Department of Digital Business
Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)
Homepage: https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS
Vol. 5 No. 2 (2026) pp: 29259- 29267
P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Pengaruh Serbuk Kayu terhadap Kuat Geser Tanah Berpasir melalui Uji Triaksial UU

M. Aji Prasetyo[1], Elsa Rati Hariza[2], Sazuatmo[3]
[1,2,3]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Prof. Dr. Hazairin, S.H., Bengkulu
[1]sedangmenulis234@gmail.com* , [2]elsaratihariza1993@gmail.com , [3]sazuatmo68@gmail.com

Abstrak

Tanah berpasir bertumpu pada gesekan antarbutir sehingga kohesinya rendah dan daya dukungnya terbatas. Penelitian ini menganalisis pengaruh penambahan serbuk kayu limbah industri pengolahan kayu terhadap kohesi (c) dan sudut geser dalam (φ) tanah berpasir pada tiga titik sampel di Jl. Wr. Supratman, Kota Bengkulu. Pengujian menggunakan triaksial Unconsolidated Undrained (UU) pada kadar serbuk kayu 0%, 6%, dan 12%. Kohesi tanah asli berkisar 0,34–1,78 kg/cm² dan sudut geser dalam 29,30°–48,50°. Penambahan serbuk kayu meningkatkan kohesi pada Titik 1 (0,34 menjadi 1,43 kg/cm² pada kadar 12%) dan Titik 3 (1,34 menjadi 2,33 kg/cm² pada kadar 6%), tetapi menurunkannya pada Titik 2 (1,78 menjadi 0,51 kg/cm²). Respons sudut geser dalam tidak seragam, dan kadar optimum bergantung pada titik sampel serta kriteria yang dipakai. Berdasarkan kohesi, kadar optimum adalah 12% pada Titik 1 dan 6% pada Titik 3, sedangkan pada Titik 2 tidak ada variasi yang melampaui tanah asli. Serbuk kayu berpotensi memperbaiki kohesi tanah berpasir, tetapi efektivitasnya sangat dipengaruhi karakteristik tanah setempat.

Kata Kunci: *Serbuk Kayu, Tanah Berpasir, Kuat Geser, Triaksial UU, Kohesi*

1. Latar Belakang

Tanah berpasir banyak dijumpai sebagai tanah dasar pada pekerjaan jalan, timbunan, dan fondasi dangkal di wilayah pesisir dan dataran aluvial Indonesia. Kekuatan tanah jenis ini bertumpu pada gesekan antarbutir, sedangkan ikatan antarpartikelnya lemah karena tanah berpasir tergolong tanah tidak kohesif, yaitu tanah yang butirannya terpisah saat kering dan hanya melekat saat basah akibat tegangan permukaan air [1], [2]. Kondisi tersebut membuat kuat geser tanah sangat dipengaruhi tegangan pengekang dan kepadatan, sehingga pada tegangan rendah, seperti pada lapisan dekat permukaan tanah dasar perkerasan, kapasitas gesernya terbatas [1], [3].

Kuat geser tanah lazim dinyatakan dengan kriteria Mohr–Coulomb melalui dua parameter, yaitu kohesi (c) dan sudut geser dalam (φ) [1], [4]. Kedua parameter ini menjadi masukan dalam perhitungan daya dukung fondasi, stabilitas lereng, dan tekanan tanah lateral [3], [4]. Apabila kuat geser tanah dasar tidak memadai, konstruksi di atasnya berisiko mengalami penurunan berlebih, retak pada dinding, dan permukaan jalan bergelombang [3].

Perbaikan tanah dapat dilakukan secara mekanis maupun dengan bahan tambah. Bahan stabilisasi konvensional dapat meningkatkan biaya konstruksi, sehingga berbagai penelitian mengkaji pemanfaatan limbah sebagai bahan tambah alternatif, di antaranya serbuk kayu [5], [6]. Serbuk kayu merupakan limbah padat industri penggergajian dan pengolahan kayu yang juga dihasilkan di Kota Bengkulu. Pemanfaatannya masih terbatas sehingga limbah ini umumnya dibuang atau dibakar. Penggunaannya sebagai bahan perbaikan tanah berpotensi mengurangi beban limbah sekaligus menekan biaya stabilisasi.

Kajian terdahulu menunjukkan bahwa respons tanah terhadap serbuk kayu bergantung pada jenis tanah dan dosis yang digunakan. Pada tanah lempung yang dicampur serbuk kayu 0–7%, Farooq dkk. [5] melaporkan bahwa kuat tekan bebas naik dari 121 kPa menjadi 407 kPa pada kadar 5%. Uji triaksial UU dalam penelitian yang sama menunjukkan kohesi meningkat sekitar tiga kali lipat dan sudut geser bertambah sekitar 9°, dengan kadar 5% sebagai dosis yang memberikan peningkatan maksimum. Pada lanau berlempung, Jasim dan Çetin [7] mendapati kuat geser tak terdrainase naik 41,4% pada kadar 3%, tetapi turun pada kadar 5%. Kedua temuan tersebut menunjukkan adanya kadar optimum yang diikuti penurunan kekuatan pada dosis yang lebih tinggi.

Pada campuran pasir–serbuk kayu, Pan dkk. [8] melalui uji triaksial dinamis menemukan bahwa modulus geser dan rasio redaman menurun seiring bertambahnya kadar serbuk kayu, sehingga serbuk kayu cenderung mengurangi kekakuan campuran. Agaiby dkk. [6] mengkaji lempung organik yang dicampur semen 5% dan serbuk kayu dengan variasi kadar setelah perawatan tujuh hari melalui uji geser langsung dan oedometer, sedangkan

Abdrabbo dkk. [9] memanfaatkan serbuk kayu sebagai bahan timbunan ringan di atas tanah lunak. Material serat alami lain, seperti sabut kelapa, juga telah dikaji sebagai perkuatan tanah tropis [10].

Mekanisme perbaikan oleh serat atau partikel organik umumnya dijelaskan melalui dua efek yang bekerja bersamaan. Efek pertama adalah perkuatan mikro, yaitu serat yang tersebar di antara butiran menahan gaya tarik dan membatasi pergeseran relatif antarbutir sehingga kohesi tampak meningkat [10]. Efek kedua bersifat merugikan, yaitu partikel organik yang kompresibel dan menyerap air menyela kontak antarbutir mineral, meningkatkan kebutuhan air, dan menurunkan berat volume kering. Kajian yang dirangkum oleh Jasim dan Çetin [7] melaporkan bahwa kandungan organik yang tinggi menurunkan kohesi tanah. Dengan demikian, efek bersih serbuk kayu terhadap kuat geser merupakan hasil keseimbangan kedua efek tersebut, dan keseimbangan ini dapat berbeda pada tanah dengan karakteristik yang berbeda.

Telaah di atas memperlihatkan bahwa sebagian besar kajian berfokus pada tanah lempung, lanau, atau tanah organik, atau pada sifat dinamis campuran pasir–serbuk kayu. Berdasarkan literatur yang ditelaah dalam penelitian ini, data kohesi dan sudut geser dalam tanah berpasir alami pada kondisi tak terkonsolidasi–tak terdrainase masih terbatas, terutama untuk tanah lokal Bengkulu. Selain itu, kajian terdahulu umumnya melaporkan satu lokasi pengambilan sampel, sehingga perbedaan respons antarlokasi pada satu ruas jalan jarang dibahas. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengujian tiga titik sampel pada satu ruas jalan dengan variasi serbuk kayu yang sama, sehingga perbedaan respons antartitik dapat dibandingkan secara langsung.

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh penambahan serbuk kayu sebesar 0%, 6%, dan 12% terhadap kohesi dan sudut geser dalam tanah berpasir pada tiga titik di Jl. Wr. Supratman, Kota Bengkulu, serta menentukan kadar serbuk kayu yang memberikan kohesi tertinggi pada setiap titik. Hasil penelitian diharapkan menjadi dasar pertimbangan awal pemanfaatan limbah serbuk kayu sebagai bahan perbaikan tanah dasar.

2. Metode Penelitian

2.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini bersifat eksperimental di laboratorium dan dilaksanakan di dua lokasi. Sampel tanah diambil di Jl. Wr. Supratman, Kelurahan Surabaya, Kecamatan Sungai Serut, Kota Bengkulu. Pengujian dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Prof. Dr. Hazairin, S.H., Jalan Jend. A. Yani No. 01, Kebun Roos, Kecamatan Teluk Segara, Kota Bengkulu, pada tahun 2026.

Data primer diperoleh langsung oleh peneliti melalui survei lapangan, pengambilan sampel, dan pengujian laboratorium. Data sekunder berupa literatur ilmiah dan standar pengujian yang dapat dipertanggungjawabkan, yang digunakan untuk menentukan prosedur pengujian dan membandingkan hasil penelitian. Tahapan penelitian secara ringkas ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan penelitian

2.2. Material dan Persiapan Benda Uji

Material penelitian terdiri atas tanah berpasir dari tiga titik pengambilan sampel yang selanjutnya disebut Titik 1, Titik 2, dan Titik 3, serta serbuk kayu limbah industri pengolahan kayu di Kota Bengkulu. Serbuk kayu

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.14726
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

dicampurkan ke dalam tanah dengan persentase 0%, 6%, dan 12% terhadap berat tanah. Variasi 0% merupakan kondisi tanah asli yang menjadi pembanding.

Kombinasi tiga titik dan tiga variasi kadar menghasilkan sembilan kelompok campuran. Setiap kelompok diuji dengan tiga benda uji sehingga seluruhnya terdapat 27 benda uji triaksial. Tiga benda uji pada satu kelompok diperlukan untuk menggambar tiga lingkaran Mohr yang menjadi dasar penentuan satu pasang nilai c dan φ.

Variabel bebas penelitian adalah titik pengambilan sampel dan kadar serbuk kayu, sedangkan variabel terikat adalah kohesi dan sudut geser dalam hasil uji triaksial UU. Hipotesis kerja yang diuji adalah bahwa serbuk kayu meningkatkan kohesi tanah berpasir, dan bahwa peningkatan tersebut disertai penurunan sudut geser dalam akibat berkurangnya kontak antarbutir mineral. Hipotesis ini diuji secara deskriptif pada setiap titik karena jumlah data tidak memungkinkan pengujian statistik.

2.3. Pengujian Sifat Fisik Tanah

Pengujian sifat fisik dilakukan pada tanah asli untuk mengkarakterisasi material penelitian. Pengujian tersebut mencakup kadar air [11], berat jenis [12], dan berat volume; analisis granuler melalui analisis saringan [13]; serta batas-batas konsistensi yang meliputi batas cair [14], batas plastis [15], dan batas susut. Rincian hasil pengujian sifat fisik tidak disajikan pada naskah ini karena pembahasan difokuskan pada parameter kuat geser.

2.4. Uji Triaksial Unconsolidated Undrained

Uji triaksial dilakukan untuk memperoleh parameter kuat geser tanah. Benda uji berbentuk silinder dibungkus membran karet kedap air dan ditempatkan di dalam sel triaksial, kemudian dibebani tekanan sel (σ_3). Setelah itu, beban aksial diberikan melalui tegangan deviator ($\Delta\sigma$) hingga benda uji mencapai keruntuhan. Pada kondisi tak terkonsolidasi–tak terdrainase, katup drainase tertutup selama pengujian sehingga air tidak keluar dari benda uji [3], [4]. Prosedur pengujian mengacu pada SNI 4813:2015 [16] dan ASTM D2850-15 [17].

Standar tersebut dirumuskan untuk tanah kohesif [16], [17]. Pada penelitian ini uji UU diterapkan pada tanah berpasir untuk memperoleh parameter kuat geser total yang merepresentasikan pembebanan cepat tanpa pengaliran air. Parameter yang diperoleh perlu dibedakan dari parameter tegangan efektif yang menggambarkan kondisi jangka panjang.

Hasil uji UU pada tanah yang tidak jenuh sempurna dipengaruhi oleh kadar air dan derajat kejenuhan benda uji saat diuji. Pada tanah jenuh sempurna, kuat geser tak terdrainase tidak bergantung pada tekanan sel sehingga sudut geser mendekati nol, sedangkan pada tanah tidak jenuh selubung keruntuhan total memiliki kemiringan tertentu karena udara dalam pori masih dapat tertekan [1], [4]. Oleh sebab itu, nilai c dan φ pada penelitian ini merupakan parameter tegangan total yang berlaku untuk kondisi benda uji saat diuji dan tidak dapat langsung disamakan dengan parameter tegangan efektif.

Parameter kuat geser ditentukan dari selubung keruntuhan Mohr–Coulomb yang menyinggung tiga lingkaran Mohr dengan persamaan

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \qquad (1)$$

dengan τ adalah kuat geser (kg/cm²), c adalah kohesi (kg/cm²), σ adalah tegangan normal pada bidang runtuh (kg/cm²), dan φ adalah sudut geser dalam (°). Pada keadaan runtuh, tegangan utama mayor (σ_1) berhubungan dengan tegangan utama minor (σ_3) menurut

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c \tan\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right) \qquad (2)$$

dengan $\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma$ pada saat runtuh. Kohesi diperoleh dari perpotongan selubung dengan sumbu τ, sedangkan sudut geser dalam diperoleh dari kemiringan selubung [1], [4].

2.5. Metode Analisis

Data hasil laboratorium diolah menggunakan Microsoft Excel untuk menghasilkan tabel dan grafik pada setiap titik. Pengaruh serbuk kayu dinyatakan sebagai perubahan relatif kohesi terhadap tanah asli pada titik yang sama menurut

$$\Delta c = \frac{c_x - c_0}{c_0} \times 100\% \qquad (3)$$

dengan c_0 adalah kohesi tanah asli (0%) dan c_x adalah kohesi campuran dengan kadar x. Perubahan sudut geser dinyatakan sebagai selisih $\Delta\varphi = \varphi_x - \varphi_0$ dalam derajat.

Kadar optimum ditetapkan berdasarkan kohesi tertinggi pada setiap titik, sesuai dengan tujuan penelitian. Sebagai analisis pelengkap, kuat geser dihitung dengan Persamaan (1) pada tegangan normal acuan σ = 1 kg/cm² (± 98 kPa) dan σ = 2 kg/cm² (± 196 kPa). Kedua nilai tegangan ini dipilih peneliti sebagai tingkat perbandingan dan

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.14726
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

bukan merupakan tekanan sel yang digunakan dalam pengujian. Pendekatan ini diperlukan karena c dan φ hasil penyesuaian selubung dari tiga benda uji cenderung saling berkaitan, sehingga perbandingan kuat geser pada tegangan tertentu lebih representatif daripada membandingkan kedua parameter secara terpisah.

2.6. Batasan Analisis

Analisis dalam naskah ini dibatasi pada data yang diperoleh dari 27 benda uji triaksial. Karena setiap kelompok menghasilkan satu pasang nilai c dan φ, perbedaan antarkelompok dinilai secara deskriptif melalui perubahan relatif dan tidak diuji secara statistik. Rata-rata gabungan tiga titik dihitung hanya sebagai gambaran kecenderungan umum dan bukan sebagai nilai representatif ruas jalan, mengingat jumlah titik yang kecil dan perbedaan karakter antartitik yang besar.

Interpretasi mekanisme, seperti peran perkuatan mikro, pengaruh butiran halus, dan isapan matriks, diposisikan sebagai dugaan karena penelitian ini tidak mengukur gradasi campuran, struktur mikro, maupun tekanan air pori. Pernyataan yang bersifat pasti dibatasi pada angka hasil pengujian dan perhitungan turunannya.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Uji Triaksial UU

Hasil uji triaksial UU pada tiga titik sampel dengan kadar serbuk kayu 0%, 6%, dan 12% dirangkum pada Tabel 1. Nilai kohesi dan sudut geser dalam bervariasi antartitik maupun antarkadar, dan pola perubahannya tidak seragam pada ketiga titik. Perubahan relatif terhadap tanah asli dianalisis pada Tabel 2.

Tabel 1. Kohesi (c) dan sudut geser dalam (φ) hasil uji triaksial UU

Titik	Serbuk kayu (%)	c (kg/cm²)	φ (°)
Titik 1	0	0,34	48,50
	6	0,57	53,60
	12	1,43	35,80
Titik 2	0	1,78	29,30
	6	0,51	46,90
	12	0,51	53,80
Titik 3	0	1,34	38,90
	6	2,33	27,80
	12	0,51	46,90

Sumber: Hasil pengujian, 2026

Nilai kohesi berkisar 0,34–2,33 kg/cm² (± 33–228 kPa), atau selisih sekitar 6,9 kali antara nilai terendah dan tertinggi, sedangkan sudut geser dalam berkisar 27,80°–53,80°. Keragaman sebesar ini terjadi pada tanah yang diambil dari satu ruas jalan, sehingga pengaruh serbuk kayu perlu dibaca terhadap kondisi awal setiap titik dan bukan terhadap satu nilai tunggal.

3.2. Karakteristik Kuat Geser Tanah Asli

Pada kondisi tanah asli (0%), Titik 1 memiliki sudut geser dalam yang paling besar, yaitu 48,50°, dengan kohesi yang rendah sebesar 0,34 kg/cm² (± 33 kPa). Kombinasi ini menunjukkan bahwa kuat geser Titik 1 didominasi gesekan antarbutir, sesuai dengan perilaku tanah berpasir yang bertumpu pada *grain-to-grain friction* [1], [2]. Dengan demikian, Titik 1 merupakan titik yang paling sesuai dengan gambaran tanah berpasir berkohesi rendah yang melatarbelakangi penelitian ini.

Titik 2 dan Titik 3 menunjukkan karakter yang berbeda. Kohesi tanah asli di Titik 2 mencapai 1,78 kg/cm² (± 175 kPa) dengan sudut geser dalam 29,30°, sedangkan di Titik 3 kohesinya 1,34 kg/cm² (± 131 kPa) dengan sudut geser dalam 38,90°. Kedua titik ini tidak dapat dikategorikan sebagai tanah tidak kohesif murni. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa tanah pada satu ruas jalan yang sama tidak homogen, sehingga satu titik tidak dapat mewakili seluruh ruas.

Beberapa faktor dapat menjelaskan kohesi yang relatif tinggi tersebut. Pertama, kandungan butiran halus dalam tanah berpasir dapat memberi ikatan antarpartikel. Kedua, pada uji UU tanah yang tidak jenuh sempurna menghasilkan parameter tegangan total dengan sudut geser yang tidak nol dan kohesi semu yang berasal dari isapan matriks air pori [1], [4], [18]. Ketiga, kadar air dan kepadatan benda uji memengaruhi hasil uji UU. Nilai kohesi sebesar ratusan kPa tergolong tinggi untuk tanah berpasir, sehingga penafsirannya perlu didukung data gradasi, kadar air, derajat kejenuhan, dan kepadatan benda uji.

Keragaman antartitik berimplikasi pada perencanaan perbaikan tanah. Jumlah titik sampel yang terbatas dapat menghasilkan kesimpulan yang bias apabila satu titik diperlakukan mewakili seluruh ruas. Untuk perencanaan,

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.14726
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

pengujian sebaiknya dilakukan pada setiap segmen yang karakter tanahnya berbeda, dan kadar serbuk kayu ditetapkan per segmen berdasarkan kuat geser pada tegangan rencana.

3.3. Pengaruh Serbuk Kayu terhadap Kohesi

Tabel 2. Perubahan kohesi dan sudut geser dalam terhadap tanah asli

Titik	Serbuk kayu (%)	Δc (%)	Δφ (°)
Titik 1	6	+67,6	+5,10
	12	+320,6	−12,70
Titik 2	6	−71,3	+17,60
	12	−71,3	+24,50
Titik 3	6	+73,9	−11,10
	12	−61,9	+8,00

Sumber: Hasil analisis berdasarkan Tabel 1

Pengaruh serbuk kayu terhadap kohesi berbeda pada setiap titik. Pada Titik 1, kohesi meningkat secara konsisten seiring bertambahnya kadar, yaitu 67,6% pada kadar 6% dan 320,6% pada kadar 12% (Tabel 2). Pada Titik 3, kohesi meningkat 73,9% pada kadar 6% menjadi 2,33 kg/cm², yang merupakan nilai kohesi tertinggi dalam penelitian ini, kemudian turun 61,9% di bawah tanah asli pada kadar 12%. Pada Titik 2, kohesi justru turun 71,3% pada kedua kadar serbuk kayu.

Peningkatan kohesi pada Titik 1 dan Titik 3 sejalan dengan mekanisme perkuatan mikro, yaitu serat kayu mengisi rongga antarbutir dan menjembatani butiran pasir sehingga adhesi antarbutir bertambah. Pola kenaikan hingga kadar tertentu yang diikuti penurunan pada Titik 3 sejalan dengan kajian pada tanah lempung dan lanau, yang melaporkan adanya kadar optimum dan penurunan kekuatan pada dosis yang lebih tinggi [5], [7]. Besaran peningkatan tidak dapat dibandingkan langsung dengan kajian tersebut karena jenis tanah, kadar yang diuji, dan kondisi benda ujinya berbeda.

Penurunan kohesi pada Titik 2 tidak dapat dijelaskan dengan mekanisme perkuatan. Salah satu kemungkinan adalah bahwa kohesi tanah asli di titik ini, yang sudah tinggi, berasal dari ikatan butiran halus atau isapan matriks, dan ikatan tersebut terganggu oleh serbuk kayu yang bersifat kompresibel dan menyerap air. Penjelasan ini masih bersifat dugaan dan perlu diuji melalui analisis gradasi, kadar air, dan struktur mikro pada campuran.

3.4. Pengaruh Serbuk Kayu terhadap Sudut Geser Dalam

Respons sudut geser dalam tidak searah pada ketiga titik (Tabel 2). Penurunan sudut geser dalam terjadi pada Titik 1 kadar 12% sebesar 12,70° dan pada Titik 3 kadar 6% sebesar 11,10°. Penurunan ini sejalan dengan temuan bahwa serbuk kayu yang kompresibel menyelimuti butiran pasir, mengurangi kontak langsung antarmineral, dan menurunkan efektivitas penguncian antarbutir [8]. Di sisi lain, sudut geser dalam meningkat pada Titik 2 sebesar 17,60° pada kadar 6% dan 24,50° pada kadar 12%, serta pada kondisi lain di Titik 1 dan Titik 3.

Dengan demikian, pernyataan bahwa penambahan serbuk kayu menurunkan sudut geser dalam hanya berlaku pada sebagian variasi. Pada beberapa variasi, perubahan c dan φ berlawanan arah, yaitu c turun ketika φ naik pada Titik 2 dan c naik ketika φ turun pada Titik 1 kadar 12% dan Titik 3 kadar 6%. Pola ini mengindikasikan adanya kaitan antara kedua parameter akibat penyesuaian selubung keruntuhan dari hanya tiga benda uji. Konsekuensinya, penilaian efektivitas stabilisasi sebaiknya tidak bertumpu pada salah satu parameter saja.

3.5. Kuat Geser pada Tegangan Normal Acuan

Kuat geser pada tegangan normal acuan 1 kg/cm² dan 2 kg/cm² dihitung dengan Persamaan (1) dan disajikan pada Tabel 3. Selubung keruntuhan setiap titik ditampilkan pada Gambar 2 sampai Gambar 4 sebagai ilustrasi. Rentang tegangan normal pada gambar tidak harus sama dengan rentang tekanan sel yang digunakan dalam pengujian, sehingga bagian garis di luar rentang pengujian bersifat ekstrapolasi.

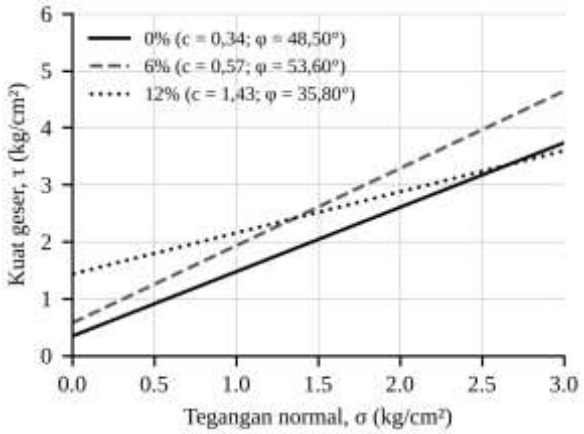
DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.14726
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Tabel 3. Kuat geser τ (kg/cm²) pada tegangan normal acuan σ (kg/cm²)

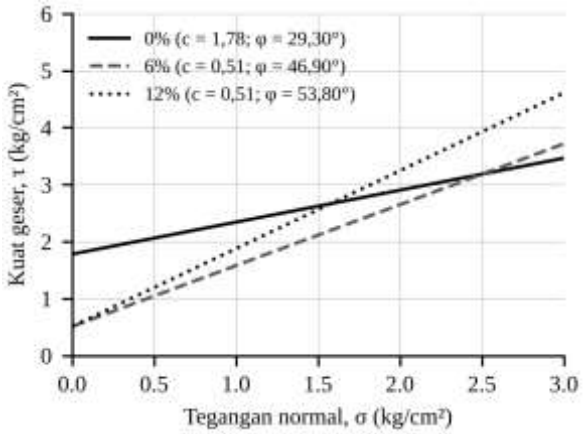
Titik	Serbuk kayu (%)	τ (σ = 1)	Δτ (%)	τ (σ = 2)	Δτ (%)
Titik 1	0	1,47	–	2,60	–
	6	1,93	+31,0	3,28	+26,2
	12	2,15	+46,3	2,87	+10,5
Titik 2	0	2,34	–	2,90	–
	6	1,58	−32,6	2,65	−8,8
	12	1,88	−19,9	3,24	+11,7
Titik 3	0	2,15	–	2,95	–
	6	2,86	+33,1	3,38	+14,6
	12	1,58	−26,5	2,65	−10,4

Sumber: Hasil analisis berdasarkan Tabel 1 dan Persamaan (1)

Pada Titik 1, campuran 12% memberikan kuat geser tertinggi pada σ = 1 kg/cm² (2,15 kg/cm², naik 46,3%), tetapi pada σ = 2 kg/cm² campuran 6% lebih unggul (3,28 kg/cm², naik 26,2%) karena penurunan sudut geser dalam pada kadar 12% mengurangi manfaat kohesi pada tegangan yang lebih tinggi. Pada Titik 3, campuran 6% terbaik pada kedua tegangan acuan, dengan kenaikan 33,1% pada σ = 1 kg/cm² dan 14,6% pada σ = 2 kg/cm². Kadar 12% pada titik ini lebih rendah daripada tanah asli pada kedua tegangan acuan.

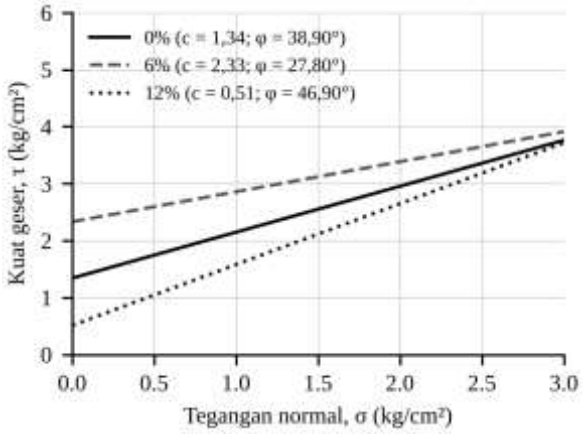


Gambar 2. Selubung keruntuhan Mohr–Coulomb Titik 1



Gambar 3. Selubung keruntuhan Mohr–Coulomb Titik 2

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.14726
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)



Gambar 4. Selubung keruntuhan Mohr–Coulomb Titik 3

Titik 2 menunjukkan perilaku yang berbeda. Pada σ = 1 kg/cm², tanah asli memiliki kuat geser tertinggi (2,34 kg/cm²), sedangkan kedua campuran lebih rendah, masing-masing 32,6% dan 19,9%. Pada σ = 2 kg/cm², campuran 12% melampaui tanah asli sebesar 11,7% (3,24 kg/cm²) karena sudut geser dalamnya yang besar. Selubung keruntuhan yang saling berpotongan pada Gambar 2 sampai Gambar 4 memperlihatkan bahwa kadar yang terbaik bergantung pada tingkat tegangan. Pada tegangan rendah, seperti lapisan dekat permukaan tanah dasar, kohesi lebih menentukan, sedangkan pada tegangan yang lebih tinggi pengaruh sudut geser dalam lebih dominan.

Titik perpotongan selubung memberi batas tegangan tempat suatu campuran melampaui tanah asli. Pada Titik 1, campuran 12% lebih kuat daripada tanah asli hanya pada σ di bawah sekitar 2,66 kg/cm², dan lebih kuat daripada campuran 6% hanya pada σ di bawah sekitar 1,35 kg/cm². Campuran 6% pada titik ini lebih kuat daripada tanah asli pada seluruh tegangan karena c dan φ-nya sama-sama lebih tinggi. Pada Titik 3, campuran 6% melampaui tanah asli hingga σ sekitar 3,54 kg/cm². Pada Titik 2, campuran 12% baru melampaui tanah asli pada σ di atas sekitar 1,58 kg/cm², dan campuran 6% pada σ di atas sekitar 2,50 kg/cm². Nilai-nilai ini diturunkan dari selubung hasil penyesuaian tiga benda uji dan akan berubah bila tekanan sel atau jumlah ulangan berbeda, sehingga hanya dibaca sebagai gambaran orde besar.

3.6. Kadar Optimum Serbuk Kayu

Berdasarkan kriteria kohesi tertinggi, kadar optimum pada Titik 1 adalah 12%, dengan kohesi 1,43 kg/cm². Nilai ini merupakan yang tertinggi di antara kadar yang diuji. Karena kohesi masih meningkat pada kadar tertinggi dan kadar di atas 12% tidak diuji, kadar 12% belum dapat dipastikan sebagai titik puncak sebenarnya. Pada Titik 3, kadar optimum adalah 6% dengan kohesi 2,33 kg/cm², dan kohesi turun pada kadar 12% sehingga puncaknya berada di antara kadar yang diuji. Pada Titik 2, tidak ada campuran yang melampaui kohesi tanah asli, sehingga penambahan serbuk kayu tidak memperbaiki kohesi di titik ini.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa tidak terdapat satu kadar optimum yang berlaku untuk seluruh titik. Rentang 6–12% efektif meningkatkan kohesi pada Titik 1 dan Titik 3, tetapi tidak pada Titik 2. Perbedaan kadar optimum antartitik kemungkinan berkaitan dengan perbedaan gradasi, porositas, dan kondisi awal tanah, yang menentukan volume pengisi dan jumlah serat yang diperlukan untuk membentuk penguncian mekanis. Dugaan ini memerlukan pengujian lanjutan karena data gradasi dan porositas tidak dianalisis dalam penelitian ini.

Tabel 5 merangkum kadar terbaik pada setiap titik menurut empat kriteria. Kadar terbaik berbeda menurut kriteria yang dipakai. Hanya Titik 3 yang menunjuk kadar yang sama, yaitu 6%, pada tiga dari empat kriteria. Pada Titik 1 dan Titik 2, pilihan kadar berubah ketika kriteria berganti dari kohesi ke sudut geser dalam atau ke kuat geser pada tegangan yang lebih tinggi. Oleh karena itu, penetapan kadar optimum harus menyebutkan kriteria dan tegangan acuan yang digunakan, dan pada naskah ini kriteria utama tetap kohesi sesuai tujuan penelitian.

Tabel 5. Kadar serbuk kayu terbaik menurut kriteria penilaian

Titik	c tertinggi	φ tertinggi	τ tertinggi (σ = 1)	τ tertinggi (σ = 2)
Titik 1	12%	6%	12%	6%
Titik 2	0% (asli)	12%	0% (asli)	12%
Titik 3	6%	0% (asli)	6%	6%

Sumber: Hasil analisis berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 3

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.14726
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

3.7. Kecenderungan Gabungan Tiga Titik

Untuk melihat kecenderungan umum, nilai ketiga titik dirata-ratakan pada setiap kadar (Tabel 4). Rata-rata kohesi hampir tidak berubah dari tanah asli ke kadar 6% (1,15 dan 1,14 kg/cm²), lalu turun menjadi 0,82 kg/cm² pada kadar 12%, sedangkan rata-rata sudut geser dalam naik dari 38,90° menjadi 42,77° dan 45,50°. Gambaran ini berbeda dari kesan yang diperoleh dari Titik 1 saja, yaitu kohesi meningkat dan sudut geser menurun. Secara gabungan, serbuk kayu tidak meningkatkan kohesi rata-rata, dan kenaikan rata-rata sudut geser dalam sangat dipengaruhi oleh Titik 2.

Tabel 4. Rata-rata gabungan tiga titik pada setiap kadar serbuk kayu (τ dalam kg/cm²)

Serbuk kayu (%)	c rata-rata (kg/cm²)	φ rata-rata (°)	τ rata-rata (σ = 1)	τ rata-rata (σ = 2)
0	1,15	38,90	1,99	2,82
6	1,14	42,77	2,12	3,10
12	0,82	45,50	1,87	2,92

Sumber: Hasil analisis berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 3

Kuat geser rata-rata pada tegangan acuan menunjukkan bahwa kadar 6% memberikan nilai tertinggi pada kedua tegangan, yaitu 2,12 kg/cm² pada σ = 1 dan 3,10 kg/cm² pada σ = 2, dibandingkan tanah asli sebesar 1,99 dan 2,82 kg/cm². Kadar 12% menghasilkan 1,87 dan 2,92 kg/cm². Selisih tersebut relatif kecil dibandingkan perbedaan antartitik; simpangan baku kohesi antartitik pada kadar 6%, misalnya, mencapai 1,03 kg/cm². Dengan demikian, rata-rata gabungan hanya dapat dibaca sebagai indikasi bahwa kadar 6% layak dijadikan titik awal pengujian lanjutan, dan belum cukup untuk menetapkan satu kadar bagi seluruh ruas.

3.8. Perbandingan dengan Kajian Terdahulu

Kadar optimum yang diperoleh pada penelitian ini, yaitu 6% pada Titik 3 dan 12% pada Titik 1, lebih tinggi daripada dosis optimum yang dilaporkan pada tanah lempung dan lanau, yaitu sekitar 5% [5] dan 3% [7]. Perbedaan tersebut tidak serta-merta berarti bahwa tanah berpasir memerlukan dosis yang lebih besar, karena kedua kajian itu menggunakan tanah, ukuran serbuk, dan kondisi benda uji yang berbeda, dan Farooq dkk. [5] menguji kadar dengan kenaikan 1%. Salah satu dugaan adalah bahwa tanah berpasir memiliki luas permukaan butiran yang lebih kecil dan rongga yang lebih besar sehingga memerlukan volume serat yang lebih banyak untuk membentuk jaringan perkuatan. Dugaan ini perlu dibuktikan dengan pengujian pada rentang kadar yang lebih rapat.

Arah perubahan kohesi pada Titik 1 dan Titik 3 sejalan dengan peningkatan kohesi yang dilaporkan pada tanah lempung [5], sedangkan penurunan pada Titik 2 dan pada Titik 3 kadar 12% sejalan dengan laporan bahwa kandungan organik yang tinggi dapat menurunkan kohesi [7]. Sementara itu, penurunan modulus geser dan redaman campuran pasir–serbuk kayu pada beban dinamis [8] mengingatkan bahwa peningkatan kekuatan tidak selalu disertai peningkatan kekakuan. Penelitian ini belum menganalisis kekakuan dari kurva tegangan–regangan, sehingga pengaruh serbuk kayu terhadap deformasi tanah dasar belum dapat dinilai. Analisis modulus dari kurva tersebut layak dilakukan pada penelitian lanjutan karena penurunan kekakuan dapat menambah penurunan konstruksi.

3.9. Implikasi dan Keterbatasan

Dari sisi penerapan, serbuk kayu paling menjanjikan untuk tanah berpasir berkohesi rendah dengan sudut geser dalam tinggi seperti Titik 1, karena penambahan kohesi dapat meningkatkan kuat geser pada tegangan rendah. Pemanfaatan limbah serbuk kayu juga memberi manfaat lingkungan melalui pengurangan limbah yang dibuang atau dibakar. Pada tanah yang sudah memiliki kohesi tinggi seperti Titik 2, penambahan serbuk kayu tanpa pengujian awal berisiko menurunkan kuat geser pada tegangan rendah.

Untuk penerapan pada tanah dasar jalan, pemilihan kadar sebaiknya mengikuti tegangan yang bekerja pada lapisan yang diperbaiki. Pada lapisan dekat permukaan yang menerima tegangan normal rendah, pengaruh kohesi lebih dominan sehingga campuran yang meningkatkan kohesi, seperti campuran 12% pada Titik 1, lebih menguntungkan. Pada lapisan yang lebih dalam atau pada beban yang lebih besar, pengaruh sudut geser dalam semakin dominan sehingga campuran yang menurunkan sudut geser, seperti campuran 12% pada Titik 1, menjadi kurang menguntungkan. Pengujian pada tegangan yang sesuai dengan kondisi lapangan, pengujian CBR dan pemadatan pada campuran, serta pemantauan perilaku jangka panjang diperlukan sebelum serbuk kayu digunakan pada skala lapangan.

Aspek pelaksanaan di lapangan juga perlu dipertimbangkan. Persentase 6–12% terhadap berat tanah setara dengan volume serbuk kayu yang besar karena massa jenis serbuk kayu jauh lebih rendah daripada tanah, sehingga pengadaan, pengangkutan, dan keseragaman pencampuran di lapangan perlu dikaji bersama pertimbangan biaya. Ketersediaan limbah serbuk kayu di sekitar lokasi menjadi faktor penentu kelayakan ekonomis pendekatan ini.

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.14726
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Beberapa keterbatasan perlu diperhatikan. Pertama, setiap variasi hanya diwakili satu pasang nilai c dan φ dari tiga benda uji, sehingga keragaman antarulangan tidak dapat dievaluasi dan perbedaan kecil tidak dapat diuji secara statistik. Kedua, uji UU menggambarkan kuat geser jangka pendek pada kondisi tak terdrainase, sedangkan kinerja jangka panjang dipengaruhi pembasahan, drainase, dan dekomposisi bahan organik [8]. Ketiga, serbuk kayu merupakan material organik yang dapat melapuk dan menyerap air sehingga durabilitasnya perlu diuji. Keempat, kadar air dan kepadatan benda uji perlu dikendalikan dan dilaporkan pada penelitian berikutnya. Oleh karena itu, hasil penelitian ini sebaiknya dipandang sebagai indikasi awal dan bukan sebagai dasar perencanaan.

3.10. Arah Penelitian Lanjutan

Penelitian lanjutan sebaiknya disusun bertahap. Tahap pertama melengkapi karakterisasi tanah, yaitu gradasi, klasifikasi tanah, kadar air, derajat kejenuhan, dan kepadatan benda uji, sehingga perbedaan respons antartitik dapat dikaitkan dengan sifat tanah. Tahap kedua memperapat variasi kadar serbuk kayu dan menambah ulangan pada setiap kadar, sehingga puncak kohesi dapat ditentukan lebih pasti dan keragaman antarulangan dapat dihitung.

Tahap ketiga menguji kondisi yang lebih mendekati lapangan, yaitu benda uji terendam, pengujian terkonsolidasi (CU atau CD) untuk memperoleh parameter tegangan efektif, serta uji durabilitas terhadap siklus basah–kering. Tahap keempat mengevaluasi kinerja pada skala yang lebih besar melalui pengujian CBR dan pemadatan campuran, serta menganalisis kekakuan dari kurva tegangan–regangan. Kombinasi serbuk kayu dengan bahan pengikat dalam jumlah kecil juga layak dikaji untuk menahan penurunan sudut geser dalam pada kadar tinggi.

4. Kesimpulan

Penambahan serbuk kayu memengaruhi parameter kuat geser tanah berpasir di Jl. Wr. Supratman, tetapi pengaruhnya bergantung pada titik sampel. Kohesi meningkat pada Titik 1, dari 0,34 menjadi 1,43 kg/cm² pada kadar 12%, dan pada Titik 3, dari 1,34 menjadi 2,33 kg/cm² pada kadar 6%, sedangkan pada Titik 2 kohesi turun dari 1,78 menjadi 0,51 kg/cm². Sudut geser dalam tidak selalu menurun karena perubahannya berbeda pada setiap titik dan kadar. Kadar serbuk kayu yang memberikan kohesi tertinggi adalah 12% pada Titik 1 dan 6% pada Titik 3, sedangkan pada Titik 2 tidak ada campuran yang melampaui tanah asli. Secara gabungan tiga titik, kohesi rata-rata tidak meningkat, sedangkan sudut geser dalam rata-rata meningkat, dan kadar 6% menunjukkan kuat geser rata-rata tertinggi pada kedua tegangan acuan. Perbandingan kuat geser pada tegangan normal acuan menunjukkan bahwa kadar yang terbaik juga dipengaruhi tingkat tegangan, sehingga penilaian efektivitas stabilisasi sebaiknya mempertimbangkan kohesi dan sudut geser dalam secara bersamaan. Penelitian lanjutan disarankan mengikuti tahapan pada Subbab 3.10.

Referensi

[1] B. M. Das and K. Sobhan, *Principles of Geotechnical Engineering*, 9th ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2018.
[2] J. E. Bowles, *Foundation Analysis and Design*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1997.
[3] H. C. Hardiyatmo, *Mekanika Tanah I & II*. Yogyakarta, Indonesia: Gadjah Mada University Press, 2017.
[4] K. Terzaghi, R. B. Peck, and G. Mesri, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1996.
[5] M. U. Farooq, H. Mujtaba, K. Farooq, N. Sivakugan, and B. M. Das, "Evaluation of stability and erosion characteristics of soil embankment slope reinforced with different natural additives," *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.*, vol. 44, suppl. 1, pp. 515–524, Oct. 2020, doi: 10.1007/s40996-019-00340-5.
[6] S. S. Agaiby, A. W. Hassan, A. H. Dakhli, and A. Elhakim, "Sawdust effect on compressibility and shear strength characteristics of highly organic clay," *Eng. Res. J. (Menoufia Univ.)*, vol. 45, no. 3, pp. 379–387, Jul. 2022, doi: 10.21608/erjm.2022.127027.1151.
[7] O. H. Jasim and D. Çetin, "Effect of sawdust usage on the shear strength behavior of clayey silt soil," *Sigma J. Eng. Nat. Sci.*, vol. 34, no. 1, pp. 31–41, Mar. 2016. [Online]. Available: https://izlik.org/JA57EU73FR
[8] D. Pan, X. Li, P. Lu, and Q. Chen, "Dynamic properties of sand-sawdust mixture for modeling deposit soil," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 18, p. 3863, Sep. 2019, doi: 10.3390/app9183863.
[9] F. M. Abdrabbo, K. E. Gaaver, A. Z. Elwakil, and S. A. Khalifa, "Towards construction of embankment on soft soil: A comparative study of lightweight materials and deep replacement techniques," *Sci. Rep.*, Nov. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-77587-0.
[10] G. L. Sivakumar Babu and A. K. Vasudevan, "Strength and stiffness response of coir fiber-reinforced tropical soil," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 9, 2008.
[11] Badan Standardisasi Nasional, *Cara Uji Penentuan Kadar Air untuk Tanah dan Batuan di Laboratorium*, SNI 1965:2008, Jakarta, Indonesia, 2008.
[12] Badan Standardisasi Nasional, *Cara Uji Berat Jenis Tanah*, SNI 1964:2008, Jakarta, Indonesia, 2008.
[13] Badan Standardisasi Nasional, *Cara Uji Analisis Ukuran Butir Tanah*, SNI 3423:2008, Jakarta, Indonesia, 2008.
[14] Badan Standardisasi Nasional, *Cara Uji Penentuan Batas Cair Tanah*, SNI 1967:2008, Jakarta, Indonesia, 2008.
[15] Badan Standardisasi Nasional, *Cara Uji Penentuan Batas Plastis dan Indeks Plastisitas Tanah*, SNI 1966:2008, Jakarta, Indonesia, 2008.
[16] Badan Standardisasi Nasional, *Cara Uji Triaksial untuk Tanah Kohesif dalam Keadaan Tidak Terkonsolidasi dan Tidak Terdrainase (UU)*, SNI 4813:2015, Jakarta, Indonesia, 2015.
[17] *Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils*, ASTM D2850-15, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2015.
[18] R. D. Holtz and W. D. Kovacs, *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1981.

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.14726
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)