

Analisis Perbandingan Penggunaan Bioenzim Dan Abu Kayu Sebagai Bahan Stabilisasi Tanah Lempung

Bagus Maisur Alwi^{1*}, Wiji Lestarini², Ahmad Alfin³

^{1,2,3}Program Studi Arsitektur, Universitas Sains Al-Qur'an, Wonosobo, Indonesia

^{1*}bagus.maisur888@gmail.com, ²lestariniw@yahoo.co.id, ³ahmad.alfin140494@gmail.com

Artikel dimasukkan: 28-7-2026, Artikel direvisi: 19-8-2026, Artikel diterbitkan: 30-9-2026

Abstrak

Tanah lempung merupakan jenis tanah yang sering menimbulkan masalah pada konstruksi jalan karena karakteristiknya yang memiliki daya dukung rendah, plastisitas tinggi, serta sifat kembang-susut yang besar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan efektivitas penggunaan Bioenzim Organik dan Abu Kayu sebagai bahan stabilisasi tanah lempung yang diambil dari Desa Jono, Kecamatan Tawangharjo, Kabupaten Grobogan. Lokasi tersebut dipilih karena kondisi jalannya yang mengalami kerusakan serius berupa retakan hingga amblas. Metode penelitian dilakukan melalui pengujian laboratorium dengan variasi penambahan campuran Bioenzim Organik sebesar 0,03%, 0,04%, dan 0,05%, serta variasi Abu Kayu sebesar 12,5%, 15%, dan 17,5%. Pengujian yang dilakukan meliputi uji sifat fisik (analisa butiran dan batas-batas Atterberg) serta uji sifat mekanik melalui pemadatan (Standard Proctor) dan California Bearing Ratio (CBR). Hasil pengujian menunjukkan bahwa kedua bahan tersebut efektif dalam memperbaiki karakteristik tanah lempung. Penggunaan Bioenzim Organik mampu menurunkan nilai indeks plastisitas tanah dan meningkatkan nilai CBR, Nilai CBR tertinggi untuk stabilisasi bioenzim ditemukan pada variasi dosis 0,05% (CBR 3.c) dengan nilai 10,59% mengalami peningkatan sebesar 126% sebesar 4,68%. Sementara itu, penambahan Abu Kayu mampu meningkatkan nilai CBR tertinggi variasi dosis 17,5% (CBR 7.c) dengan nilai mencapai 11,82% mengalami peningkatan sebesar 153% dari nilai CBR tanah asli. Terjadi peningkatan signifikan setelah distabilisasi dengan kombinasi gabungan bioenzim dan abu kayu, dengan hasil kisaran 10,03%–17,02%. Nilai tertinggi mencapai 17,02% pada capuran Bioenzim 0,1% dan Abu kayu 17,5% (CBR 16.c), menunjukkan peningkatan daya dukung yang sangat signifikan dibandingkan tanah asli. Secara keseluruhan, abu kayu memberikan nilai peningkatan daya dukung (CBR) yang lebih tinggi dibandingkan bioenzim organik untuk sampel tanah Desa Jono. Namun, bioenzim tetap menjadi alternatif yang sangat potensial karena efektif dalam dosis yang sangat kecil (0,06% - 0,1%) dan lebih ramah lingkungan, dan untuk memaksimalkan penggunaan dianjurkan menggabungkan kedua bahan agar mendapatkan hasil yang lebih optimal.

Kata kunci: tanah lempung, stabilisasi tanah, bioenzim organik, abu kayu, CBR.

Pendahuluan

Tanah lempung merupakan salah satu jenis tanah yang sering menimbulkan persoalan pada

konstruksi jalan karena sifatnya sangat dipengaruhi oleh kadar air. Perubahan kadar air dapat memicu perubahan konsistensi, plastisitas,

dan volume tanah sehingga daya dukung tanah dasar menjadi rendah dan kestabilan lapisan perkerasan terganggu. Permasalahan kembang-susut pada tanah lempung dan tanah ekspansif telah banyak dilaporkan sebagai penyebab penurunan kinerja tanah dasar dan kerusakan infrastruktur jalan (Ikeagwuani & Nwonu, 2019; Amakye & Abbey, 2021). Dalam sistem perkerasan jalan, kualitas tanah dasar merupakan faktor penting karena lapisan ini menerima dan meneruskan beban dari struktur di atasnya (Bowles, 1997). Kondisi tersebut relevan dengan tanah di Jalan Dusun Sobo, Desa Jono, Kecamatan Tawangharjo, Kabupaten Grobogan, yang berdasarkan pengujian awal dalam penelitian ini diklasifikasikan sebagai tanah A-7-6 menurut AASHTO dengan nilai indeks plastisitas 18,15% dan CBR tanah asli 4,68%. Karakteristik tersebut menunjukkan perlunya perbaikan sifat tanah sebelum digunakan sebagai tanah dasar konstruksi.

Stabilisasi tanah merupakan salah satu upaya untuk memperbaiki sifat fisik dan mekanik tanah melalui penambahan bahan tertentu sehingga plastisitas berkurang dan daya dukung meningkat. Penggunaan bahan stabilisasi konvensional seperti semen dan kapur telah banyak diterapkan, tetapi kebutuhan terhadap material yang lebih ekonomis dan berkelanjutan mendorong pemanfaatan bahan alternatif dan limbah, termasuk bioenzim serta residu pembakaran biomassa (Amakye & Abbey, 2021). Bioenzim dapat diperoleh melalui proses fermentasi bahan organik, seperti sisa buah dan sayuran, dengan gula atau molase dan air (Supriyani et al., 2020; Ashri et al., 2024). Dalam aplikasi geoteknik, bahan berbasis enzim digunakan dalam dosis relatif kecil dan dilaporkan mampu memengaruhi struktur serta ikatan antarpartikel tanah. Zhang et al. (2013) menunjukkan bahwa tanah yang distabilisasi menggunakan TerraZyme memiliki struktur mikro yang lebih padat dan kuat tekan bebas yang lebih tinggi dibandingkan tanah tanpa perlakuan. Peningkatan sifat mekanik tanah

akibat perlakuan bioenzim juga dilaporkan pada tanah ekspansif dan tanah berpasir lempungan melalui perubahan nilai UCS, CBR, serta parameter konsistensi tanah (Kolhe & Dhatrak, 2022; Nadeem et al., 2023). Namun, efektivitasnya dipengaruhi oleh jenis tanah, kandungan lempung, dosis, dan waktu pemeraman, sehingga hasil antarpelitian tidak selalu sama (Rabbanifar et al., 2023).

Selain bioenzim, abu kayu berpotensi digunakan sebagai bahan stabilisasi karena merupakan residu biomassa yang dapat dimanfaatkan kembali untuk pekerjaan geoteknik. Kajian awal menunjukkan bahwa penambahan abu kayu dapat menurunkan plastisitas serta meningkatkan CBR dan kekuatan tanah lempung pada kadar tertentu (Okagbue, 2007). Nath et al. (2018) juga menunjukkan bahwa abu kayu mampu memperbaiki sejumlah sifat geoteknik tanah berbutir halus, sedangkan James (2019) melaporkan manfaat abu serbuk kayu sebagai bahan tambahan pada stabilisasi tanah ekspansif. Pada studi yang lebih dekat dengan pengujian daya dukung tanah, Pristianto et al. (2022) melaporkan peningkatan nilai CBR tanah lempung seiring penambahan abu kayu, dan Wicaksono et al. (2022) menunjukkan bahwa campuran berbasis abu kayu dapat meningkatkan nilai CBR tanah lempung. Hasil penelitian John dan Yusuf (2023) memperlihatkan bahwa sawdust ash dapat menurunkan indeks plastisitas dan meningkatkan CBR tanah ekspansif, sedangkan Mohamed et al. (2023) menunjukkan peningkatan karakteristik tanah ekspansif melalui pemanfaatan sawdust ash bersama material pozzolan lainnya. Temuan yang lebih baru juga menguatkan potensi abu kayu dan abu serbuk kayu untuk meningkatkan kekuatan serta memperbaiki karakteristik tanah berbutir halus (Blayi et al., 2024; Iliyas et al., 2024). Dengan demikian, pemanfaatan abu kayu tidak hanya memiliki dasar teknis, tetapi juga mendukung prinsip pemanfaatan limbah dan material konstruksi yang lebih berkelanjutan.

Walaupun bioenzim dan abu kayu telah dikaji sebagai bahan stabilisasi tanah, sebagian besar penelitian terdahulu mengevaluasi keduanya secara terpisah, menggunakan jenis tanah, kadar campuran, dan kondisi pemeraman yang berbeda-beda. Literatur bioenzim menunjukkan bahwa respons stabilisasi sangat dipengaruhi karakteristik tanah dan dosis bahan (Nadeem et al., 2023; Rabbanifar et al., 2023), sedangkan penelitian abu kayu menunjukkan adanya kadar optimum yang berbeda untuk tiap jenis tanah (Nath et al., 2018; Blayi et al., 2024). Oleh karena itu, perbandingan langsung bioenzim dan abu kayu pada sumber tanah yang sama, disertai pengujian kombinasi kedua bahan, diperlukan agar efektivitasnya dapat dinilai pada kondisi awal tanah dan prosedur pengujian yang setara. Penelitian ini menganalisis perubahan sifat fisik melalui batas-batas Atterberg serta perubahan sifat mekanik melalui nilai California Bearing Ratio (CBR) pada tanah lempung Desa Jono setelah distabilisasi menggunakan variasi bioenzim organik, abu kayu, dan kombinasi kedua bahan. Penelitian ini bertujuan menentukan efektivitas masing-masing bahan dan mengidentifikasi variasi campuran yang memberikan peningkatan daya dukung paling baik, sehingga hasilnya dapat menjadi dasar pemilihan alternatif stabilisasi tanah yang efektif sekaligus memanfaatkan material yang lebih ramah lingkungan.

Metode

Berikut merupakan penjelasan prosedur penelitian :

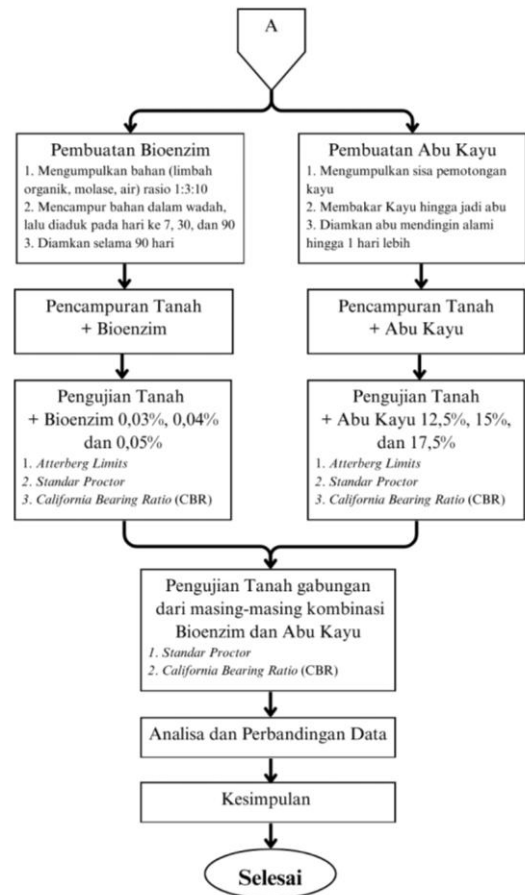
1. Studi Literatur, Melakukan kajian pustaka terkait karakteristik tanah lempung, prinsip stabilisasi tanah, serta penggunaan Bioenzim Organik dan abu kayu dalam perbaikan sifat tanah.
2. Pengambilan Sampel Tanah lempung diambil dari Jalan Dusun Sobo, Desa Jono Kecamatan Tawangharjo Kabupaten Grobogan, kemudian dibawa ke laboratorium

untuk diuji kualifikasi tanah lempung, jika memenuhi kualifikasi jenis tanah lempung A-7-6 maka bisa lanjut uji selanjutnya.

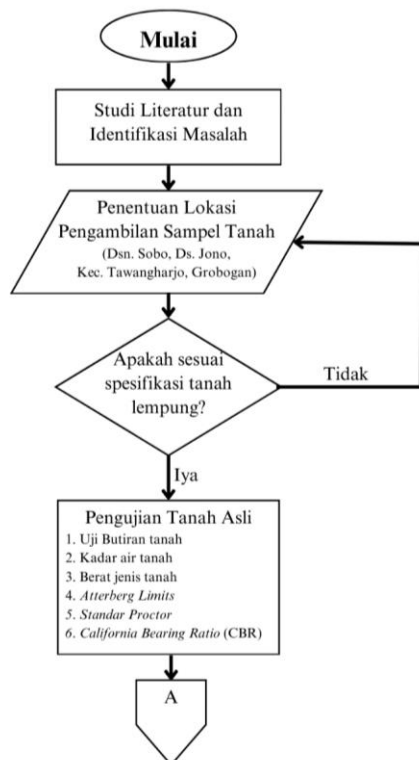
3. Pengujian Tanah Lempung Asli (Kontrol), Tanah lempung asli diuji untuk mengetahui sifat dasar tanah, meliputi kadar air, berat jenis, batas Atterberg, pemadatan (Proctor standar), dan nilai CBR.
4. Pembuatan Bioenzim Organik. Menurut Lubis et.al (2024), berikut Langkah Langkah pembuatan Bioenzim organik :
 - 1) Persiapan bahan: limbah organik (kulit nanas, kulit jeruk, kangkong, daun gamal), molase (sebagai pengganti gula), dan air bersih.
 - 2) Campur dengan rasio 1:3:10 → 1 bagian molase, 3 bagian limbah organik (dipotong kecil-kecil), 10 bagian air.
 - 3) Masukkan ke dalam wadah tertutup (jerigen/botol plastik), lalu ditutup rapat (fermentasi anaerob)
 - 4) Tutup dan beri label tanggal pembuatan.
 - 5) Simpan di tempat teduh dan terhindar sinar matahari selama 3 Bulan lebih untuk fermentasi.
5. Pembuatan Abu Kayu. Berikut adalah Langkah-langkah pembuatan abu kayu.
 - 1) Siapkan bahan dari limbah sisa pemotongan kayu di pabrik kayu.
 - 2) Bakar limbah sisa pemotongan kayu di tempat terbuka atau tungku hingga menjadi abu sempurna.
 - 3) Dinginkan abu secara alami, pastikan tidak ada bara api tersisa.
 - 4) Simpan abu hasil ayakan dalam wadah kering dan tertutup rapat.
6. Pencampuran Tanah dengan Bahan Stabilisasi, variasi campuran diambil dari hasil variasi terbaik dari penelitian terdahulu. Tanah dicampur dengan bahan stabilisasi menggunakan variasi sebagai berikut :
 - 1) Bioenzim organik sebanyak 2ml/500ml (Chauhan & Uday, 2022), lalu diambil sampel 1,5 ml/500 ml, dan 2,5ml.500ml, atau 0,06%, 0,08%, dan 0,1%.

- 2) abu kayu 15% (Pristianto, Rokhman, Irman, 2022), lalu diambil sampel tambahan 12,5% dan 17,5%.
- 3) Gabungan Dari masing-masing Kombinasi sampel Bioenzim organik dan Abu Kayu, dengan total 9 sampel gabungan.
7. Pengujian Tanah Setelah Stabilisasi, Sampel hasil stabilisasi diuji kembali dengan parameter yang sama seperti tanah asli.
8. Analisis Data dan Perbandingan Hasil, Hasil pengujian dibandingkan antara tanah asli, tanah + Bioenzim organik, tanah + abu kayu, kayu untuk mengetahui efektivitas masing-masing bahan.
9. Kesimpulan dan Saran, Menyusun kesimpulan dari hasil penelitian serta memberikan saran untuk penelitian lanjutan atau penerapan di lapangan.

Dengan diagram alir penelitian pada G.b.1 sebagai berikut.



G.b.1. Diagram Alir Penelitian



Hasil dan Pembahasan

1. Klasifikasi Tanah

Pengklasifikasian tanah mengacu pada AASHTO, diperlukan data Analisa saringan lolos no.200, uji batas cair dan uji plastis untuk mengetahui jenis tanahnya. dengan hasil uji klasifikasi pada tabel 1. Sebagai berikut.

Tabel 1. Hasil Penelitian

Uji	Sampel tanah asli
Analisa Saringan	39,16%
Batas Cair	42,86%
Batas Plastis	24,71%
Indeks Plastisitas	18,15%

Maka, Berdasarkan sistem klasifikasi AASHTO, tanah asli tergolong tanah A-7-

6, yaitu tanah berlempung dengan kualitas buruk.

2. Hasil Uji masing-masing sampel

Berikut merupakan penotasian hasil uji terdapat pada Tabel 2. sebagai berikut.

Tabel 2. Notasi Sampel

Sampel	Notasi
Tanah Asli	1
Bioenzim 0,06%	2
Bioenzim 0,08%	3
Bioenzim 0,1%	4
Abu Kayu 12,5%	5
Abu Kayu 12,5%	6
Abu Kayu 17,5%	7
Bio 0,06% + Abu 12,5 %	8
Bio 0,06% + Abu 15 %	9
Bio 0,06% + Abu 17,5 %	10
Bio 0,08% + Abu 12,5 %	11
Bio 0,08% + Abu 15 %	12
Bio 0,08% + Abu 17,5 %	13
Bio 0,1% + Abu 12,5 %	14
Bio 0,1% + Abu 15 %	15
Bio 0,1% + Abu 17,5 %	16

Hasil dari pengujian masing-masing sampel akan disajikan dalam tabel 3 sebagai berikut.

Tabel 3. Hasil Penelitian

Sampel	Batas Cair	Batas Plastis
1	43,45%	24,71%
2	35,42%	22,01%
3	31,65%	20,34%
4	29,80%	19,21%
5	35,25%	21,54%
6	29,62%	21,43%
7	26,31%	21,10%

Lanjutan Tabel 3. Hasil Penelitian

Sampel	Indeks Plastisitas	Batas Susut
1	18,15%	26,91%

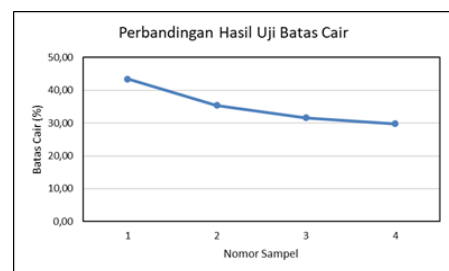
2	13,41%	22,17%
3	11,30%	19,70%
4	10,59%	18,01%
5	13,71%	33,38%
6	8,19%	27,14%
7	5,21%	16,44%

Lanjutan Tabel 3. Hasil Penelitian

Sampel	CBR
1	4,68%
2	7,61%
3	8,02%
4	10,59%
5	9,97%
6	10,62%
7	11,82%
8	10,03%
9	11,01%
10	14,04%
11	11,09%
12	13,1%
13	15,59%
14	11,88%
15	14,37%
16	17,02%

3. Perbandingan Hasil pada sampel stabilisasi dengan Bioenzim Organik

a. Batas Cair

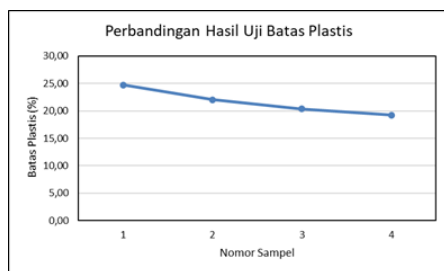


G.b.2. Grafik Perbandingan Batas Cair Campuran Bioenzim Organik

Data pengujian menunjukkan tren penurunan yang konsisten dalam nilai batas cair keempat sampel yang diuji, dimulai dari 43,45% pada sampel

pertama hingga mencapai 29,80% pada sampel keempat. Sampel yang menunjukkan nilai batas cair tertinggi mencerminkan kondisi tanah dengan tingkat plastisitas yang lebih tinggi serta respons yang lebih besar terhadap perubahan kadar air. Di sisi lain, dengan semakin rendahnya nilai batas cair suatu sampel, kemampuan tanah tersebut untuk menyerap air dan sifat plastisitasnya akan menurun, yang membuat material tanah cenderung menjadi lebih stabil. Perbedaan nilai yang signifikan ini menunjukkan adanya variasi karakteristik tanah di antara keempat sampel, yang akhirnya memengaruhi perilaku teknis tanah ketika digunakan sebagai lapisan dasar dalam konstruksi.

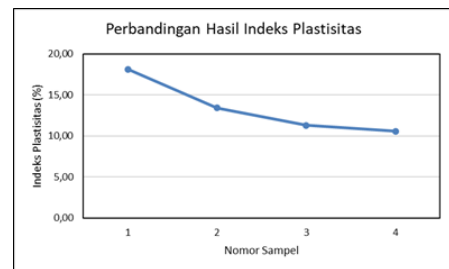
b. Batas Plastis



G.b.3. Grafik Perbandingan Batas Plastis Campuran Bioenzim Organik

Nilai batas plastis pada keempat sampel menunjukkan penurunan dari 24,71% untuk sampel 1 hingga 19,21% pada sampel 4. Ini menunjukkan bahwa kemampuan tanah dalam mempertahankan keadaan plastis semakin menurun sejalan dengan berkurangnya nilai batas plastis. Tanah yang memiliki batas plastis yang lebih tinggi membutuhkan lebih banyak air untuk beralih dari keadaan semi-padat ke kondisi plastis, sementara nilai yang lebih rendah mengindikasikan tanah kehilangan sifat plastisnya dengan lebih cepat.

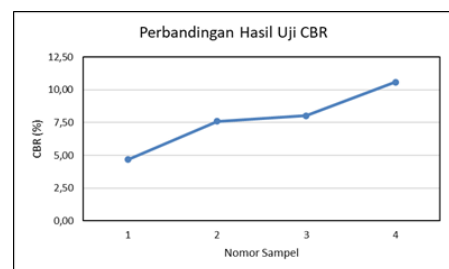
c. Indeks Plastisitas



G.b.4. Grafik Perbandingan Indeks Plastisitas Campuran Bioenzim Organik

Nilai indeks plastisitas mengalami penurunan dari 18,15% pada sampel pertama menjadi 10,59% pada sampel keempat. Penurunan pada angka PI ini menunjukkan bahwa plastisitas tanah semakin menurun, yang mengakibatkan tanah menjadi kurang lengket dan lebih stabil terhadap fluktuasi kelembapan. Makin rendah nilai indeks plastisitas, makin kecil potensi perubahan volume tanah, yang menandakan adanya perbaikan dalam karakteristik tanah sebagai fondasi untuk pembangunan.

d. CBR



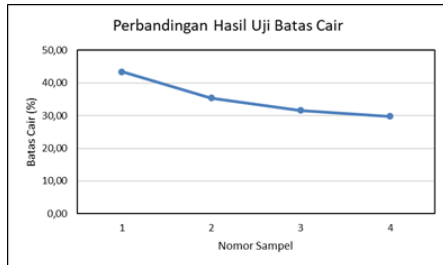
G.b.5. Grafik Perbandingan CBR Campuran Bioenzim Organik

Nilai CBR naik dari 4,68% untuk sampel 1 hingga mencapai 10,59% pada sampel 4. Kenaikan ini menunjukkan peningkatan hampir 126%, yang mencerminkan bahwa kapasitas dukung tanah telah meningkat lebih dari dua kali lipat dibandingkan dengan kondisi awalnya. Ini menunjukkan adanya

peningkatan yang berarti terhadap daya tahan tanah dalam menanggung beban.

4. Perbandingan Hasil pada sampel stabilisasi dengan Abu Kayu

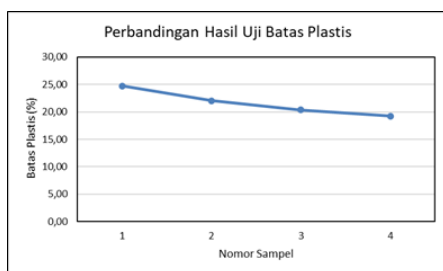
a. Batas Cair



G.b.6. Grafik Perbandingan Batas Cair Campuran Abu Kayu

Nilai batas cair menunjukkan penurunan dari 43,45% pada sampel 1 menjadi 26,31% pada sampel 4. Penurunan ini menandakan bahwa kemampuan tanah untuk menyerap air dan mempertahankan sifat plastis semakin berkurang, sehingga tanah cenderung lebih stabil terhadap perubahan kadar air.

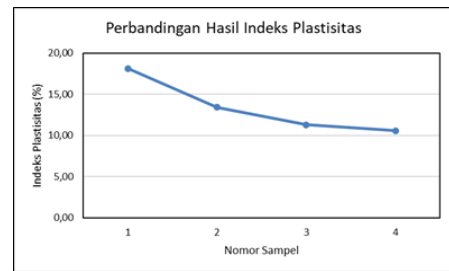
b. Batas Plastis



G.b.7. Grafik Perbandingan Batas Plastis Campuran Abu Kayu

Nilai batas plastis menunjukkan penurunan dari 24,71% pada sampel pertama hingga 21,10% pada sampel keempat. Perubahan ini mengindikasikan bahwa kemampuan tanah untuk menjaga sifat plastis semakin menurun, sehingga tanah menjadi lebih stabil dan tidak begitu dipengaruhi oleh variasi kadar air.

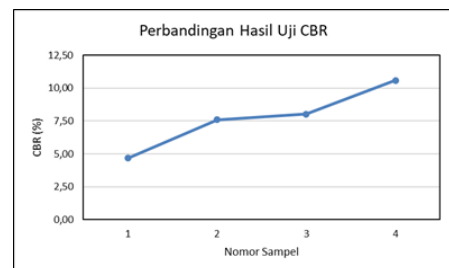
c. Indeks Plastisitas



G.b.8. Grafik Perbandingan Indeks Plastisitas Campuran Abu Kayu

Nilai dari indeks plastisitas menunjukkan penurunan dari 18,15% pada sampel pertama menjadi 5,21% pada sampel keempat. Penurunan yang signifikan ini mengindikasikan bahwa plastisitas tanah turun secara substansial, sehingga daya kembang-susut tanah berkurang dan karakteristik tanah menjadi lebih stabil sebagai lapisan dasar untuk konstruksi.

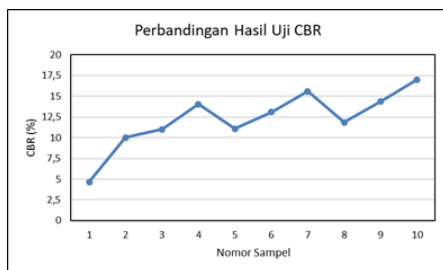
d. CBR



G.b.9. Grafik Perbandingan CBR Campuran Abu Kayu

Nilai CBR menunjukkan kemajuan dari 4,68% pada sampel pertama menjadi 11,82% pada sampel keempat. Kenaikan ini setara dengan pertambahan sekitar 153%, yang menandakan bahwa kapasitas dukung tanah telah lebih dari dua kali lipat dibandingkan dengan kondisi semula, sehingga tanah tersebut lebih cocok digunakan sebagai tanah dasar bagi konstruksi.

5. Perbandingan Hasil pada sampel stabilisasi Gabungan Bioenzim dan Abu Kayu



G.b.10. Grafik Perbandingan CBR Campuran Gabungan Bioenzim dan Abu Kayu

Nilai CBR dari tanah asli yang tercatat adalah 4,68%, menunjukkan kemampuan dukung yang rendah. Setelah dilakukan proses stabilisasi dengan campuran bioenzim dan abu kayu, nilai CBR menunjukkan peningkatan yang signifikan di semua variasi campuran, menghasilkan nilai antara 10,03% hingga 17,02%. Peningkatan paling besar tercatat pada variasi ke-10 dengan nilai 17,02%, menandakan bahwa kemampuan dukung tanah meningkat sekitar 264% dibandingkan dengan tanah asli. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa kombinasi bioenzim dan abu kayu sangat efektif dalam memperkuat struktur tanah lempung, meskipun terdapat perbedaan hasil di antara campuran yang disebabkan oleh variasi proporsi material dan reaksi tanah terhadap proses stabilisasi.

Kesimpulan

Berdasarkan rangkaian penelitian dan analisis data terhadap tanah lempung asal Desa Jono, Kabupaten Grobogan, dapat disimpulkan bahwa tanah dasar di lokasi tersebut memiliki karakteristik plastisitas sedang hingga tinggi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa tanah tersebut memerlukan tindakan stabilisasi agar dapat memenuhi standar daya dukung yang

diperlukan bagi pondasi jalan. Penggunaan bioenzim organik secara signifikan mampu memperbaiki sifat fisik dan mekanik tanah, yang ditunjukkan dengan penurunan nilai batas cair hingga mencapai 29,80% pada dosis maksimal. Dari segi kekuatan mekanik, pengujian CBR pada tanah yang distabilisasi bioenzim menghasilkan nilai tertinggi sebesar 10,59% pada penetrasi 0,2 inci dengan 60 pukulan menggunakan variasi dosis 0,1%.

Di sisi lain, pemanfaatan abu kayu sebagai bahan aditif memberikan peningkatan kekuatan mekanik yang lebih besar dibandingkan penggunaan bioenzim pada pengujian skala laboratorium. Nilai CBR maksimum pada variasi campuran abu kayu tercapai pada kadar 17,5% dengan angka sebesar 11,82% pada penetrasi 0,2 inci dan 60 pukulan. Secara komparatif, abu kayu memberikan kontribusi yang lebih tinggi terhadap daya dukung tanah dibandingkan bioenzim organik, dengan selisih nilai CBR puncak sebesar 1,23%.

Pada saat kedua bahan tersebut digabungkan, terjadi peningkatan nilai CBR yang lebih tinggi, yaitu di angka 17,02% pada variasi bioenzim 0,1% dan abu kayu 17,5%. Yang menunjukkan bahwa kedua bahan tersebut dapat lebih optimal hasilnya jika digabungkan.

Meski demikian, bioenzim organik memiliki potensi besar sebagai material stabilisasi alternatif karena mampu bekerja secara efektif pada dosis yang sangat rendah, yakni antara 0,03% hingga 0,05%. Keunggulan ini memberikan nilai lebih dari aspek keramahan lingkungan serta efisiensi penggunaan material di lapangan. Sebagai simpulan akhir, baik bioenzim organik maupun abu kayu merupakan bahan yang layak diaplikasikan untuk stabilisasi tanah lempung. Pemilihan di antara keduanya dapat didasarkan pada skala prioritas: bioenzim unggul dari segi keberlanjutan dan kemudahan logistik, sementara abu kayu lebih direkomendasikan untuk mencapai peningkatan kekuatan fisik tanah yang lebih optimal sesuai dengan kebutuhan teknis di lapangan. Namun

jika ingin mendapatkan hasil yang lebih tinggi, perlu digabungkan kedua bahan tersebut agar mendapatkan hasil yang lebih optimal.

Referensi

- Amakye, S. Y., & Abbey, S. J. (2021). Understanding the performance of expansive subgrade materials treated with non-traditional stabilisers: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100159. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100159>
- Ashri, A. S. N., Nuraini, S., Amelia, Agustin, S. A., Damarjati, H., Marwah, S. H., Faulia, A. S., Firdaus, A., Renda, D. S., & Zuhri, M. (2024). Pemanfaatan limbah organik sebagai eco enzyme dalam mengatasi antraknosa pada tanaman cabai di Desa Kiarapandak, Bogor. *Jurnal Pusat Inovasi Masyarakat*, 6(Khusus), 52–62. <https://doi.org/10.29244/jpim.6.khusus.52-62>
- Blayi, R. A., Omer, B., Sherwani, A. F. H., Hamadamin, R. M., & Muhammed, H. K. (2024). Geotechnical characteristics of fine-grained soil with wood ash. *Cleaner Engineering and Technology*, 18, 100726. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100726>
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation analysis and design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Chauhan, C., & Uday, K. V. (2024). Effects of bio-enzyme in soil stabilization. In B. T. Jose, D. K. Sahoo, A. J. Puppala, C. N. V. S. Reddy, B. M. Abraham, & R. Vaidya (Eds.), *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2022 Volume 3: Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* (pp. 205–214). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1886-7_18
- Ikeagwuani, C. C., & Nwonu, D. C. (2019). Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(2), 423–440. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.013>
- Iliyas, S., Idris, A., Umar, I. H., Lin, H., Muhammad, A., & Xie, L. (2024). Experiment and analysis of variance for stabilizing fine-grained soils with cement and sawdust ash as liner materials. *Materials*, 17(10), 2397. <https://doi.org/10.3390/ma17102397>
- James, J. (2019). Strength benefit of sawdust/wood ash amendment in cement stabilization of an expansive soil. *Revista Facultad de Ingeniería*, 28(50), 44–61. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n50.2019.8790>
- John, B. N., & Yusuf, Y. (2023). Effects of using sawdust ash as a stabilizer for expansive soils. *E3S Web of Conferences*, 448, 03075. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344803075>
- Kolhe, P. V., & Dhatrak, A. I. (2022). Unconfined compressive strength of bio-enzymatic treated expansive (BC) soil. *Materials Today: Proceedings*, 62, 6809–6813. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.946>
- Lubis, N., Wasito, M., Damayanti, R., & Hayati, D. (2024). Analisis kadar unsur hara dari pupuk organik cair bioenzim berbahan dasar limbah pertanian. *Agropross: National Conference Proceedings of Agriculture*, 661–667.
- Mohamed, A. A. M. S., Yuan, J., Al-Ajamee, M., Dong, Y., Ren, Y., & Hakuzweyezu, T. (2023). Improvement of expansive soil characteristics stabilized with sawdust ash, high calcium fly ash and cement. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01894. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01894>
- Nadeem, M., Ullah, S., Chen, S., Alkahtani, M. Q., Khan, M. A., Salih, R., Jian, L., Mursaleen, M., Islam, S., & Ahmad, J. (2023). Evaluation of engineering properties of clayey sand bio-mediated with Terrazyme enzyme. *Frontiers in Materials*, 10, 1195310. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1195310>
- Nath, B. D., Sarkar, G., Siddiqua, S., Rokunuzzaman, M., & Islam, M. R. (2018). Geotechnical properties of wood ash-based composite fine-grained soil. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 9456019. <https://doi.org/10.1155/2018/9456019>
- Okagbue, C. O. (2007). Stabilization of clay using woodash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(1), 14–18. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:1\(14\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:1(14))
- Pristianto, H., Rokhman, R., & Irman, I. (2022). Studi daya dukung stabilisasi tanah lempung menggunakan campuran abu kayu. *Jurnal Momen Teknik Sipil Suryakencana*, 5(2), 62–66.

- <https://doi.org/10.35194/momen.v5i2.2514>
Rabbanifar, S., Nguyen, T. T. M., Qian, Q., Brake, N. A., Kibodeaux, K., Crochet, H. E., Oruji, S., Whitt, R. L., Farrow, J. S., Belaire, B. G., Bernazzani, P., & Jao, M. (2023). Reusing dredged material through stabilization with so-called bio-enzyme products. *Buildings*, 13(10), 2618. <https://doi.org/10.3390/buildings13102618>
- Supriyani, Astuti, A. P., & Maharani, E. T. W. (2020). Pengaruh variasi gula terhadap produksi ekoenzim menggunakan limbah buah dan sayur. *Seminar Nasional Edusainstek*, 470–479.
- Wicaksono, F. N., Sarie, F., & Hendri, O. (2022). Pengaruh penambahan abu kayu, kapur dan styrofoam sebagai bahan campuran pada tanah lempung terhadap nilai CBR. *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 10(2), 135–144. <https://doi.org/10.33084/mits.v10i2.3592>
- Zhang, X., Zhang, X. P., Peng, H. T., Xia, Q., & Wang, J. (2013). Relation of microstructure and unconfined compression strength of soil stabilized with TerraZyme. *Advanced Materials Research*, 664, 760–763. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.664.760>