

Analisis Pengaruh Variasi Material Substitusi terhadap Koefisien Permeabilitas pada Timbunan Tanah Lanau Berlempung

Era Agita Kabdiyono, Alizar, Okinawa Surya Putra Pratama

¹⁻²Universitas Dian Nusantara

³Universitas Indonesia

Penulis korespondensi: Email: era.agita.k@undira.ac.id

Abstract. Clayey silt is a soil type commonly found in Indonesia; however, it often causes problems in embankment construction due to its low permeability. This characteristic restricts water flow, leading to prolonged waterlogging and potentially reducing the stability of road and drainage infrastructure. This study aims to analyze the effect of adding substitute materials on improving the coefficient of permeability (k) of clayey silt and to determine the optimum mixture composition. The research method used was a laboratory experimental approach, including testing the physical properties of the original soil, such as specific gravity, Atterberg limits, and sieve analysis. Standard Proctor compaction testing was conducted to determine the optimum moisture content and maximum dry density, while permeability testing was carried out using the falling head method. The mixture variations consisted of substitute materials, such as sand or stone ash, added at percentages of 0%, 10%, 30%, 50%, and 70% based on the dry weight of the soil. The expected result of this study is the identification of the relationship between the percentage of substitute material and changes in permeability values. Therefore, this research is expected to provide technical recommendations for effective, economical, and applicable embankment soil improvement to mitigate the risk of waterlogging.

Keywords: Clayey Silt; Embankment; Permeability; Stabilization; Substitute Material.

Abstrak. Tanah lanau berlempung merupakan jenis tanah yang banyak dijumpai di Indonesia namun sering menimbulkan masalah dalam pekerjaan timbunan karena permeabilitasnya yang rendah. Karakteristik ini menyebabkan air sulit mengalir, memicu genangan yang berkepanjangan, serta merusak stabilitas infrastruktur jalan dan drainase. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan material substitusi terhadap peningkatan nilai koefisien permeabilitas (k) pada tanah lanau berlempung, serta menentukan komposisi campuran yang optimal. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental laboratorium yang meliputi pengujian sifat fisik tanah asli (berat jenis, batas Atterberg, analisis saringan), uji pemadatan standar (Standard Proctor) untuk menentukan kadar air optimum dan kepadatan kering maksimum, serta uji permeabilitas menggunakan metode Falling Head. Variasi campuran yang diterapkan adalah penambahan material substitusi (seperti pasir atau abu batu) dengan persentase 0%, 10%, 30%, 50%, dan 70% dari berat kering tanah. Hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah teridentifikasinya korelasi antara persentase material substitusi dengan perubahan nilai permeabilitas, sehingga dapat menghasilkan rekomendasi teknis perbaikan tanah timbunan yang efektif, ekonomis, dan aplikatif untuk memitigasi risiko genangan.

Kata kunci: Material Pengganti; Permeabilitas; Stabilisasi; Tanggul; Tanah Lanau Berlempung.

1. LATAR BELAKANG

Tanah merupakan material utama dalam pekerjaan konstruksi sipil, khususnya pada pekerjaan timbunan jalan, tanggul, pondasi, dan prasarana lainnya. Kualitas tanah timbunan sangat menentukan kestabilan dan umur layanan suatu konstruksi. Salah satu jenis tanah yang sering dijumpai di lapangan adalah tanah lanau berlempung. Tanah ini memiliki karakteristik berbutir halus, plastisitas tertentu, mudah menyerap air, serta dapat mengalami perubahan sifat mekanis apabila kadar airnya berubah. Kondisi tersebut menyebabkan tanah lanau berlempung sering memerlukan perlakuan khusus sebelum digunakan sebagai material timbunan.

Salah satu parameter penting dalam menilai kelayakan tanah timbunan adalah koefisien permeabilitas. Koefisien permeabilitas menunjukkan kemampuan tanah dalam meloloskan air melalui pori-porinya. Pada pekerjaan timbunan, nilai permeabilitas yang tidak terkendali dapat menyebabkan air mudah masuk ke dalam tubuh timbunan, meningkatkan kejenuhan tanah, menurunkan kekuatan geser, dan memicu ketidakstabilan lereng atau penurunan tanah. Oleh karena itu, pengendalian permeabilitas menjadi aspek penting dalam perencanaan dan pelaksanaan pekerjaan Timbunan (Geng et al., 2024) (Andrus & Chung, 1995; Domphoeun & Eisazadeh, 2024; Fattah et al., 2018; Fredlund et al., 2011; Koś et al., 2021; Lech et al., 2020; Okeke, 2022; O'Shaughnessy et al., 2023; Pandey et al., 2023; Rakić et al., 2021; Salahudeen & Yisa, 2023).

Tanah lanau berlempung umumnya memiliki permeabilitas yang relatif rendah dibandingkan tanah berpasir, tetapi sifatnya sangat dipengaruhi oleh struktur butiran, tingkat kepadatan, kadar air, serta komposisi material penyusunnya. Apabila tanah tersebut digunakan sebagai timbunan tanpa perbaikan, maka potensi perubahan volume, penurunan daya dukung, dan gangguan akibat rembesan air dapat terjadi. Untuk mengurangi risiko tersebut, diperlukan upaya perbaikan sifat tanah melalui penambahan atau substitusi material tertentu.

Material substitusi dapat digunakan untuk memperbaiki susunan partikel tanah, mengisi rongga antarbutiran, meningkatkan kepadatan, serta mengubah karakteristik aliran air di dalam tanah. Variasi kadar substitusi yang berbeda dapat menghasilkan nilai koefisien permeabilitas yang berbeda pula. Pada kadar tertentu, material substitusi dapat menurunkan permeabilitas karena pori-pori tanah menjadi lebih rapat. Namun, pada kadar yang terlalu tinggi, material substitusi juga berpotensi menyebabkan struktur campuran menjadi tidak homogen sehingga nilai permeabilitas dapat berubah kembali.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian mengenai pengaruh variasi material substitusi terhadap koefisien permeabilitas pada timbunan tanah lanau berlempung penting dilakukan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai hubungan antara komposisi material substitusi dan perubahan nilai permeabilitas tanah, sehingga dapat ditentukan variasi campuran yang paling efektif untuk meningkatkan kualitas tanah timbunan.

2. KAJIAN TEORITIS

Tanah lanau berlempung merupakan salah satu jenis tanah berbutir halus yang banyak dijumpai pada pekerjaan konstruksi sipil, khususnya pada pekerjaan timbunan, jalan, tanggul, dan pondasi dangkal. Tanah ini memiliki karakteristik campuran antara fraksi lanau dan lempung, sehingga sifat teknisnya sangat dipengaruhi oleh ukuran butir, plastisitas, kadar air,

porositas, dan tingkat kepadatan. Keberadaan fraksi halus menyebabkan tanah lanau berlempung memiliki kemampuan menyerap air yang cukup tinggi dan dapat mengalami perubahan sifat apabila kondisi kadar air berubah. Dalam pekerjaan timbunan, kondisi tersebut perlu diperhatikan karena dapat memengaruhi stabilitas, daya dukung, serta kemampuan tanah dalam meloloskan air.

Salah satu parameter penting dalam menilai kualitas tanah timbunan adalah koefisien permeabilitas. Koefisien permeabilitas menunjukkan kemampuan tanah untuk mengalirkan air melalui pori-pori tanah. Nilai permeabilitas dipengaruhi oleh susunan partikel, ukuran pori, derajat kejenuhan, kepadatan tanah, gradasi butiran, dan struktur internal tanah. Pada tanah berbutir halus seperti lanau berlempung, aliran air umumnya berlangsung lebih lambat dibandingkan tanah berpasir karena pori-pori tanah lebih kecil dan jalur aliran air lebih kompleks. Namun, nilai permeabilitas tetap dapat berubah apabila tanah mengalami proses pemadatan, perubahan kadar air, atau penambahan material substitusi.

Dalam konteks pekerjaan timbunan, permeabilitas berperan penting terhadap pengendalian rembesan air. Tanah dengan permeabilitas yang tidak terkendali dapat menyebabkan air mudah masuk ke dalam tubuh timbunan, meningkatkan kadar air, menurunkan kekuatan geser, dan memicu potensi ketidakstabilan. Sebaliknya, tanah dengan struktur yang lebih rapat dan permeabilitas yang terkendali dapat membantu mengurangi aliran air berlebih di dalam timbunan. Oleh sebab itu, pengujian permeabilitas menjadi bagian penting dalam evaluasi kelayakan tanah lanau berlempung sebagai material timbunan.

Upaya perbaikan tanah lanau berlempung dapat dilakukan melalui stabilisasi atau substitusi material. Material substitusi merupakan bahan tambahan yang dicampurkan ke dalam tanah untuk memperbaiki sifat fisik dan hidraulik tanah. Material yang umum digunakan dalam berbagai penelitian antara lain kapur, semen, fly ash, abu sekam padi, abu daun bambu, pasir, serta material limbah industri yang memiliki sifat pozzolan atau kemampuan mengisi rongga antarpartikel. Penambahan material tersebut dapat mengubah susunan butiran tanah, memperbaiki gradasi, mengurangi plastisitas, meningkatkan kepadatan, serta memengaruhi nilai koefisien permeabilitas.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan fly ash pada tanah berbutir halus dapat memberikan pengaruh terhadap sifat geoteknik tanah. Fly ash memiliki ukuran partikel halus dan kandungan silika-alumina yang berpotensi membentuk reaksi pozzolan apabila dikombinasikan dengan bahan pengikat tertentu. Reaksi tersebut dapat menghasilkan ikatan antarpartikel yang lebih kuat, mengisi pori tanah, dan membentuk struktur tanah yang lebih padat. Dengan demikian, fly ash dapat berperan sebagai material substitusi yang tidak hanya

memperbaiki sifat mekanis tanah, tetapi juga memengaruhi karakteristik aliran air di dalam tanah.

Selain fly ash, kapur dan semen juga banyak digunakan sebagai bahan stabilisasi tanah berbutir halus (Domphoeun & Eisazadeh, 2024) (Di Sante et al., 2025) (Ahmed et al., 2024). Kapur dapat bereaksi dengan mineral lempung melalui proses pertukaran kation, flokulasi, aglomerasi, dan reaksi pozzolan. Proses tersebut dapat menurunkan plastisitas tanah dan memperbaiki struktur tanah menjadi lebih stabil. Sementara itu, semen berfungsi sebagai bahan pengikat yang dapat meningkatkan kekuatan dan kekakuan campuran tanah. Pada kondisi tertentu, penambahan kapur atau semen dapat memperkecil pori-pori tanah sehingga koefisien permeabilitas menurun. Namun, pengaruhnya sangat bergantung pada jenis tanah, kadar bahan tambah, kadar air, waktu pemeraman, dan tingkat pemadatan. (Turan, 2022) membahas stabilisasi tanah berbutir halus dengan fly ash dan merangkum pengaruhnya pada sifat pemadatan serta parameter geoteknik. (Zabielska-Adamska, 2020) menunjukkan bahwa konduktivitas hidraulik fly ash dipengaruhi oleh kadar air pemadatan, energi pemadatan, dan kondisi kejenuhan

Material berbasis limbah pertanian seperti abu sekam padi dan abu daun bambu juga mulai banyak dikaji sebagai alternatif bahan stabilisasi tanah (Abdulrahman et al., 2024; Ahmed et al., 2024) (Kabdiyono et al., 2026). Kajian terbaru tentang abu daun bambu juga menunjukkan potensinya sebagai material stabilisasi tanah karena kandungan silika dan sifat pozzolannya (Kabdiyono, 2019; Kabdiyono et al., 2025). Material tersebut umumnya mengandung silika yang berpotensi bereaksi secara pozzolan, terutama apabila dikombinasikan dengan kapur atau semen. Pemanfaatan material limbah sebagai substitusi tanah memiliki keunggulan dari aspek keberlanjutan karena dapat mengurangi limbah sekaligus menyediakan alternatif material perbaikan tanah yang lebih ekonomis. Dalam konteks penelitian ini, material substitusi dipandang sebagai bahan yang dapat memodifikasi struktur pori tanah lanau berlempung sehingga memengaruhi nilai koefisien permeabilitas.

Perubahan permeabilitas akibat penambahan material substitusi dapat dijelaskan melalui mekanisme fisik dan kimia. Secara fisik, partikel material substitusi dapat mengisi rongga antarbutiran tanah sehingga porositas berkurang dan jalur aliran air menjadi lebih sempit. Apabila campuran dipadatkan secara baik, struktur tanah menjadi lebih rapat dan kemampuan air untuk mengalir semakin rendah. Secara kimia, material yang memiliki sifat pozzolan dapat membentuk senyawa pengikat yang memperkuat hubungan antarpartikel tanah. Kombinasi antara pengisian pori dan pembentukan ikatan antarpartikel inilah yang dapat menyebabkan penurunan koefisien permeabilitas pada kadar substitusi tertentu.

Meskipun demikian, peningkatan kadar material substitusi tidak selalu menghasilkan penurunan permeabilitas secara linear. Pada kadar tertentu, material substitusi dapat menghasilkan campuran yang optimum karena mampu mengisi pori tanah secara efektif. Namun, apabila kadar substitusi terlalu tinggi, campuran dapat menjadi kurang homogen, membentuk rongga baru, atau mengubah gradasi tanah menjadi lebih terbuka. Kondisi tersebut dapat menyebabkan nilai permeabilitas kembali meningkat. Oleh karena itu, diperlukan variasi kadar substitusi dalam penelitian agar dapat diketahui komposisi campuran yang paling efektif dalam mengendalikan aliran air pada tanah lanau berlempung.

Faktor pemadatan juga memiliki hubungan erat dengan permeabilitas tanah. Tanah yang dipadatkan pada kadar air optimum cenderung memiliki susunan partikel yang lebih rapat dan nilai porositas yang lebih rendah. Semakin tinggi kepadatan kering tanah, semakin kecil ruang pori yang tersedia untuk aliran air. Namun, apabila kadar air terlalu tinggi atau terlalu rendah dari kondisi optimum, hasil pemadatan dapat menjadi kurang efektif sehingga struktur pori tanah tidak terbentuk secara ideal. Oleh karena itu, pengujian pemadatan perlu dilakukan sebelum pengujian permeabilitas agar sampel yang diuji dapat menggambarkan kondisi timbunan yang lebih representatif.

Metode pengujian permeabilitas juga menjadi aspek penting dalam penelitian ini. Untuk tanah berbutir halus seperti lanau berlempung, pengujian permeabilitas umumnya dilakukan dengan metode falling head karena aliran air dalam tanah berlangsung relatif lambat. Pengujian ini memungkinkan peneliti memperoleh nilai koefisien permeabilitas berdasarkan perubahan tinggi muka air dalam waktu tertentu. Hasil pengujian kemudian digunakan untuk membandingkan kemampuan tanah asli dan tanah yang telah dicampur material substitusi dalam meloloskan air.

Berdasarkan kajian pustaka, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai material substitusi pada tanah berbutir halus telah banyak membahas aspek kekuatan, plastisitas, CBR, dan stabilitas tanah. Namun, kajian yang secara khusus menempatkan koefisien permeabilitas sebagai parameter utama pada timbunan tanah lanau berlempung masih perlu dikembangkan. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki dasar konseptual yang kuat untuk menganalisis pengaruh variasi material substitusi terhadap nilai koefisien permeabilitas. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam menentukan komposisi material substitusi yang efektif untuk memperbaiki kualitas tanah lanau berlempung sebagai material timbunan.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium untuk menganalisis pengaruh variasi material substitusi terhadap koefisien permeabilitas pada timbunan tanah lanau berlempung. Metode ini dipilih karena pengujian laboratorium memungkinkan peneliti mengendalikan komposisi campuran, kadar air, proses pemadatan, serta kondisi pengujian sehingga perubahan nilai koefisien permeabilitas dapat diamati secara sistematis.

Tahap pertama adalah identifikasi masalah dan kajian pustaka. Tahapan ini telah dilaksanakan melalui penelusuran konsep mengenai karakteristik tanah lanau berlempung, permeabilitas tanah, stabilisasi tanah, material substitusi, serta hubungan antara porositas, pemadatan, dan kemampuan tanah dalam meloloskan air. Luaran dari tahap ini adalah kerangka konsep penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, serta rancangan awal variabel penelitian. Indikator capaian pada tahap ini adalah tersusunnya fokus penelitian dan parameter utama yang akan diuji, yaitu koefisien permeabilitas. Tahap ini menjadi tanggung jawab ketua peneliti.

Tahap kedua adalah pengambilan sampel tanah dan persiapan material substitusi. Sampel tanah yang digunakan adalah tanah lanau berlempung yang dipersiapkan sebagai material timbunan. Material substitusi disiapkan sesuai dengan jenis bahan yang digunakan dalam penelitian, kemudian dikeringkan, dihaluskan, dan disaring apabila diperlukan agar memiliki ukuran partikel yang sesuai. Luaran tahap ini adalah tersedianya sampel tanah asli dan material substitusi yang siap diuji. Indikator capaian adalah sampel memenuhi jumlah dan kondisi awal yang dibutuhkan untuk pengujian laboratorium. Tahap ini menjadi tanggung jawab anggota peneliti dan mitra laboratorium.

Tahap ketiga adalah pengujian karakteristik awal tanah. Pengujian ini meliputi kadar air, berat jenis, analisis ukuran butir, batas cair, batas plastis, indeks plastisitas, serta klasifikasi tanah. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa tanah yang digunakan termasuk dalam kategori tanah lanau berlempung dan untuk mengetahui kondisi awal tanah sebelum diberikan perlakuan substitusi. Luaran dari tahap ini adalah data sifat fisik tanah asli. Indikator capaian adalah diperolehnya data karakteristik tanah yang dapat digunakan sebagai dasar perbandingan terhadap sampel campuran. Tahap ini menjadi tanggung jawab anggota peneliti.

Tahap keempat adalah perancangan variasi campuran tanah dan material substitusi. Tanah asli tanpa substitusi digunakan sebagai sampel kontrol, sedangkan sampel perlakuan dibuat dengan penambahan material substitusi pada beberapa persentase tertentu terhadap berat tanah kering, misalnya 0%, 10%, 30%, 50% dan 70%, atau menyesuaikan rancangan penelitian.

Luaran tahap ini adalah komposisi variasi campuran yang akan diuji. Indikator capaian adalah tersusunnya variasi campuran yang jelas, terukur, dan dapat dibandingkan. Tahap ini menjadi tanggung jawab ketua peneliti bersama anggota peneliti.

Tahap kelima adalah proses pemadatan dan pembuatan benda uji. Setiap variasi campuran dipersiapkan dengan kadar air tertentu dan dipadatkan untuk memperoleh kondisi yang mendekati karakteristik tanah timbunan. Pemadatan dilakukan agar sampel memiliki kepadatan yang seragam sehingga pengaruh material substitusi terhadap permeabilitas dapat dianalisis secara lebih objektif. Luaran tahap ini adalah benda uji dari setiap variasi campuran. Indikator capaian adalah tersedianya benda uji yang homogen, memiliki kepadatan sesuai target, dan siap diuji permeabilitas. Tahap ini menjadi tanggung jawab anggota peneliti.

Tahap keenam adalah pengujian koefisien permeabilitas. Pengujian dilakukan terhadap tanah asli dan seluruh variasi campuran material substitusi. Untuk tanah berbutir halus seperti lanau berlempung, metode yang dapat digunakan adalah uji falling head permeability karena sesuai untuk tanah dengan laju aliran air relatif lambat. Data yang diperoleh berupa nilai koefisien permeabilitas pada setiap variasi campuran. Luaran tahap ini adalah data hasil pengujian permeabilitas. Indikator capaian adalah diperolehnya nilai koefisien permeabilitas yang dapat dibandingkan antarvariasi. Tahap ini menjadi tanggung jawab mitra laboratorium dengan pengawasan tim peneliti.

Tahap ketujuh adalah analisis data dan interpretasi hasil. Data hasil pengujian disusun dalam bentuk tabel dan grafik untuk menunjukkan hubungan antara persentase material substitusi dan nilai koefisien permeabilitas. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai permeabilitas tanah asli dengan masing-masing variasi campuran. Hasil analisis digunakan untuk mengetahui kecenderungan perubahan permeabilitas, menentukan variasi campuran yang paling efektif, serta menjelaskan mekanisme perubahan berdasarkan porositas, kepadatan, dan homogenitas campuran. Luaran tahap ini adalah hasil analisis, grafik hubungan, dan interpretasi pengaruh material substitusi. Indikator capaian adalah ditemukannya pola perubahan nilai permeabilitas dan kadar substitusi yang paling optimum. Tahap ini menjadi tanggung jawab ketua peneliti.

Tahap kedelapan adalah penyusunan laporan akhir, rekomendasi teknis, dan luaran publikasi. Hasil penelitian disusun menjadi laporan penelitian yang memuat pendahuluan, tinjauan pustaka, metode, hasil dan pembahasan, kesimpulan, serta saran. Selain itu, hasil penelitian juga direncanakan untuk disusun menjadi artikel ilmiah. Luaran tahap ini adalah laporan akhir, artikel ilmiah, serta rekomendasi teknis mengenai penggunaan material substitusi pada tanah lanau berlempung sebagai material timbunan. Indikator capaian adalah

tersusunnya laporan penelitian dan naskah artikel yang siap dipublikasikan. Tahap ini menjadi tanggung jawab seluruh tim peneliti.

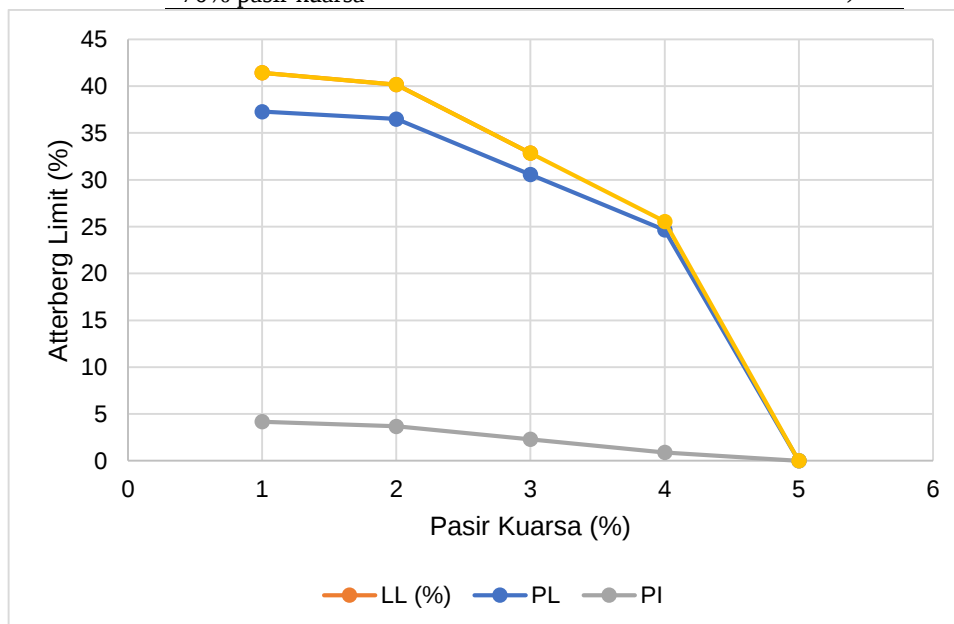
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini memuat proses pengumpulan data, rentang waktu dan lokasi penelitian, dan hasil analisis data (yang dapat didukung dengan ilustrasi dalam bentuk tabel atau gambar, bukan data mentah, serta bukan dalam bentuk *printscreen* hasil analisis), ulasan tentang keterkaitan antara hasil dan konsep dasar, dan atau hasil pengujian hipotesis (jika ada), serta kesesuaian atau pertentangan dengan hasil penelitian sebelumnya, beserta interpretasinya masing-masing. Bagian ini juga dapat memuat implikasi hasil penelitian, baik secara teoritis maupun terapan. Setiap gambar dan tabel yang digunakan harus diacu dan diberikan penjelasan di dalam teks, serta diberikan penomoran dan sumber acuan. Berikut ini diberikan contoh tata cara penulisan subjudul, sub-subjudul, sub-sub-subjdul, dan seterusnya.

Hasil Pengujian Propertis Fisik

Tabel 1. Hasil pengujian Batas- Batas Atterberg

Variable	LL (%)	PL (%)	PI (%)
Tanah Asli	41.44	37.28	4.17
10% pasir kuarsa	40.17	36.49	3.68
30% pasir kuarsa	32.86	30.57	2.29
50% pasir kuarsa	25.55	24.65	0.9
70% pasir kuarsa	18.24 / NP	NP	NP (Non-Plastic)



Gambar 1. Grafik hasil pengujian, penambahan pasir kuarsa memberikan pengaruh terhadap penurunan nilai Liquid Limit (LL), Plastic Limit (PL), dan Plasticity Index (PI) pada tanah lanau berlempung.

Berdasarkan gambar 1, penambahan pasir kuarsa memberikan pengaruh terhadap penurunan nilai Liquid Limit (LL), Plastic Limit (PL), dan Plasticity Index (PI) pada tanah lanau berlempung. Tanah asli memiliki nilai LL sebesar 41,44%, PL sebesar 37,28%, dan PI sebesar 4,17%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa tanah asli masih memiliki sifat plastis, meskipun tingkat plastisitasnya tergolong rendah.

Setelah dilakukan substitusi pasir kuarsa sebesar 10%, nilai LL menurun menjadi 40,17%, PL menjadi 36,49%, dan PI menjadi 3,68%. Penurunan ini menunjukkan bahwa penambahan pasir kuarsa mulai mengurangi sifat plastis tanah. Hal ini terjadi karena pasir kuarsa merupakan material non-plastis yang dapat mengurangi dominasi fraksi halus tanah lanau berlempung.

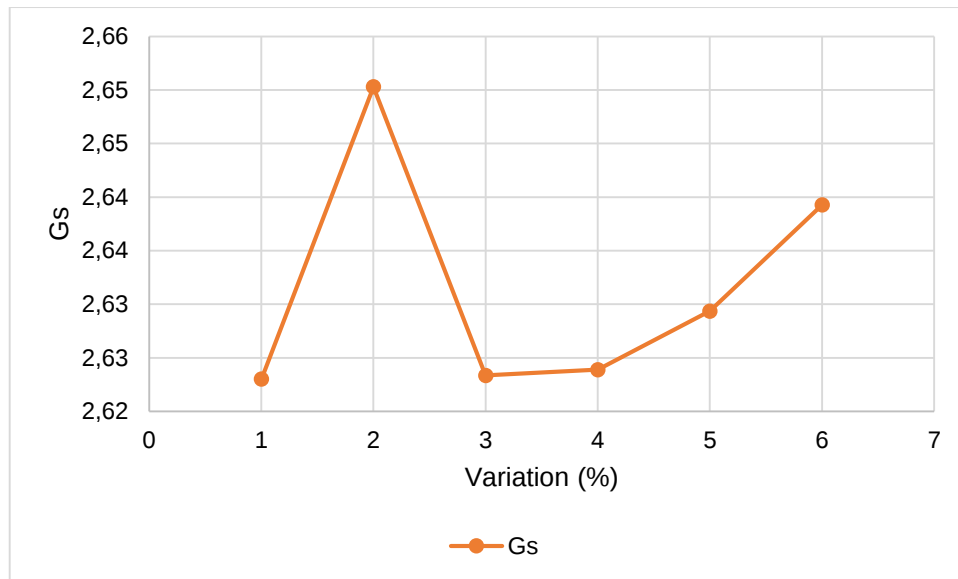
Pada variasi 30% pasir kuarsa, penurunan nilai Atterberg Limit terlihat lebih signifikan. Nilai LL turun menjadi 32,86%, PL menjadi 30,57%, dan PI menjadi 2,29%. Kondisi ini menunjukkan bahwa semakin besar kadar pasir kuarsa yang ditambahkan, semakin rendah kemampuan tanah dalam mengikat dan mempertahankan air. Akibatnya, batas cair dan batas plastis tanah ikut menurun.

Pada variasi 50% pasir kuarsa, nilai LL kembali menurun menjadi 25,55%, PL menjadi 24,65%, dan PI menjadi 0,90%. Nilai PI yang sangat kecil menunjukkan bahwa sifat plastis tanah hampir hilang. Campuran tanah pada kadar ini cenderung lebih didominasi oleh sifat granular pasir kuarsa dibandingkan sifat kohesif dari tanah lanau berlempung.

Pada variasi 70% pasir kuarsa, tanah menunjukkan kondisi NP (Non-Plastic). Artinya, campuran tanah tidak lagi memiliki sifat plastis yang dapat diukur melalui pengujian batas Atterberg. Hal ini disebabkan oleh dominasi pasir kuarsa yang bersifat non-kohesif dan tidak plastis, sehingga campuran tidak mampu membentuk kondisi plastis seperti tanah berlempung.

Tabel 2. Hasil pengujian Berat Jenis

Variasi	Gs
Tanah Asli	2.62
Pasir Kuarsa	2.65
10% pasir kuarsa	2.62
30% pasir kuarsa	2.62
50% pasir kuarsa	2.63
70% pasir kuarsa	2.64



Gambar 2. Hasil pengujian berat jenis butiran tanah Terhadap variasi campuran.

Gambar 2. Menunjukkan hasil pengujian berat jenis butiran tanah atau specific gravity (Gs) menunjukkan bahwa nilai Gs pada tanah asli adalah sebesar 2,62. Nilai tersebut masih berada pada kisaran umum tanah mineral berbutir halus, termasuk tanah lanau berlempung. Berat jenis tanah mencerminkan perbandingan antara berat volume butiran padat tanah terhadap berat volume air pada temperatur tertentu. Parameter ini penting karena berhubungan dengan karakteristik mineral penyusun tanah, perhitungan berat isi, angka pori, derajat kejenuhan, serta analisis pemadatan dan permeabilitas.

Berdasarkan data hasil pengujian, pasir kuarsa memiliki nilai Gs sebesar 2,65. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan tanah asli, sehingga secara teoritis penambahan pasir kuarsa ke dalam tanah lanau berlempung dapat meningkatkan nilai Gs campuran. Hal ini disebabkan oleh karakteristik pasir kuarsa yang tersusun dominan oleh mineral silika dengan berat jenis relatif lebih tinggi dibandingkan sebagian fraksi tanah halus. Dengan demikian, keberadaan pasir kuarsa dalam campuran dapat memengaruhi komposisi butiran padat tanah.

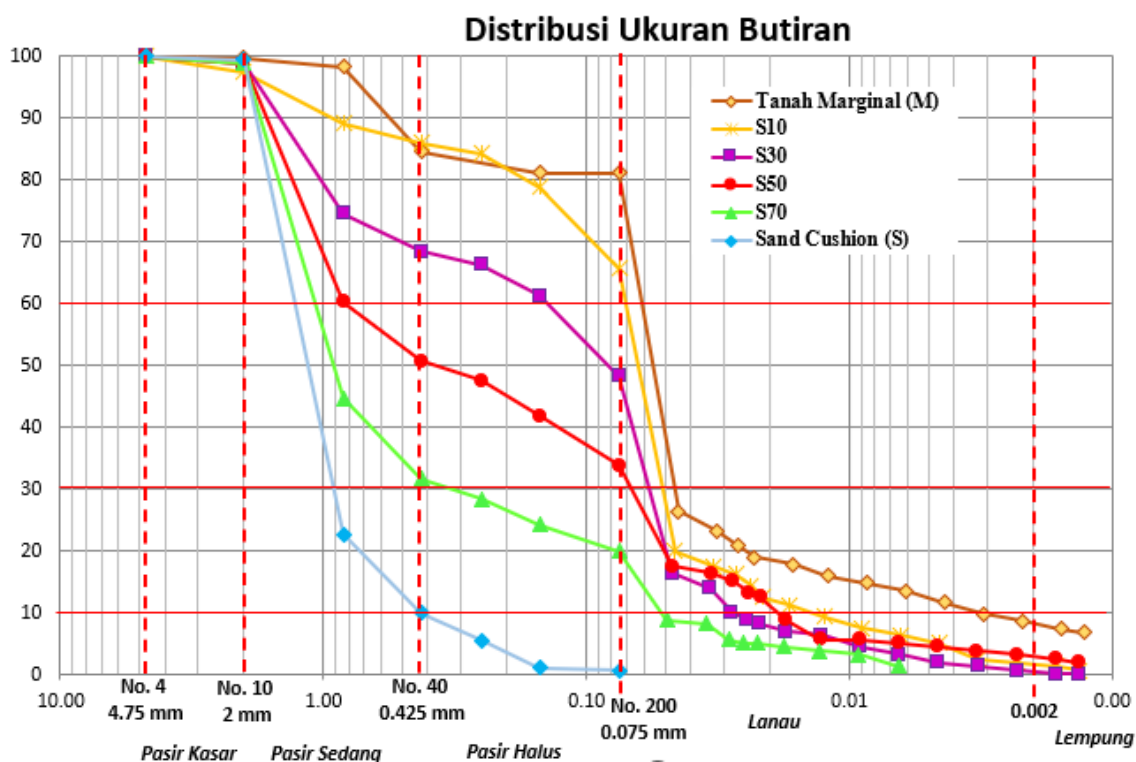
Pada campuran dengan kadar 10% dan 30% pasir kuarsa, nilai Gs tercatat sebesar 2,62. Nilai ini relatif sama dengan tanah asli. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penambahan pasir kuarsa pada kadar rendah hingga sedang belum memberikan perubahan yang signifikan terhadap berat jenis campuran. Hal ini dapat terjadi karena proporsi tanah lanau berlempung masih dominan dalam campuran, sehingga pengaruh pasir kuarsa terhadap nilai Gs total belum terlihat secara besar.

Pada campuran dengan kadar 50% pasir kuarsa, nilai Gs meningkat menjadi 2,63. Peningkatan ini menunjukkan mulai adanya pengaruh dari material pasir kuarsa terhadap komposisi butiran campuran. Meskipun kenaikannya relatif kecil, perubahan tersebut

memperlihatkan bahwa semakin besar kadar pasir kuarsa yang ditambahkan, maka nilai G_s campuran cenderung meningkat. Peningkatan G_s ini sejalan dengan bertambahnya proporsi material granular yang memiliki berat jenis lebih tinggi dibandingkan tanah asli.

Pada variasi 70% pasir kuarsa, nilai G_s meningkat lagi menjadi 2,64. Nilai ini mendekati G_s pasir kuarsa murni sebesar 2,65. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pada kadar substitusi tinggi, karakteristik campuran mulai lebih dipengaruhi oleh sifat pasir kuarsa dibandingkan tanah lanau berlempung. Dengan bertambahnya dominasi pasir kuarsa, berat jenis campuran mengalami peningkatan secara bertahap.

Grafik menunjukkan bahwa nilai G_s mengalami perubahan dalam rentang yang relatif kecil, yaitu antara 2,62 hingga 2,65. Perubahan ini menunjukkan bahwa variasi penambahan pasir kuarsa tidak menyebabkan perubahan berat jenis yang ekstrem. Namun, terdapat kecenderungan peningkatan nilai G_s pada kadar pasir kuarsa yang lebih tinggi, khususnya pada campuran 50% dan 70%. Hal ini mengindikasikan bahwa pasir kuarsa berperan dalam meningkatkan proporsi mineral berberat jenis lebih tinggi di dalam campuran tanah.



Gambar 3. Distribusi Ukuran Butiran Tanah Marginal dan Variasi Campuran Pasir Kuarsa

Pengujian distribusi ukuran butiran dilakukan untuk mengetahui perubahan gradasi tanah akibat penambahan pasir kuarsa pada tanah lanau berlempung. Distribusi ukuran butiran merupakan salah satu parameter penting dalam analisis geoteknik karena berpengaruh terhadap kepadatan, porositas, plastisitas, permeabilitas, serta karakteristik mekanis tanah. Semakin baik

gradasi suatu material, maka susunan butiran akan semakin rapat sehingga dapat memengaruhi perilaku hidraulik maupun kekuatan tanah.

Berdasarkan Gambar distribusi ukuran butiran, tanah marginal (M) menunjukkan dominasi fraksi halus, yang ditunjukkan oleh tingginya persentase butiran yang lolos saringan berukuran kecil hingga No. 200 (0,075 mm). Kondisi ini mengindikasikan bahwa tanah awal memiliki kandungan lanau dan lempung yang relatif tinggi. Karakteristik tersebut sesuai dengan sifat tanah lanau berlempung yang umumnya memiliki plastisitas lebih tinggi, kemampuan menyerap air yang besar, serta nilai permeabilitas yang rendah.

Sebaliknya, pasir kuarsa (Sand Cushion) memperlihatkan distribusi ukuran butiran yang didominasi oleh fraksi pasir. Hampir seluruh butiran tertahan pada saringan yang lebih kasar dan hanya sebagian kecil yang lolos hingga ukuran No. 200. Hal ini menunjukkan bahwa pasir kuarsa merupakan material granular yang bersifat non-plastis dengan ukuran butir relatif seragam. Karakteristik ini menjadikan pasir kuarsa berpotensi memperbaiki gradasi tanah apabila dicampurkan dengan tanah marginal.

Pada campuran 10% pasir kuarsa (S10), kurva distribusi ukuran butiran masih berada sangat dekat dengan kurva tanah marginal. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan pasir kuarsa dalam jumlah kecil belum memberikan perubahan yang signifikan terhadap komposisi gradasi tanah. Fraksi halus masih mendominasi campuran sehingga karakteristik tanah secara umum masih menyerupai tanah asli.

Pada campuran 30% pasir kuarsa (S30), kurva mulai bergeser ke bawah, terutama pada rentang ukuran pasir halus hingga lanau. Pergeseran ini menunjukkan bahwa jumlah partikel kasar dalam campuran mulai meningkat, sedangkan persentase fraksi halus mengalami penurunan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pasir kuarsa mulai menggantikan sebagian fraksi lanau dan lempung dalam campuran sehingga distribusi ukuran butiran menjadi lebih seimbang.

Perubahan yang lebih nyata terlihat pada campuran 50% pasir kuarsa (S50). Kurva distribusi ukuran butiran semakin mendekati karakteristik material granular. Persentase butiran yang lolos pada ukuran lanau dan lempung terus menurun, sedangkan fraksi pasir menjadi lebih dominan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa campuran mulai kehilangan karakteristik tanah kohesif dan berubah menjadi material dengan gradasi yang lebih kasar.

Pada campuran 70% pasir kuarsa (S70), kurva distribusi ukuran butiran semakin mendekati kurva pasir kuarsa. Sebagian besar fraksi halus telah tergantikan oleh pasir sehingga campuran didominasi oleh material berukuran pasir. Penurunan persentase lolos pada ukuran No. 200 menunjukkan bahwa kandungan lanau dan lempung menjadi jauh lebih kecil

dibandingkan tanah awal. Dengan demikian, struktur tanah berubah dari tanah berbutir halus menjadi campuran yang lebih granular.

Perubahan gradasi tersebut memberikan implikasi terhadap karakteristik fisik dan mekanis tanah. Berkurangnya fraksi halus menyebabkan plastisitas tanah menurun, sebagaimana ditunjukkan pada hasil pengujian Atterberg Limit sebelumnya. Selain itu, meningkatnya kandungan pasir kuarsa menyebabkan susunan butiran menjadi lebih terbuka sehingga pori-pori tanah berubah. Perubahan ini dapat memengaruhi proses pemadatan serta karakteristik permeabilitas tanah.

Grafik distribusi ukuran butiran menunjukkan bahwa semakin besar persentase pasir kuarsa yang ditambahkan, semakin besar perubahan gradasi tanah menuju karakteristik material granular. Pergeseran kurva dari tanah marginal menuju kurva pasir kuarsa membuktikan bahwa substitusi pasir kuarsa berhasil mengurangi kandungan fraksi halus dan meningkatkan proporsi fraksi pasir dalam campuran. Perubahan ini menjadi dasar untuk menjelaskan hasil pengujian plastisitas, pemadatan, dan permeabilitas yang diperoleh pada tahapan penelitian berikutnya.

Hasil Pengujian Propertis Mekanis

Pengujian koefisien permeabilitas dilakukan untuk mengetahui kemampuan tanah dan campuran tanah-pasir kuarsa dalam meloloskan air. Nilai koefisien permeabilitas atau K dinyatakan dalam satuan cm/detik. Semakin besar nilai K, maka semakin mudah air mengalir melalui pori-pori tanah. Sebaliknya, semakin kecil nilai K, maka semakin sulit air melewati struktur tanah tersebut. Dalam konteks material timbunan, nilai permeabilitas menjadi parameter penting karena berkaitan dengan rembesan air, perubahan kadar air, stabilitas timbunan, dan potensi peningkatan tekanan air pori.

Tabel 3. Hasil Pengujian Koefisien Permeabilitas Tanah Asli dan Variasi Campuran Pasir Kuarsa

SAMPLE	a (cm ²)	L (cm)	t (second)	h1 (cm)	h2 (cm)	K (cm/second)
Tanah Asli 1	1.256637	11.087	8100	115	50	0.00005061
Tanah Asli 2	0.125664	11.087	87900	531	50	0.00000132
Tanah Asli 3	0.125664	11.087	79800	531	115	0.00000094
pasir kuarsa 1	30.67962	13.5	300	229	1289.7	0.00826068
pasir kuarsa 2	30.67962	13.5	300	227	1267.2	0.00818808
pasir kuarsa 3	30.67962	13.5	300	223.5	1251.3	0.00821195
10% pasir kuarsa 1	0.125664	14.7	600	70	41	0.00005818
10% pasir kuarsa 2	0.125664	14.7	600	68	44	0.00004735

10% pasir kuarsa 3	0.125664	14.7	600	68	49	0.00003564
30% pasir kuarsa 1	0.125664	14.873	16200	104	65	0.00000169
30% pasir kuarsa 2	0.125664	14.873	68100	163	34	0.00000134
30% pasir kuarsa 3	0.125664	14.873	85800	248.5	46	0.00000114
50% pasir kuarsa 1	0.125664	10.818	8100	278	80	0.00000739
50% pasir kuarsa 2	0.125664	10.818	23280	294	278	0.00000012
50% pasir kuarsa 3	0.125664	10.818	79200	130	44	0.00000066
70% pasir kuarsa 1	0.125664	10.1767	6600	401	65	0.00001097
70% pasir kuarsa 2	0.125664	10.1767	13200	528	72	0.00000601
70% pasir kuarsa 3	0.125664	10.1767	10800	432	70	0.00000671

Berdasarkan hasil pengujian, tanah asli memiliki nilai koefisien permeabilitas yang bervariasi, yaitu 0,00005061 cm/detik pada sampel pertama, 0,00000132 cm/detik pada sampel kedua, dan 0,00000094 cm/detik pada sampel ketiga. Rata-rata nilai K tanah asli adalah sekitar 0,00001762 cm/detik. Nilai ini menunjukkan bahwa tanah asli memiliki kemampuan meloloskan air yang relatif rendah. Kondisi tersebut sesuai dengan karakteristik tanah lanau berlempung yang memiliki kandungan fraksi halus, pori-pori kecil, dan jalur aliran air yang tidak terlalu terbuka.

Pasir kuarsa murni menunjukkan nilai permeabilitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan tanah asli. Nilai K pasir kuarsa berturut-turut sebesar 0,00826068 cm/detik, 0,00818808 cm/detik, dan 0,00821195 cm/detik, dengan rata-rata sekitar 0,00822024 cm/detik. Nilai ini menunjukkan bahwa pasir kuarsa merupakan material granular yang sangat mudah meloloskan air. Hal ini disebabkan oleh ukuran butiran pasir yang lebih besar, sifatnya yang non-plastis, serta susunan pori yang lebih terbuka dibandingkan tanah lanau berlempung.

Pada campuran 10% pasir kuarsa, nilai koefisien permeabilitas tercatat sebesar 0,00005818 cm/detik, 0,00004735 cm/detik, dan 0,00003564 cm/detik, dengan rata-rata sekitar 0,00004706 cm/detik. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan rata-rata tanah asli. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan pasir kuarsa sebesar 10% mulai meningkatkan kemampuan tanah dalam meloloskan air. Secara fisik, partikel pasir kuarsa mulai membentuk ruang antarbutiran yang lebih besar dibandingkan struktur tanah asli, sehingga jalur aliran air menjadi lebih terbuka. Pada campuran 30% pasir kuarsa, nilai koefisien permeabilitas mengalami penurunan yang cukup signifikan, yaitu 0,00000169 cm/detik, 0,00000134 cm/detik, dan 0,00000114 cm/detik, dengan rata-rata sekitar 0,00000139 cm/detik. Nilai ini merupakan nilai

rata-rata paling rendah dibandingkan variasi lainnya. Penurunan tersebut mengindikasikan bahwa pada kadar 30%, pasir kuarsa dapat membantu memperbaiki susunan partikel tanah sehingga campuran menjadi lebih rapat. Pada kondisi ini, partikel pasir kuarsa kemungkinan berperan sebagai pengisi ruang antarbutiran tanah, sementara fraksi halus masih cukup dominan untuk mengisi pori-pori kecil. Kombinasi tersebut menghasilkan struktur campuran yang lebih padat dan lebih sulit dilalui air.

Pada campuran 50% pasir kuarsa, nilai K menunjukkan variasi yang cukup besar, yaitu 0,00000739 cm/detik, 0,00000012 cm/detik, dan 0,00000066 cm/detik, dengan rata-rata sekitar 0,00000272 cm/detik. Secara rata-rata, nilai ini masih tergolong rendah, tetapi lebih tinggi dibandingkan campuran 30%. Variasi nilai yang besar antarulangan menunjukkan adanya kemungkinan perbedaan tingkat homogenitas campuran atau kepadatan sampel saat pengujian. Pada kadar 50%, campuran mulai mengalami perubahan dari dominasi tanah halus menuju material yang lebih granular. Apabila pemadatan tidak merata, sebagian pori dapat tertutup rapat, tetapi sebagian lainnya dapat membentuk jalur aliran air yang lebih terbuka.

Pada campuran 70% pasir kuarsa, nilai koefisien permeabilitas meningkat menjadi 0,00001097 cm/detik, 0,00000601 cm/detik, dan 0,00000671 cm/detik, dengan rata-rata sekitar 0,00000790 cm/detik. Peningkatan ini menunjukkan bahwa dominasi pasir kuarsa mulai membentuk struktur pori yang lebih terbuka. Meskipun nilai K campuran 70% masih jauh lebih rendah dibandingkan pasir kuarsa murni, nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan campuran 30% dan 50%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar pasir kuarsa, terutama setelah melewati kadar optimum, maka campuran cenderung memiliki kemampuan meloloskan air yang lebih besar.

Berdasarkan rata-rata nilai K, campuran 30% pasir kuarsa memberikan nilai koefisien permeabilitas paling rendah, yaitu sekitar 0,00000139 cm/detik. Oleh karena itu, variasi 30% dapat dianggap sebagai campuran yang paling efektif dalam menurunkan permeabilitas tanah lanau berlempung. Campuran ini menunjukkan keseimbangan antara fraksi halus tanah dan fraksi pasir kuarsa, sehingga mampu menghasilkan struktur yang lebih padat dan mengurangi jalur aliran air.

Dengan demikian, hasil pengujian permeabilitas menunjukkan bahwa pasir kuarsa memiliki pengaruh nyata terhadap perubahan kemampuan tanah dalam meloloskan air. Pasir kuarsa murni memiliki permeabilitas paling tinggi, sedangkan campuran 30% pasir kuarsa menghasilkan permeabilitas paling rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan pasir kuarsa sebagai material substitusi perlu dikendalikan pada kadar tertentu. Apabila digunakan dalam jumlah yang tepat, pasir kuarsa dapat membantu memperbaiki struktur tanah dan

menurunkan permeabilitas. Namun, apabila digunakan secara berlebihan, campuran dapat menjadi lebih granular dan meningkatkan kembali kemampuan air untuk mengalir

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanah lanau berlempung memiliki plastisitas rendah dengan nilai *liquid limit* (LL) 41,44%, *plastic limit* (PL) 37,28%, *plasticity index* (PI) 4,17%, dan berat jenis 2,62. Berdasarkan distribusi ukuran butiran, tanah didominasi oleh fraksi halus sehingga berpotensi digunakan sebagai material timbunan, namun masih memerlukan perbaikan sifat teknis. Penambahan pasir kuarsa sebagai material substitusi memengaruhi nilai koefisien permeabilitas tanah. Nilai permeabilitas tanah asli sebesar 0,00001762 cm/detik, kemudian berubah menjadi 0,00004706 cm/detik pada campuran 10%, menurun menjadi 0,00000139 cm/detik pada campuran 30%, lalu meningkat kembali pada campuran 50% dan 70% masing-masing menjadi 0,00000272 cm/detik dan 0,00000790 cm/detik. Campuran 30% pasir kuarsa merupakan variasi yang paling efektif karena menghasilkan nilai permeabilitas terendah sehingga paling optimum dalam mengendalikan rembesan air. Pada kadar tersebut, pasir kuarsa mampu memperbaiki gradasi dan membentuk struktur campuran yang lebih rapat, sementara fraksi halus masih cukup mengisi rongga antarbutiran. Oleh karena itu, penggunaan pasir kuarsa dengan kadar tinggi, khususnya 70%, perlu dipertimbangkan secara cermat karena dapat meningkatkan kembali permeabilitas akibat dominasi butiran granular. Penentuan kadar substitusi sebaiknya mempertimbangkan plastisitas, permeabilitas, gradasi butiran, dan tingkat kepadatan tanah. Penelitian selanjutnya disarankan menambahkan pengujian parameter geoteknik lainnya agar efektivitas pasir kuarsa sebagai material substitusi dapat dievaluasi secara lebih komprehensif, tidak hanya dari aspek permeabilitas tetapi juga kekuatan dan stabilitas tanah timbunan secara keseluruhan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Bagian ini disediakan bagi penulis untuk menyampaikan ucapan terima kasih, baik kepada pihak penyandang dana penelitian, pendukung fasilitas, atau bantuan ulasan naskah. Bagian ini juga dapat digunakan untuk memberikan pernyataan atau penjelasan, apabila artikel ini merupakan bagian dari skripsi/tesis/disertasi/makalah konferensi/hasil penelitian.

DAFTAR REFERENSI

- Abdulrahman, S. M., Al Kindi, G. Y., & Ihsan, E. A. A. (2024). Sustainable stabilization of clay soil with rice husk ash. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 56(4), 450–462. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.4.2>
- Ahmed, A. A., El-Emam, M., Ahmad, N., & Attom, M. F. (2024). Stabilization of pavement subgrade clay soil using sugarcane ash and lime. *Geosciences*, 14(6), Article 151. <https://doi.org/10.3390/geosciences14060151>
- Andrus, R. D., & Chung, R. M. (1995). *Ground improvement techniques for liquefaction remediation near existing lifelines*. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.5714>
- Di Sante, M., Khan, M. K., Calò, L., Fratalocchi, E., & Mazzieri, F. (2025). The combined use of fly ash and lime to stabilize a clayey soil: A sustainable and promising approach. *Geosciences*, 15(9), Article 346. <https://doi.org/10.3390/geosciences15090346>
- Dompheun, R., & Eisazadeh, A. (2024). Flexural and shear strength properties of laterite soil stabilized with rice husk ash, coir fiber, and lime. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 11(4), 2148–2167. <https://doi.org/10.1007/s40515-023-00364-5>
- Fattah, M. Y., Ahmed, M. D., & Ali, N. (2018). Effect of hydraulic conductivity of unsaturated soil on the earth dam performance. *MATEC Web of Conferences*, 162, 01008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816201008>
- Fredlund, M. D., Lu, H., & Feng, T.-Q. (2011). Combined seepage and slope stability analysis of rapid drawdown scenarios for levee design (pp. 1595–1604). [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)163](https://doi.org/10.1061/41165(397)163)
- Geng, W., Song, Z., He, C., Wang, H., & Dong, X. (2024). The impact of fine-layering of tailings dam on the variation pattern of infiltration lines. *Applied Sciences*, 14(2), Article 950. <https://doi.org/10.3390/app14020950>
- Kabdiyono, E. A. (2019). Pengaruh penambahan abu daun bambu (BLA) dan kapur terhadap nilai CBR pada stabilisasi tanah lempung berlanau untuk konstruksi jalan. *Jurnal Ilmiah Desain & Konstruksi*, 18(1), 92–107. <https://doi.org/10.35760/dk.2019.v18i1.1961>
- Kabdiyono, E. A., Rahayu, W., Soepandji, B. S., Handika, N., & Wulandari, S. (2025). Effects of bamboo leaf ash on the residual strength of extremely high plasticity soils. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(3), 22770–22780. <https://doi.org/10.48084/etasr.10276>
- Kabdiyono, E. A., Rahayu, W., Soepandji, B. S., & Wulandari, S. (2026). Integrated physical-chemical approaches to reduce plasticity in extremely high-plastic soils using bamboo leaf ash: Geotechnical and microstructural evaluation. *International Journal of Technology*, 17(3), 1181. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v17i3.8293>
- Koś, K., Gruchot, A., & Zawisza, E. (2021). Bottom sediments from a dam reservoir as a core in embankments—Filtration and stability: A case study. *Sustainability*, 13(3), Article 1221. <https://doi.org/10.3390/su13031221>
- Lech, M., Skutnik, Z., Bajda, M., & Markowska-Lech, K. (2020). Applications of electrical resistivity surveys in solving selected geotechnical and environmental problems. *Applied Sciences*, 10(7), Article 2263. <https://doi.org/10.3390/app10072263>
- Okeke, T. E. (2022). Analysis of seepage through the dam considering various soil characteristics using an experimental and the finite element modeling technique. *Engineering and Technology Journal*, 7(10). <https://doi.org/10.47191/etj/v7i10.02>

- O'Shaughnessy, A., Dayioglu, A. Y., Davis, A. P., & Aydilek, A. H. (2023). *When roads want to be dams: Looking to dam safety to regulate transportation embankments*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2806120/v1>
- Pandey, B. R., Knoblauch, H., & Zenz, G. (2023). Slope stability evaluation due to reservoir draw-down using LEM and stress-based FEM along with Mohr-Coulomb criteria. *Water*, 15(22), Article 4022. <https://doi.org/10.3390/w15224022>
- Rakić, D., Basarić-Ikodinović, I., & Ljubojev, M. (2021). Filter rules for soil and geosynthetics. *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, 1(1–2), 1–12. <https://doi.org/10.5937/mmeb2101001R>
- Salahudeen, A. B., & Yisa, G. L. (2023). Settlement, slope stability and seepage analyses by numerical modelling method and their applications in practice. *Nigerian Journal of Technology*, 42(3), 306–314. <https://doi.org/10.4314/njt.v42i3.2>
- Turan, C., J. A. A., V. R., & C. O. (2022). Geotechnical characteristics of fine-grained soils stabilized with fly ash. *Sustainability*, 14(24), Article 16710. <https://doi.org/10.3390/su142416710>
- Zabielska-Adamska, K. (2020). Hydraulic conductivity of fly ash as a barrier material: Some problems in determination. *Environmental Earth Sciences*, 79(13), Article 321. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09070-8>