisasi tanah lempung ekspansif menggunakan kombinasi kapur dan abu sekam padi memberikan peningkatan signifikan terhadap daya dukung tanah. Mekanisme peningkatan ini terjadi melalui dua jalur reaksi simultan, yaitu pertukaran kation dan reaksi pozzolanik. (Palar, 2013) menjelaskan bahwa kapur bereaksi dengan air tanah mengubah sifat fisiko-kimia tanah, mengurangi kelunakan dan kelekatan, serta mereduksi sifat ekspansif akibat perubahan kadar air. Ion kalsium dari kapur menggantikan ion natrium dan kalium pada permukaan partikel lempung, menghasilkan flokulasi yang memperkuat ikatan antarpartikel. Secara paralel, abu sekam yang mengandung silika amorf bereaksi dengan kalsium hidroksida membentuk kalsium silikat hidrat yang bersifat cementitious, sebagaimana dikonfirmasi oleh (Widhiarto *et al.*, 2015) bahwa pozzolan membentuk massa padat ketika bereaksi dengan kapur pada kondisi menguntungkan.

Kurva beban-penetrasi pada pengujian CBR memperlihatkan perilaku non-linear yang karakteristik untuk tanah terstabilisasi. (Abdurrozak *et al.*, 2017) menyatakan bahwa tanah yang telah diperbaiki menunjukkan respons non-linear ketika mengalami beban penetrasi akibat perubahan hubungan antarpartikel. Pada tahap awal penetrasi 0,1 inci, peningkatan beban relatif kecil karena deformasi didominasi penutupan rongga pori dan penyesuaian struktural partikel tanah yang belum terkonsolidasi sempurna sesuai SNI 1744:2012. Seiring peningkatan penetrasi, efek stabilisasi mulai dominan menghasilkan kurva melengkung ke atas yang mengindikasikan peningkatan resistensi tanah terhadap penetrasi piston.

Hasil penelitian menunjukkan komposisi optimum pada campuran 30% abu sekam dengan 10% kapur yang menghasilkan peningkatan nilai CBR hingga 560% dibandingkan tanah asli. Temuan ini sejalan dengan penelitian Rifqi Abdurrozak dan Nurfathiyah (Widorini, 2020) yang melaporkan peningkatan CBR dari 3,03% menjadi 16,3% dengan penambahan abu sekam. Penurunan nilai CBR pada proporsi 45% abu sekam mengindikasikan ketidakseimbangan stoikiometrik reaksi pozzolanik, dimana kelebihan silika tidak dapat bereaksi optimal dengan kapur yang tersedia, menghasilkan akumulasi partikel abu sekam tidak terikat yang justru melemahkan struktur tanah. Fenomena ini menegaskan pentingnya optimasi proporsi material stabilisasi untuk mencapai efektivitas maksimal dalam aplikasi perbaikan tanah konstruksi.

SIMPULAN

Penelitian eksperimental stabilisasi tanah lempung ekspansif dari kawasan Medayu, Surabaya menggunakan kombinasi kapur dan abu sekam padi telah berhasil mengidentifikasi komposisi optimum untuk meningkatkan daya dukung tanah secara signifikan. Karakterisasi tanah asli menunjukkan nilai batas cair 86%, batas plastis 65,77%, dan indeks plastisitas 20,23% yang mengindikasikan sifat ekspansif tinggi dengan daya dukung rendah. Nilai *California Bearing Ratio* (CBR) tanah asli hanya mencapai 0,05% pada penetrasi 0,1 inci dan 0,04% pada penetrasi 0,2 inci, mengkonfirmasi ketidakmampuan tanah untuk mendukung beban konstruksi tanpa intervensi stabilisasi. Hasil pengujian CBR rendam dengan variasi campuran membuktikan bahwa penambahan abu sekam padi dan kapur memberikan peningkatan daya dukung substansial melalui mekanisme reaksi pozzolanik. Komposisi optimum

tercapai pada campuran 30% abu sekam padi dengan 10% kapur, menghasilkan nilai CBR 67,47% pada penetrasi 0,1 inci dan 74,93% pada penetrasi 0,2 inci, menunjukkan peningkatan hingga 560% dibandingkan kondisi tanah asli. Peningkatan ini disebabkan oleh pembentukan kalsium silikat hidrat yang bersifat *cementitious* dari reaksi silika amorf abu sekam dengan kalsium hidroksida kapur, serta pertukaran kation yang memperkuat ikatan antarpartikel mineral lempung.

Kontribusi unik penelitian ini terletak pada validasi empiris penggunaan limbah agroindustri abu sekam padi sebagai material stabilisasi berkelanjutan yang ekonomis dan ekologis untuk perbaikan tanah ekspansif di wilayah Surabaya. Temuan bahwa proporsi abu sekam melebihi 30% justru menurunkan efektivitas stabilisasi memberikan wawasan praktis mengenai batas optimal reaksi pozzolanik dalam aplikasi geoteknik, dimana campuran 45% abu sekam menghasilkan penurunan nilai CBR menjadi 26,24% dan 33,97% akibat ketidakseimbangan stoikiometrik. Penelitian ini memperluas basis pengetahuan stabilisasi tanah lempung ekspansif dan menyediakan solusi teknis aplikatif untuk pengembangan infrastruktur di kawasan dengan kondisi tanah dasar bermasalah.

Berdasarkan temuan penelitian, beberapa rekomendasi diajukan untuk pengembangan studi lanjutan dan aplikasi praktis di lapangan. Pertama, perlu dilakukan investigasi mendalam terhadap mekanisme mikrostruktural reaksi pozzolanik antara abu sekam padi dan kapur menggunakan instrumen *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi produk hidrasi kalsium silikat secara kuantitatif. Kedua, evaluasi durabilitas jangka panjang tanah terstabilisasi melalui pengujian siklus basah-kering (*wet-dry cycles*) dan beku-cair (*freeze-thaw cycles*) diperlukan untuk menjamin kestabilan struktural dalam kondisi lingkungan ekstrem.
Ketiga, penelitian variasi proporsi kapur dengan interval lebih rapat antara 5% hingga 15% dapat mengoptimalkan efisiensi penggunaan material stabilisasi. Keempat, studi komparatif menggunakan jenis abu sekam dari varietas padi berbeda perlu dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh kandungan silika terhadap efektivitas stabilisasi. Kelima, implementasi uji coba skala lapangan (*field trial*) pada segmen jalan di kawasan Medayu sangat direkomendasikan untuk validasi aplikabilitas teknis dan ekonomis sebelum adopsi massal dalam proyek konstruksi infrastruktur. Pengembangan pedoman teknis standardisasi stabilisasi tanah ekspansif menggunakan abu sekam padi juga diperlukan untuk memfasilitasi transfer teknologi kepada praktisi konstruksi dan instansi pemerintah terkait perencanaan pembangunan di wilayah dengan problematika geoteknik serupa.

REFERENSI

Abdurrozak, M.R. *et al.* (2017) “Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Bahan Tambah Abu Sekam Padi Dan Kapur Pada Subgrade Perkerasan Jalan,” XXII(2), pp. 416–424.

Candra, A.I. *et al.* (2018) “Studi kasus stabilitas struktur tanah lempung pada jalan totok kerot kediri menggunakan limbah kertas 1,” 2(2), pp. 88–97.

Hangge, E.E., Bella, R.A. and Ullu, M.C. (2021) “Pemanfaatan Fly Ash Untuk Stabilisasi Tanah Dasar Lempung Ekspansif,” 10(1), pp. 89–102.

Kusuma, R.I., Mina, E. and Hasibuan, R. (2017) “STABILISASI TANAH LEMPUNG DENGAN MENGGUNAKAN PASIR LAUT DAN PENGARUHNYA TERHADAP NILAI CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO) (Studi Kasus : Jalan Desa Mangkualam Kecamatan Cimanggu – Kab. Pandeglang).”

Landangkasiang, F.N. *et al.* (2020) “Analisis geoteknik tanah lempung terhadap

penambahan limbah gypsum," 8(2), pp. 197–204.

Palar, H. (2013) "Pengaruh pencampuran tras dan kapur pada lempung ekspansif terhadap nilai daya dukung," 1(6), pp. 390–399.

Raharja, S. (2013) "Pengaruh Penggunaan Abu Sekam Padi Sebagai Bahan Pengganti Sebagian Semen Terhadap Kuat Tekan Dan Modulus Elastisitas Beton Kinerja Tinggi," 1(4), pp. 503–510.

Utami, G.S. (2016) "Analisis Pemanfaatan Kapur Sebagai Bahan Stabilisasi Tanah Lempung Ditinjau Dari Kuat Geser," pp. 1–8.

Widhiarto, H. *et al*. (2015) "Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif Dengan Menggunakan Campuran Abu-Sekam Dan Kapur," 01(02), pp. 135–140.

Widorini, T. (2020) "Analisis Perbandingan Stabilisasi Tanah Asli Dengan Hasil Pre Boring Pada Proyek Menara Universitas Semarng Dengan Campuran Pasir Dan Kapur Untuk Meningkatkan Daya Dukung Tanah," 06(2019).