

TEKNOLOGI PENINGKATAN SIFAT MEKANIS TANAH LEMPUNG DENGAN METODE CAMPURAN BAHAN LIMBAH: REVIU ARTIKEL

**Handoko Santoso, Ayu Pramesthi Wijayanti, Zahra Assyafa Agia, Faizal Zulkarnain
Abdillah, Nasywa Salsabila, Muhammad Yunus K.A, Bayu Kumarajati, Yenny
Nurchasanah***

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jawa
Tengah, Indonesia

*Email: yn205@ums.ac.id

Abstrak

Tanah lempung adalah jenis tanah yang sering dijumpai di lapangan, tetapi memiliki banyak kekurangan dari sisi sifat mekanika, seperti daya dukung yang rendah, perubahan volume yang signifikan, dan tingkat permeabilitas yang rendah. Keadaan ini membuat tanah lempung kurang cocok digunakan sebagai material dasar untuk konstruksi tanpa adanya peningkatan terlebih dahulu. Salah satu cara yang biasa diterapkan untuk memperbaiki kualitas tanah lempung adalah dengan metode stabilisasi. Stabilisasi bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dan kestabilan tanah dengan mencampurkan bahan tertentu. Belakangan ini, penggunaan bahan limbah sebagai opsi untuk stabilisasi semakin banyak diteliti karena dianggap lebih ramah lingkungan dan hemat biaya. Beberapa jenis limbah yang sering digunakan antara lain abu sekam padi, abu terbang, serbuk kaca, limbah keramik, serta limbah dari industri lainnya. Penggunaan bahan-bahan ini terbukti dapat memperbaiki sifat mekanis tanah lempung, termasuk kuat tekan bebas, nilai CBR, kepadatan maksimum, batas plastis, dan batas cair. Karakteristik mekanis ini sangat vital dalam menilai kelayakan tanah untuk pembangunan bangunan dan infrastruktur. Di samping itu, penggunaan limbah juga berkontribusi dalam mengurangi dampak pencemaran lingkungan yang diakibatkan oleh penumpukan limbah. Berdasarkan berbagai studi sebelumnya, penggunaan limbah untuk stabilisasi tanah lempung terbukti dapat secara signifikan memperbaiki sifat mekanis tanah dan menjadikannya lebih cocok untuk digunakan dalam proyek sipil maupun konstruksi yang besar dan kompleks.

Kata kunci: abu sekam padi, limbah bata ringan, peningkatan sifat mekanis tanah, serbuk bata merah, stabilisasi tanah lempung

Abstract

Clay soil is a type of soil commonly found in the field, but it has several weaknesses in terms of mechanical properties such as low bearing capacity, high shrink-swell potential, and low permeability. These conditions make clay soil unsuitable to be used as a subgrade material for construction without prior improvement. One commonly used method to improve clay soil properties is stabilization. Stabilization is carried out to enhance the strength and stability of the soil by mixing it with certain materials. Recently, the use of waste materials as alternative stabilizing agents has been increasingly studied because it is considered more environmentally friendly and cost-effective. Several types of waste materials often utilized include rice husk ash, fly ash, glass powder, ceramic waste, and other industrial wastes. These materials have been proven to improve the mechanical properties of clay soil, such as unconfined compressive strength, CBR value, maximum dry density, plastic limit, and liquid limit. These mechanical properties are essential in determining the feasibility of soil for building and infrastructure construction. In addition, the use of waste also helps reduce environmental pollution caused by waste accumulation. Based on previous research, utilizing waste materials for clay soil stabilization significantly improves its mechanical properties and makes it more feasible for civil works and large-scale construction.

Keywords: clay soil stabilization, crushed brick powder, improvement of soil mechanical properties, lightweight brick waste, rice husk ash

1. PENDAHULUAN

Tanah dasar memiliki peran penting dalam proses perencanaan dan pelaksanaan konstruksi karena menjadi penopang utama bagi struktur bangunan. Oleh sebab itu, analisis terhadap karakteristik serta daya dukung tanah harus dilakukan sebelum pembangunan dimulai. Faktor ini memiliki dampak signifikan terhadap keandalan dan daya tahan struktur, terutama pada proyek infrastruktur seperti dasar bangunan, jembatan, serta jalan. Karakteristik dan mutu tanah sangat menentukan kemampuannya dalam menopang beban serta ketahanan terhadap deformasi dan kerusakan struktural (Santoso dkk., 2023).

Proses stabilisasi tanah merupakan pendekatan teknik yang dilakukan dengan tujuan untuk mengubah dan memperbaiki karakteristik fisik dan kimia tanah, sehingga tanah tersebut memenuhi kriteria teknis yang diperlukan dalam kegiatan konstruksi. Tujuan utamanya adalah agar tanah menjadi lebih kuat, lebih stabil, dan lebih mampu menahan beban serta beradaptasi dengan perubahan lingkungan baik dalam jangka pendek maupun panjang. Salah satu tujuan paling dasar dari stabilisasi tanah adalah untuk memastikan bahwa tanah tersebut tetap solid dan tidak mengalami deformasi yang berlebihan saat menerima beban struktural. Situasi ini sangat penting terutama dalam kondisi ekstrem, seperti curah hujan tinggi yang dapat meningkatkan kadar air dalam tanah atau musim kemarau yang bisa menyebabkan penurunan volume tanah. Dengan demikian, stabilisasi tanah berfungsi penting dalam mencegah terjadinya keruntuhan atau kerusakan yang dapat mempengaruhi integritas struktur yang berada di atasnya.

Lebih lanjut, pendekatan stabilisasi tanah juga memberikan peluang untuk memanfaatkan berbagai jenis material limbah atau sisa produksi industri yang selama ini dianggap tidak berguna. Jika material limbah tersebut memiliki karakteristik teknis yang sesuai, maka material tersebut dapat digunakan sebagai bahan tambah atau bahan pengganti dalam proses perbaikan tanah. Namun, penggunaannya perlu dilakukan dengan hati-hati dan terencana, dengan mempertimbangkan potensi dampak lingkungan yang mungkin timbul akibat penggunaannya dan memastikan ketersediaan bahan tersebut di sekitar lokasi proyek. Oleh karena itu, pendekatan ini tidak hanya memberikan solusi teknis untuk masalah kestabilan tanah, tetapi juga mendukung prinsip efisiensi biaya dan keberlanjutan lingkungan dalam praktik konstruksi.

Dalam pelaksanaan teknis di lapangan, stabilisasi tanah biasanya dilakukan melalui metode kimia, yaitu dengan menambahkan bahan-bahan kimia tertentu ke dalam massa tanah. Penambahan bahan kimia tersebut bertujuan untuk memperbaiki kualitas teknis tanah, seperti memperkuat daya tekan tanah, meningkatkan kapasitas dukung terhadap beban, serta meningkatkan ketahanan tanah terhadap perubahan volume akibat variasi kadar air. Dengan metode ini, diharapkan tanah yang sebelumnya tidak memenuhi standar teknik sipil dapat diubah menjadi tanah yang stabil dan mampu memenuhi kebutuhan rekayasa sipil yang kompleks.

Salah satu tipe tanah yang sering menjadi kendala dalam proyek konstruksi adalah tanah liat. Tanah liat dikenal memiliki kinerja teknis yang rendah karena sifat alaminya yang dapat berubah ukuran sesuai dengan kadar air di dalamnya. Selain itu, tanah ini juga memiliki kemampuan dukung yang rendah sehingga tidak cocok untuk dijadikan lapisan dasar dalam bangunan tanpa perbaikan terlebih dahulu. Berdasarkan definisi yang diajukan oleh Terzaghi pada tahun 1987, tanah liat adalah jenis tanah yang tersusun dari butiran-butiran berukuran sangat kecil, mulai dari mikroskopis hingga sub-mikroskopis. Butiran-butiran ini terbentuk akibat proses pelapukan secara kimia terhadap mineral-mineral yang berasal dari batuan induk, yang berlangsung dalam waktu yang sangat lama.

Di Indonesia, banyak struktur dibangun di atas tanah lempung. Jenis tanah ini kerap menjadi sumber masalah karena karakteristiknya yang memiliki daya dukung rendah, plastisitas tinggi, serta mudah berubah volume akibat perubahan kadar air. Tanah lempung terdiri dari partikel halus dan mengandung mineral seperti kaolinit atau montmorillonit yang sangat sensitif terhadap air (Gracella dkk., 2021). Ketika tanah menyerap air, volumenya dapat meningkat drastis dan mengurangi kekuatan geser, sementara saat mengering, tanah mengalami penyusutan yang bisa menyebabkan retak. Kondisi ini berdampak pada struktur di atasnya, seperti kerusakan jalan berupa penurunan, retakan, gelombang permukaan, hingga deformasi permanen (Renaningsih dkk., 2022 dan Mia, 2022). Untuk mengatasi permasalahan ini, teknik stabilisasi tanah menjadi solusi yang banyak diterapkan dan terus dikembangkan. Salah satu metode stabilisasi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan adalah dengan memanfaatkan limbah sebagai bahan tambah. Pendekatan ini dinilai lebih ekonomis, mengurangi ketergantungan terhadap bahan konvensional seperti semen dan kapur, sekaligus mengurangi volume limbah industri atau pertanian (Zakariya dkk., 2022).

Salah satu metode baru yang kini semakin banyak diteliti dalam dunia rekayasa geoteknik adalah penggunaan limbah konstruksi sebagai bahan untuk menstabilkan tanah. Strategi ini tidak hanya membantu mengurangi limbah dan polusi, tetapi juga dapat memperbaiki karakteristik fisik dan mekanik dari tanah dasar, khususnya tanah lempung yang dikenal memiliki kapasitas dukung yang rendah serta kecenderungan untuk mengembang.

Salah satu jenis limbah yang cukup relevan di sini adalah serbuk bata merah, yang dihasilkan dari pembongkaran bangunan lama atau dari pembuatan bata yang tidak terpakai. Meskipun sering dianggap sebagai limbah yang tidak berharga, serbuk bata merah memiliki kandungan silika yang tinggi, sekitar 55–65%, yang secara kimia dan fisik dapat meningkatkan struktur serta stabilitas tanah (Yulian dkk., 2023). Penelitian menunjukkan banyak keuntungan dari penggunaan serbuk bata merah dalam modifikasi tanah. Misbah dan Sundus (2021) menemukan bahwa mencampurkan tanah lempung dengan serbuk bata merah

sebanyak 5% dapat meningkatkan densitas tanah, mengurangi potensi pengembangan (swelling), dan secara signifikan menurunkan tekanan pengembangan hingga mencapai 87,38%. Selain itu, nilai California Bearing Ratio (CBR) dan kemampuan tekan bebas tanah juga meningkat, yang menunjukkan perbaikan dalam daya tahanan tanah terhadap beban vertikal dan lateral. Penelitian lain oleh Ara dkk. (2021) menemukan bahwa serbuk bata merah menghasilkan nilai kuat geser yang lebih tinggi dibandingkan bahan stabilisasi lain, seperti pasir silikon dan abu sekam padi. Temuan ini memperkuat posisi serbuk bata merah sebagai alternatif yang hemat biaya dan ramah lingkungan untuk meningkatkan daya dukung tanah.

Lebih jauh lagi, penelitian oleh Eryuningsih dan Wulandari (2024) menunjukkan bahwa penambahan serbuk bata merah tidak hanya meningkatkan kohesi dan sudut geser dalam parameter kuat geser tanah, tetapi juga mempercepat proses konsolidasi, yang penting untuk mempercepat stabilisasi tanah lembek sebelum dibangun struktur di atasnya. Namun, perlu diingat bahwa penggunaan serbuk bata merah dalam jumlah yang berlebihan dapat memberikan efek negatif. Pada kadar tertentu, peningkatan serbuk bata dapat menurunkan nilai kohesi dan sudut geser, yang pada akhirnya dapat mengurangi kekuatan internal tanah dan menurunkan stabilitas keseluruhan. Oleh karena itu, penting untuk melakukan analisis di laboratorium dengan teliti untuk menentukan proporsi optimal penggunaannya agar manfaat yang diperoleh dapat dimaksimalkan tanpa menemui dampak negatif pada stabilitas tanah. Salah satu bahan alternatif yang memiliki potensi besar dalam perbaikan tanah adalah abu dari sekam padi. Bahan ini berasal dari limbah pembakaran sekam yang dihasilkan dalam proses pertanian padi, dan secara kimiawi kaya akan silika dalam bentuk amorf. Silika amorf ini membuat abu sekam padi berperan sebagai bahan pozzolan, yang dapat bereaksi secara kimia dengan kalsium (Ca) dalam tanah. Reaksi tersebut menghasilkan senyawa pengikat tambahan yang membantu meningkatkan kekuatan dan stabilitas tanah, terutama dalam kemampuan dukungannya.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Ara dan tim (2021), ditemukan bahwa mencampurkan 15% abu sekam padi ke dalam tanah memberikan dampak positif terhadap karakteristik mekanik tanah. Penambahan ini terbukti meningkatkan kemampuan dukung tanah serta mengurangi kadar air optimum dan indeks plastisitas. Penurunan pada indeks plastisitas menunjukkan bahwa tanah menjadi kurang plastis, yang berarti tanah tersebut lebih stabil terhadap fluktuasi kondisi kelembaban. Hal ini sejalan dengan temuan dari Frida dan Yulianti (2022), yang menyatakan bahwa tanah dengan plastisitas rendah memiliki ketahanan lebih baik terhadap perubahan lingkungan, sehingga cocok untuk tujuan konstruksi. Dengan demikian, abu sekam padi bukan hanya berfungsi sebagai cara pengelolaan limbah pertanian, tetapi juga memberikan keuntungan teknis dalam memperbaiki sifat tanah.

Limbah dari bata ringan, yang dikenal juga sebagai beton seluler autoclaved (AAC), memiliki peluang besar untuk digunakan sebagai bahan alternatif dalam usaha stabilisasi tanah. Penelitian yang dilakukan oleh Wiqoyah dan timnya (2024) menunjukkan bahwa menambahkan material limbah AAC ke dalam tanah dapat meningkatkan kapasitas dukung dan memperbaiki kepadatannya. Beragam campuran telah diuji dalam studi tersebut, dan hasilnya mengindikasikan bahwa tambahan limbah AAC sebesar 15% adalah konsentrasi yang paling efektif. Pada tingkat ini, plastisitas tanah mengalami penurunan yang signifikan (Ngurah Wardana, 2009), sementara kepadatan maksimum tercapai (B. M. Das, 1988), yang menunjukkan peningkatan keseluruhan pada karakteristik fisik tanah.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa limbah AAC bisa dimanfaatkan dengan baik sebagai bahan untuk stabilisasi, terutama pada jenis tanah ekspansif yang sangat rentan terhadap perubahan kadar air. Ini sangat penting mengingat tanah jenis ini cenderung mengalami perubahan volume akibat variasi kelembaban, yang dapat mengganggu stabilitas struktur di atasnya (Raswitaningrum dan Juliayatna, 2017). Karena itu, penggunaan limbah bata ringan tidak hanya menyediakan solusi teknis yang efisien, tetapi juga mendukung konsep pembangunan berkelanjutan dengan cara mengurangi sampah konstruksi dan memperbaiki performa geoteknik tanah.

Penelitian yang dilakukan oleh Ani Firda dan Dimitri Yulianti yang diterbitkan dalam Jurnal Deformasi mengungkapkan bahwa penggunaan fly ash bersama dengan resin epoxy sebagai bahan untuk menstabilkan tanah dapat secara signifikan meningkatkan kemampuan dukung tanah yang digunakan di Jalur Irigasi Palembang. Tanah di area tersebut memiliki sifat yang ekspansif dan daya dukung yang cukup rendah, yang seringkali mengakibatkan deformasi akibat tekanan lalu lintas yang cukup tinggi. Oleh karena itu, diperlukan solusi yang efektif untuk menstabilkan tanah agar lebih kuat dan lebih stabil.

Temuan dari penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan 10% fly ash dan 25% resin epoxy pada tanah menghasilkan nilai CBR yang paling optimal, yang berkontribusi pada peningkatan kekuatan tanah darurat secara signifikan. Sebaliknya, penambahan 15% fly ash bersamaan dengan 25% resin epoxy menghasilkan penurunan pada nilai CBR, meskipun masih memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan

tanah awal yang tanpa perlakuan. Di samping itu, pengujian triaxial juga mengindikasikan adanya kenaikan nilai kohesi tanah, yang menunjukkan perbaikan dalam stabilitas tanah tersebut.

Peningkatan juga terlihat pada sudut geser dalam (ϕ), yang menunjukkan bahwa tanah menjadi lebih tahan terhadap gaya geser, sehingga lebih stabil untuk dijadikan lapisan dasar pada infrastruktur jalan. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi antara fly ash dan resin epoxy dapat menjadi solusi yang efektif untuk meningkatkan kualitas tanah di wilayah-wilayah yang mengalami masalah dengan daya dukung yang rendah, seperti yang ditemukan di Jalur Irigasi Palembang (Firda dan Yulianti, 2022).

Secara umum, limbah ini dikenal sebagai salah satu cara yang baik untuk lingkungan, ekonomis, dan mudah digunakan dalam proses stabilisasi tanah, yang memberikan banyak manfaat untuk ekosistem dan perekonomian. Metode ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada bahan-bahan tradisional seperti kapur dan semen yang sering dipakai dalam konstruksi konvensional, tetapi juga berkontribusi signifikan dalam mengurangi jumlah limbah dari sektor konstruksi dan pertanian yang sering dibuang sembarangan, yang bisa mengakibatkan pencemaran serta efek negatif lainnya.

Dengan memanfaatkan limbah ini, kita tidak hanya dapat mengurangi dampak terhadap lingkungan, tetapi juga mendukung pengelolaan sumber daya yang lebih berkelanjutan dan menawarkan alternatif solusi yang lebih bersahabat dengan ekosistem sambil menekan biaya operasi di bidang konstruksi.

2. HASIL DAN PEMBAHASAN

2.1. Stabilisasi Tanah Lempung

Kebanyakan kondisi tanah di area proyek menunjukkan karakteristik yang tidak sesuai dengan standar teknis misalnya, kepadatan yang rendah, kualitas tanah yang buruk, lapisan tanah yang tidak kuat secara struktural, serta tidak adanya daya dukung yang cukup untuk mendukung beban bangunan atau infrastruktur yang direncanakan. Oleh karena itu, diperlukan tindakan perbaikan untuk meningkatkan sifat teknis tanah.

Salah satu metode yang sering digunakan adalah proses stabilisasi tanah. Menurut Panguriseng (2001), stabilisasi tanah adalah teknik dalam rekayasa geoteknik yang bertujuan untuk memperbaiki kekuatan, kekakuan, dan daya dukung tanah melalui perlakuan tertentu, baik secara mekanis, kimia, atau kombinasi keduanya. Proses ini dilaksanakan dengan menambahkan bahan-bahan stabilisasi seperti sekam padi, flyash, kapur, abu terbang, atau bahan aditif lainnya, atau dengan cara memadatkan tanah kembali agar struktur partikel tanah menjadi lebih rapat dan stabil.

Penelitian tentang penguatan atau penstabilan tanah melalui metode perbaikan kimia telah dilakukan oleh banyak peneliti selama beberapa dekade terakhir. Salah satu metode yang sering diterapkan adalah mencampurkan bahan stabilisasi seperti kapur dan abu sekam padi untuk memperbaiki sifat fisik dan mekanik tanah. Keefektifan dari proses penstabilan ini dipengaruhi oleh sejumlah faktor, termasuk karakteristik tanah awal, jenis serta proporsi bahan tambahan, kondisi pencampuran, dan durasi pemeraman atau curing.

Secara umum, berbagai penelitian menunjukkan bahwa pemakaian bahan-bahan ini memberikan dampak positif pada peningkatan daya dukung tanah dan pengurangan plastisitas. Abu sekam padi khususnya dipilih sebagai bahan tambahan dalam proses penstabilan karena kaya akan senyawa silika (SiO_2) dan bahan pozzolan yang bersifat reaktif. Menurut Widhiarto dan timnya (2015), abu sekam padi juga mengandung kalsium bebas dan aluminium dioksida yang bereaksi dengan kapur untuk membentuk senyawa semen alami seperti kalsium silikat hidrat (CSH) dan kalsium aluminat hidrat (CAH), yang sangat penting dalam memperkuat struktur tanah secara permanen. Oleh karena itu, penggunaan abu sekam padi tidak hanya ramah lingkungan dan ekonomis, tetapi juga terbukti secara teknis dapat meningkatkan stabilitas dan kinerja tanah dasar untuk berbagai aplikasi geoteknik.

Penelitian oleh Ratna Dewi dkk. (2022) memperkuat temuan bahwa serbuk limbah keramik memiliki potensi besar sebagai bahan stabilisasi tanah lempung ekspansif. Dalam penelitian ini, serbuk keramik dari industri ubin dicampur ke tanah lempung dalam variasi 3% hingga 15%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan 15% serbuk keramik menghasilkan kepadatan kering maksimum sebesar $1,410 \text{ gr/cm}^3$ dan menurunkan kadar air optimum menjadi 28%, dibandingkan tanah asli yang memiliki kadar air optimum 31,3% dan kepadatan kering $1,326 \text{ gr/cm}^3$.

Selain itu, nilai indeks plastisitas (IP) menurun drastis dari 56,22% menjadi 16,26%, mengindikasikan bahwa tanah menjadi jauh lebih stabil dan kurang ekspansif. Kandungan SiO_2 (hingga 43,38%) dan Al_2O_3 (hingga 14,12%) dalam serbuk keramik memicu reaksi pozzolanik dengan kalsium hidroksida dalam tanah, membentuk senyawa semen (C-S-H) yang memperkuat ikatan antar partikel tanah.

Foto SEM memperlihatkan adanya pengikatan antar butir tanah dan pengurangan pori akibat proses sementasi internal. Temuan ini membuktikan bahwa serbuk limbah keramik tidak hanya mengurangi potensi

kembang susut dan plastisitas tanah, tetapi juga meningkatkan kemampuan pemadatan dan kekuatan tanah secara keseluruhan. Dengan demikian, serbuk limbah keramik menjadi alternatif bahan stabilisasi yang ekonomis dan ramah lingkungan, terutama untuk proyek-proyek konstruksi di atas tanah ekspansif.

Penelitian serupa oleh Rangan dkk. (2021) membuktikan bahwa limbah keramik, yang umumnya merupakan sisa material dari renovasi bangunan, juga dapat digunakan untuk meningkatkan stabilitas tanah lempung ekspansif. Dengan mencampurkan limbah keramik sebesar 5%, 10%, dan 15%, terjadi peningkatan nilai CBR dari 1,12% menjadi 6,09%. Di sisi lain, kadar air optimum juga meningkat dari 18,09% menjadi 23,44%, dan kepadatan kering meningkat dari 1,282 g/cm³ menjadi 1,317 g/cm³. Hasil ini menunjukkan bahwa limbah keramik dapat memperkuat struktur tanah sekaligus mengurangi masalah lingkungan akibat limbah konstruksi.

Penelitian dengan bahan limbah abu sekam padi oleh Pramesthi (2017) mengenai pemanfaatan untuk menstabilkan tanah, ditemukan bahwa penambahan abu sekam padi dengan beragam kadar terhadap berat kering sampel tanah lempung memberikan dampak signifikan pada sifat mekanik tanah tersebut. Widhiarto dkk. (2015) menyatakan bahwa abu sekam padi banyak mengandung silika dan material pozzolan karena mengandung unsur kapur bebas yang dapat mengeras dengan sendirinya, disamping mengandung unsur aluminium dioksida yang keduanya merupakan unsur-unsur yang mudah bereaksi dengan kapur. Abdurrozaq & Azzanna (2017), melakukan penelitian pengaruh penambahan abu sekam padi terhadap kapasitas dukung pondasi dangkal pada tanah gambut. Peningkatan maksimum kapasitas dukung tanah didapatkan pada kadar abu sekam padi 11% dengan diperam selama 7 hari, yang meningkatkan kapasitas dukung sebesar 100% dibanding kapasitas dukung pondasi pada tanah tanpa penambahan abu sekam padi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kandungan abu sekam padi sampai batas 5% cenderung memperbaiki karakteristik tanah, terutama dalam meningkatkan nilai kohesi dan sudut geser dalam. Namun, saat kandungan abu sekam padi yang ditambahkan melebihi 5%, terjadi penurunan pada nilai kohesi serta sudut geser dalam tanah lempung. Ini menunjukkan bahwa ada batas optimal dalam penggunaan abu sekam padi untuk stabilisasi tanah, di mana jika dilampaui, justru dapat berpengaruh negatif pada kekuatan geser tanah. Oleh karena itu, pemilihan kadar bahan stabilisasi harus dilakukan dengan cermat agar tidak merusak kinerja tanah yang telah distabilisasi.

Menurut penelitian oleh Hermirianda (2018), ditemukan bahwa menambahkan 5% abu sekam padi ke dalam campuran tanah memberikan efek signifikan terhadap peningkatan nilai California Bearing Ratio (CBR). CBR adalah parameter krusial untuk mengevaluasi kekuatan lapisan tanah dasar di proyek jalan. Selain itu, penerapan abu sekam padi juga dapat meningkatkan permeabilitas tanah, yang mempermudah aliran air melalui pori-pori tanah. Di sisi lain, nilai ekspansi tanah yang sebelumnya tinggi mengalami penurunan, menandakan bahwa tanah menjadi lebih stabil dan tidak rentan mengembang akibat perubahan tingkat kelembaban.

Sementara itu, penelitian oleh Jimmyanto (2014) mengenai stabilisasi tanah menggunakan kombinasi abu sekam dan limbah plastik menunjukkan bahwa penggunaan bahan alternatif ini meningkatkan karakteristik mekanik tanah, terutama dalam hal kohesi dan sudut geser. Peningkatan kedua aspek ini menunjukkan bahwa tanah yang distabilisasi memiliki daya dukung dan ketahanan geser yang lebih baik, yang sangat mendukung kestabilan bangunan atau konstruksi di atasnya.

Hasil dari penelitian laboratorium menunjukkan bahwa kombinasi tanah lempung lunak yang diberi tambahan 1% kantong plastik dan 1% abu sekam padi menghasilkan angka kohesi tertinggi, yaitu 0,582 kg/cm². Angka kohesi ini menunjukkan peningkatan yang signifikan jika dibandingkan dengan kohesi tanah asli tanpa tambahan, yang menunjukkan bahwa penambahan bahan tersebut dapat memperbaiki kemampuan pengikatan antar butir tanah. Sementara itu, parameter kuat geser lainnya, yaitu sudut geser dalam (ϕ), mencapai nilai tertinggi sebesar 10,5070 pada campuran tanah yang ditambahkan dengan 2% kantong plastik dan 2% abu sekam padi. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi bahan tambahan tersebut berkontribusi pada peningkatan ketahanan tanah terhadap gaya geser, terutama di bawah kondisi pembebanan lateral.

Lebih jauh, kombinasi tanah yang mengandung 1% plastik dan 1% abu dari sekam padi terbukti berhasil meningkatkan kekuatan geser tanah secara keseluruhan hingga 67,57% dibandingkan dengan kondisi tanah awal tanpa aditif. Ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah plastik dan abu sekam padi tidak hanya berkontribusi positif terhadap lingkungan dengan menggunakan bahan-bahan bekas, tetapi juga secara teknis meningkatkan karakteristik mekanik tanah lempung yang lunak.

Penemuan ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Abdurrozaq dan Mufti (2017), di mana mereka menggunakan abu sekam padi sebagai bahan stabilisasi tanah untuk mengevaluasi nilai California Bearing Ratio (CBR) dan sifat pengembangan (swelling) tanah. Dalam penelitian tersebut,

penambahan 3% abu sekam padi dan 4% kapur pada tanah menghasilkan peningkatan nilai CBR sebesar 212%, yang menunjukkan peningkatan kekuatan dukung tanah yang sangat signifikan. Selain itu, kemampuan tanah dalam menyerap air dan mengembang mengalami penurunan drastis, dari 4,8% menjadi hanya 0,032%, ketika dicampur dengan 7% abu sekam padi dan 4% kapur.

Secara keseluruhan, hasil-hasil ini memberikan bukti kuat bahwa penambahan kantong plastik dan abu sekam padi, baik secara terpisah maupun dalam kombinasi, dapat meningkatkan parameter teknik penting pada tanah lempung lunak, seperti kohesi, sudut geser, daya dukung, dan stabilitas terhadap pengembangan. Oleh karena itu, pendekatan ini berpotensi besar untuk diterapkan dalam perbaikan tanah di bidang geoteknik, khususnya dalam pembangunan infrastruktur di atas tanah lempung yang memiliki daya dukung rendah.

Selain penggunaan abu sekam padi, keramik dan limbah plastik, penelitian lain oleh Hangge dkk. (2021) menunjukkan bahwa fly ash, terutama jika dikombinasikan dengan kapur, juga sangat efektif sebagai bahan stabilisasi tanah lempung ekspansif. Dalam studi tersebut, kombinasi 5% kapur dengan fly ash dalam variasi 10–25% menunjukkan perbaikan signifikan pada sifat fisik dan mekanik tanah.

Penambahan fly ash menyebabkan peningkatan nilai CBR hingga 620,56% dan penurunan nilai pengembangan tanah hingga 69,34% setelah pemeraman selama 7 hari. Perubahan ini disebabkan oleh reaksi pozzolanik antara fly ash dan kapur yang membentuk senyawa pengikat seperti CSH dan CAH. Selain itu, penggunaan fly ash turut mengurangi nilai indeks plastisitas, kadar air optimum, dan kadar kembang susut tanah, sambil meningkatkan berat volume kering maksimum dan kepadatan tanah.

Penelitian lain yang turut memperkuat efektivitas fly ash sebagai bahan stabilisasi dilakukan oleh Siregar dkk. (2021). Dalam studi ini, tanah lempung dari Cot Kayee Adang, Lhokseumawe, distabilisasi dengan fly ash dalam variasi 5%, 10%, 15%, dan 20% dengan masa pemeraman 1 hari. Hasil menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada daya dukung tanah. Nilai CBR unsoaked meningkat dari 13,9% menjadi 17,7% pada campuran 15% fly ash, sedangkan nilai CBR soaked meningkat dari 5,1% menjadi 7,7% pada campuran 10% fly ash.

Selain itu, penambahan fly ash juga menurunkan indeks plastisitas (PI) dari 15,24% menjadi 8,10% pada kadar 20%, dan menurunkan berat jenis tanah dari 2,65 menjadi 2,61. Peningkatan kadar fly ash menyebabkan kenaikan kadar air optimum (w_{opt}) dari 23% menjadi 29,2%, serta penurunan kepadatan maksimum dari 1,54 gr/cm³ menjadi 1,43 gr/cm³. Penurunan plastisitas dan peningkatan nilai CBR ini menunjukkan bahwa fly ash memberikan kontribusi positif dalam memperkuat struktur tanah dan mengurangi sifat ekspansif tanah lempung.

Studi kasus yang dilakukan oleh Siregar dkk. (2021) menggunakan fly ash dari PLTU Nagan Raya untuk mencampur tanah lempung lokal dalam variasi 5–20%. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan fly ash mampu menurunkan nilai indeks plastisitas dari 15,24% menjadi 8,10%, serta meningkatkan nilai CBR unsoaked dari 13,9% menjadi 17,7% pada kadar 15%. Pada CBR soaked, nilai tertinggi 7,7% diperoleh pada campuran 10% fly ash. Temuan ini menunjukkan bahwa fly ash mampu meningkatkan daya dukung dan mengurangi plastisitas tanah. Walaupun nilai kepadatan maksimum sedikit menurun, namun peningkatan kadar air optimum serta kestabilan tanah yang lebih baik membuat fly ash efektif untuk digunakan sebagai bahan stabilisasi.

Serbuk bata merah diambil sebagai pilihan bahan tambahan dalam campuran tanah atau konstruksi karena ketersediaannya yang melimpah sebagai limbah dari proyek konstruksi, terutama dari pembangunan rumah sederhana atau proyek kecil lainnya. Limbah ini sering kali tidak dimanfaatkan dengan baik dan hanya menjadi sisa, sehingga penggunaan kembali sebagai bahan tambahan dalam konstruksi dapat memberikan manfaat tambahan dan mengurangi pencemaran lingkungan. Serbuk bata merah memiliki sifat fisik yang mirip dengan pasir alami, baik dari ukuran partikel maupun teksturnya yang cukup kokoh. Karena itu, di masa lalu, serbuk ini sering dimanfaatkan sebagai bahan alternatif atau tambahan dalam pembuatan campuran semen atau mortar. Selain memberikan tekstur yang mendukung ketahanan struktur, penggunaannya juga dianggap menguntungkan dari segi biaya dan ramah lingkungan. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Firdaus dan Fauziah (2018) dengan judul “Dampak Penambahan Abu Vulkanik dan Serbuk Bata Merah Terhadap Nilai CBR, Kembang Susut, dan Permeabilitas Tanah Lempung,” serbuk bata merah digunakan sebagai bahan untuk menstabilkan tanah. Temuan penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan serbuk bata merah dapat memengaruhi sifat mekanis tanah lempung, seperti meningkatkan nilai CBR (California Bearing Ratio), mengurangi potensi kembang susut, serta memengaruhi tingkat permeabilitas, yang pada akhirnya meningkatkan daya dukung tanah dan stabilitas struktur bangunan yang berdiri di atasnya.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi tanah yang ideal untuk mencapai nilai CBR maksimum adalah dengan menambahkan 5% abu vulkanik dan 3% bubuk bata merah. Campuran ini

menghasilkan nilai CBR terdahsyat, baik dalam keadaan jenuh air maupun tidak jenuh, serta menyebabkan pengembangan tanah yang paling sedikit. Meski nilai koefisien permeabilitas terendah terdapat pada campuran yang mengandung 7% bubuk bata merah, penambahan 3% bubuk bata merah saja sudah cukup untuk mengurangi permeabilitas tanah lempung secara signifikan.

2.2. Bahan Limbah

Abu sekam padi adalah hasil sampingan dari kegiatan pertanian, khususnya dalam proses pengolahan padi. Abu ini dihasilkan melalui pembakaran lapisan pelindung dari butiran padi, yang dikenal dengan sebutan sekam. Jika pembakaran dilakukan dengan cara yang benar dan terkontrol, abu yang diperoleh akan memiliki struktur permukaan partikel yang baik serta menunjukkan fungsi sebagai pozzolan, meskipun pada tingkat yang cenderung rendah. Pozzolan adalah bahan yang dapat bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida dalam keadaan basah, membentuk senyawa yang berfungsi sebagai pengikat, mirip dengan semen.

Meskipun sekam padi sering dipandang sebagai limbah pertanian yang tidak berguna, proses pembakaran dengan pengaturan suhu dan waktu yang tepat dapat mengubahnya menjadi bahan yang kaya silika amorf. Silika ini sangat penting dalam reaksi pozzolanik, karena mampu berikatan dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen, menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H), yang merupakan senyawa utama yang memberikan kekuatan dan daya tahan pada beton.

Oleh karena itu, abu sekam padi dapat digunakan sebagai bahan tambahan dalam campuran beton, baik sebagai pengganti sebagian semen maupun sebagai filler di antara butiran agregat kasar. Kehadirannya di dalam campuran beton diharapkan dapat meningkatkan densitas struktur beton serta mengurangi porositas dan permeabilitas, yang pada gilirannya dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap kondisi lingkungan yang agresif.

Berdasarkan informasi dari Balai Besar Institut Kimia (1982), yang disebut dalam penelitian oleh Widhiarto dan kolega (2015), komposisi kimia abu sekam padi mencakup unsur utama seperti silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan besi oksida (Fe_2O_3), yang semuanya memiliki peran penting dalam mendukung reaktivitas pozzolaniknya. Rincian lengkap mengenai kandungan unsur kimia dalam abu sekam padi dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Kandungan unsur dalam abu sekam padi

Nama Unsur	Kandungan (%)
SiO_2	21,6
Al_2O_3	4,6
Fe_2O_3	2,8
CaO	62,8
MgO	3,2
SO_4	2,1
CaO bebas	1,2
Na_2O	0,41
K_2O	0,24

Sumber: Balai Besar Institut Kimia (1982) dalam Widhiarto dkk. (2015)

Bata merah adalah salah satu jenis material tradisional yang telah digunakan secara luas dalam konstruksi untuk berbagai tipe bangunan. Material ini dihasilkan melalui pencetakan campuran tanah liat, baik dengan maupun tanpa bahan tambahan, yang kemudian dibakar pada suhu tinggi guna mencapai tingkat kekuatan dan kepadatan tertentu (Susanta, 2009). Tanah liat, yang menjadi bahan utama bata merah, termasuk dalam kelompok hidrosilikat alumina dengan rumus kimia $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dalam keadaan murni. Dari segi komposisi berat, unsur-unsurnya terdiri dari 47% alumina (Al_2O_3), 39% silika (SiO_2), dan 14% air (H_2O) (Tecnikal, 2016).

Bata merah tipe 22 yang berkualitas umumnya terbuat dari campuran pasir (silika) dan tanah liat (alumina) dalam perbandingan yang proporsional. Dengan penambahan sedikit air, campuran ini menjadi lunak dan mudah dibentuk, sehingga menjadi fitur penting dalam proses pencetakan bata. Setelah proses pencetakan, bata dikeringkan dan kemudian dibakar dalam tungku untuk meningkatkan daya tahan dan kekuatan mekanisnya terhadap berbagai cuaca.

Serbuk bata adalah produk sampingan yang dihasilkan dari limbah bata yang mengalami kerusakan, seperti bata yang pecah saat produksinya atau saat dibongkar dari bangunan lama. Limbah-limbah tersebut digiling menjadi partikel halus dan disaring menggunakan saringan nomor 40 ASTM untuk mendapatkan

ukuran butiran yang seragam. Ukuran partikel serbuk bata ini mirip dengan pasir halus dan dapat digunakan sebagai substitusi sebagian agregat halus dalam campuran mortar atau beton. Dengan tingkat kekerasan yang tinggi, serbuk bata ini pada masa lalu banyak dipakai sebagai bahan tambahan dalam pembuatan adukan (mortar) untuk meningkatkan daya rekat dan ketahanan panas dari campuran tersebut.

2.3. Sifat Mekanis Tanah Lempung

2.3.1. Kuat tekan bata merah

Kekuatan tekan pada bata adalah rasio antara gaya tekan tertinggi yang mampu ditanggung oleh bata dibandingkan dengan area penampang bersih yang menerima beban. Sebelum melakukan uji, permukaan bata diberi lapisan mortar yang dibuat dari campuran semen dan pasir dengan perbandingan 1:2,5. Mortar ini dicetak terlebih dahulu menggunakan cetakan berukuran 5 x 5 cm dan dibiarkan mengeras selama tujuh hari sebelum digunakan dalam pengujian kekuatan tekan (Johanes, 2013). Kualitas dari kekuatan tekan bata sangat dipengaruhi oleh cara pembuatannya. Proses pemadatan tanah yang ideal akan menghasilkan bata yang lebih padat, sementara pengeringan yang cukup di bawah sinar matahari membantu mengurangi kadar air secara merata. Di samping itu, proses pembakaran yang dilakukan lebih lama juga berperan dalam peningkatan kekuatan bata (Johanes, 2013).

Kuat tekan bata merah menurut SII-0021-1978 terdapat pembagian kelas (Tabel 2).

Tabel 2. Kuat tekan rata-rata bata merah menurut SII-0021-1978

Kelas	Kekuatan Tekan Rata Batu Bata kg/cm ²	Tekan Rata- N/mm ²	Variasi Izin
25	25	2,50	25%
50	50	5,0	22%
100	100	10	22%
150	150	15	15%
200	200	20	15%
250	250	25	15%

Sumber: SII-0021-1978, dalam Handayani, 2010

Kuat tekan bata merah dapat dikelompokkan ke dalam tiga tingkatan (Tabel 3) (NI-10, 1978:6 dalam Handayani, 2010)

Tabel 3. Tingkatan kuat tekan bata

Mutu Bata	Kuat Tekan (kg/cm ²)
Tingkat III	60-80
Tingkat II	80-100
Tingkat I	100

Sumber: NI-10, 1978:6, dalam Handayani, 2010

Kekuatan tekan bata merah dapat dihitung menggunakan rumus menurut SNI 03-4146-1996 sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

dimana:

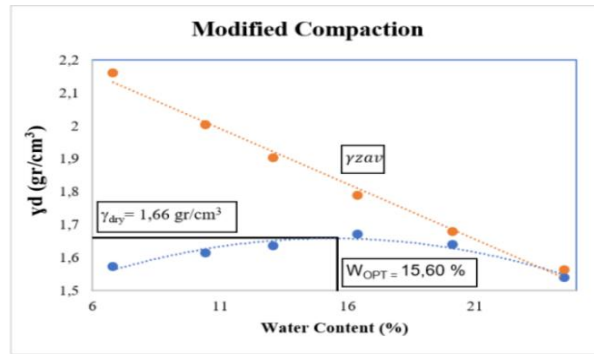
σ = Kuat tekan (kg/cm²)

P = Beban maksimum (kg)

A = Luas penampang benda uji (cm²)

2.3.2. Pengujian CBR Soaked

Pada pengujian CBR dalam keadaan basah, ditemukan bahwa meningkatnya jumlah serbuk batu bata berpengaruh positif terhadap nilai CBR tanah. Nilai CBR tertinggi diperoleh dengan penambahan serbuk batu bata sebesar 20%.



Gambar 1. Hasil pemadatan *modified*.
(Gracella dkk., 2021)

Tabel 4. Hasil pengujian CBR rendaman dan *swelling* (Gracella dkk., 2021)

Variasi	Nilai CBR %	Nilai <i>Swelling</i> %
Tanah Asli	1,57	7,82
Tanah + Serbuk Batu Bata 10%	2,29	7,34
Tanah + Serbuk Batu Bata 20%	3,46	5,31
Tanah + Serbuk Batu Bata 30%	2,24	5,28

2.3.3. Pengujian Kuat Tekan Bebas

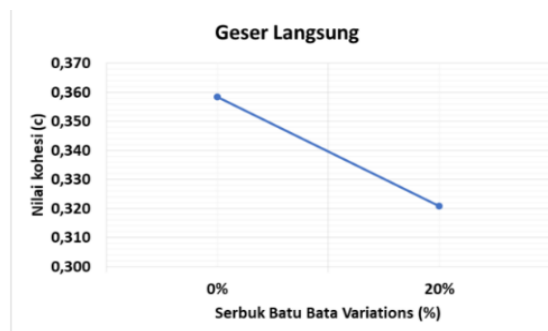
Hasil uji tekan bebas pada variasi tanah dengan tambahan 20% serbuk bata. Menunjukkan bahwa penambahan ini meningkatkan nilai q_u dan C_u dari kuat tekan bebas tanah.



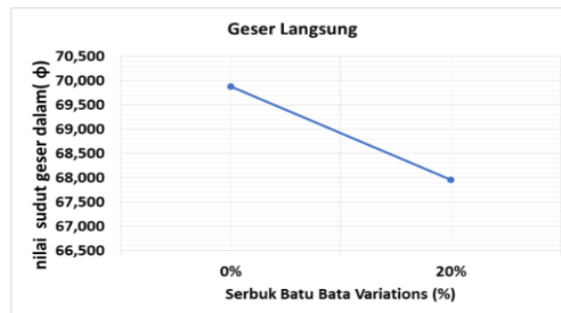
Gambar 2. Hasil pengujian kuat tekan bebas.
(Gracella dkk., 2021)

2.3.4. Pengujian Geser Langsung

Hasil uji geser langsung pada tanah dengan tambahan 20% serbuk bata. Terlihat bahwa penambahan serbuk bata mengakibatkan penurunan nilai kohesi serta sudut geser dalam.



Gambar 3. Hasil pengujian nilai C pada pengujian geser langsung.
(Gracella dkk., 2021)



Gambar 4. Hasil pengujian nilai sudut geser dalam pada pengujian geser langsung (Gracella dkk., 2021)

3. KESIMPULAN

Berdasarkan temuan penelitian tentang perbaikan tanah liat dengan memanfaatkan berbagai jenis limbah dan bahan tambahan, terutama bubuk bata, dapat disimpulkan beberapa poin sebagai berikut:

1. Upaya untuk memperbaiki stabilitas tanah lempung bisa dilakukan dengan menambahkan berbagai limbah dan material tambahan, seperti sekam padi, serbuk bata, sampah plastik, dan abu dari gunung berapi. Penambahan bahan-bahan ini ke dalam tanah dilakukan dengan variasi proporsi tertentu, yang dapat berdampak besar pada karakteristik fisik dan mekanik tanah, seperti kemampuan menahan beban, kohesi, sudut geser dalam, serta tingkat kebocorannya.
2. Penambahan abu sekam padi pada tanah berjenis lempung, terutama pada proporsi 5%, memberikan pengaruh yang cukup berarti terhadap sifat-sifat tanah. Temuan dari penelitian mengindikasikan bahwa penambahan tersebut menyebabkan penurunan pada nilai kohesi dan sudut geser tanah, yang menunjukkan adanya penurunan pada kekuatan geser internal. Akan tetapi, penambahan ini juga memberikan efek positif, yakni peningkatan nilai California Bearing Ratio (CBR), yang mencerminkan peningkatan kapasitas dukung tanah, serta meningkatkan nilai koefisien permeabilitas, menandakan bahwa tanah lebih mudah dilalui oleh air. Hal ini menunjukkan bahwa abu sekam padi bisa berfungsi sebagai bahan yang efektif untuk stabilisasi dalam situasi tertentu.
3. Penambahan 20% serbuk batu bata ke dalam tanah lempung juga memengaruhi sifat-sifat mekanik tanah. Dari hasil pengujian, terungkap bahwa nilai kohesi tanah menurun dari 0,359 kg/cm² menjadi 0,321 kg/cm² setelah serbuk batu bata ditambahkan. Selain itu, sudut geser dalam tanah juga mengalami penurunan, dari 69,882° menjadi 67,959°. Penurunan nilai kohesi dan sudut geser ini mengindikasikan bahwa penambahan serbuk batu bata berdampak pada kekuatan geser tanah, meskipun masih berada dalam batas-batas yang dapat diterima untuk beberapa aplikasi. Oleh karena itu, pemanfaatan serbuk batu bata sebagai bahan stabilisasi perlu mempertimbangkan kebutuhan spesifik dari proyek konstruksi yang sedang direncanakan.

4. SARAN

Berdasarkan pengamatan terhadap tiga tipe limbah yang digunakan untuk menstabilkan tanah lempung, abu sekam padi terbukti menjadi yang paling efektif dan menjanjikan dibandingkan bahan lainnya. Keunggulan ini terlihat jelas ketika abu sekam padi diterapkan dalam proporsi 5%, yang membawa perbaikan signifikan pada beberapa parameter teknis yang penting dalam bidang konstruksi. Meskipun ada sedikit pengurangan pada kekuatan geser internal, peningkatan nilai California Bearing Ratio (CBR) dan koefisien permeabilitas menunjukkan bahwa abu sekam padi dapat meningkatkan sifat fisik tanah lempung. Peningkatan nilai CBR menunjukkan bahwa tanah memiliki kemampuan lebih baik untuk mendukung beban konstruksi, sedangkan peningkatan permeabilitas menandakan bahwa tanah lebih efisien dalam mengalirkan air, yang sangat penting untuk mencegah genangan serta menjaga stabilitas tanah. Dengan demikian, abu sekam padi sangat dianjurkan sebagai pilihan alternatif yang efisien dan ramah lingkungan untuk stabilisasi tanah, terutama dalam proyek konstruksi seperti pembangunan jalan, fondasi ringan, dan infrastruktur lain yang memerlukan peningkatan daya dukung dan sistem drainase yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurrozak, Muhammad Rifqi, and Dillah Nurfathiyah Mufti. 2017. "Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Bahan Tambah Abu Sekam Padi Dan Kapur Pada Subgrade Perkerasan Jalan." *Jurnal Teknisia* XXII(2): 416–24.
- Adhistia, Danny, Qunik Wiqoyah, and Agus Susanto. 2023. "Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif Di Ngawi Jawa Timur Menggunakan Serbuk Gypsum." *Bulletin Of Civil Engineering* 3(1): 17–24.
- Adnin, Putri, and Mochammad Afifuddin. 2020. "Pengaruh Penambahan Gypsum Terhadap Karakteristik Bata Ringan Berbahan Dasar Tanah Diatomae." *Journal of The Civil Engineering Student* 2(1): 43–49.
- Agustian Arif, Muhammad Rayhan, A'isyah Salimah, and Putera Agung Maha Agung. 2020. "Pengaruh Penambahan Serbuk Bata Merah Terhadap Nilai Cbr Laboratorium." *PROKONS: Jurusan Teknik Sipil* 14(2): 47. doi:10.33795/prokons.v14i2.298.
- Asrar, Ernati Bachtar, Sri Gusty, I Fatmawati Rachim, Ritnawati, Arman Setiawan. 2021. "Perbandingan Penggunaan Abu Sekam Padi, Serbuk Batu Bata, Dan Pasir Sirkon Sebagai Bahan Stabilisasi." *Keilmuan Teknik Sipil* 4(1): 115–25.
- Dewi, Ratna, Yakni Idris, Indra Chusaini San, Lien DYN, and Putri Tisya R. 2022. "Sifat Fisis Tanah Lempung Ekspansif Yang Disubstitusi Dengan Serbuk Limbah Keramik." *Cantilever: Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil* 11(2): 73–80. doi:10.35139/cantilever.v11i2.118.
- Frida, Ani, and Dimitriantara Yulianti. 2022. "Epoxy Resin Sebagai Bahan Stabilisasi Tanah Di Jalan Irigasi Palembang." *Jurnal Deformasi* 7(1): 10–20.
- Gracella, Vini Vidianova, Budi Nugroho, and Insan Kamil. 2021. "Pengaruh Karakteristik Tanah Lempung Yang Distabilisasi Dengan Bahan Tambah Serbuk Batu Bata." *SNITT- Politeknik Negeri Balikpapan* 2021 (C): 133–38.
- Hangge, Elsy E, Rosmiyati A Bella, and Martha C Ullu. 2021. "Pemanfaatan Fly Ash Untuk Stabilisasi Tanah Dasar Lempung Ekspansif." *Jurnal Teknik Sipil* 10(1): 89–102.
- Hartanto, R, and F R Choirawan. 2022. "Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Abu Sekam Padi Dan Serbuk Batu Bata Desa Batusari Kecamatan Mranggen Demak."
- Hazzi, apsa al. 2021. "Pengaruh Penambahan Abu Sekam Padi Dengan Variasi Serbuk Bata Merah Pada Tanah Lempung Terhadap Parameter Kuat Geser Tanah."
- Hendarto, Muhammad Farid Maulana, Yenny Nurchasanah, Mochamad Solikin, and Suhendro Trinugroho. 2023. "Pengaruh Substitusi Limbah Pecahan Keramik Dan Abu Ampas Tebu Terhadap Kuat Tekan Pada Beton Dan Mortar." *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS*: 146–50.
- Herman, Herman, and Mia A Mia A. 2022. "Pemanfaatan Limbah Batubata Merah Dalam Meningkatkan Daya Dukung Tanah Lempung." *Ensiklopedia of Journal* 4(2): 211–17. doi:10.33559/eoj.v4i2.1065.
- Kuncoro Bakti, Arief Alihudien, Taufan Abadi. 2025. "Pengaruh Penggunaan Flay Ash Untuk Meningkatkan Daya Dukung Tanah Dasar Jalan Yang Ekspansif." *Smart Teknologi* 6(2): 164–72.
- Laksono, Mochammad Dermawan Adi, Ahmad Ridwan, Yosef Cahyo, and Dwifi Aprillia Karisma. 2020. "Uji Stabilitas Tanah Ekspansif Menggunakan Penambahan Limbah Bata Ringan Pada Jalan Tamanan Kabupaten Nganjuk." *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi)* 2(1): 35. doi:10.26740/proteksi.v2n1.p35-40.
- Listyawan, Anto Budi, Agus Susanto, Sugiyatno, Qunik Wiqoyah, and Luthfi Syahrul Muliawan. 2024. "Bearing Capacity of Soft Clay Reinforced by Geotextile and Woven Bamboo." *E3S Web of Conferences* 517(1): 6. doi:10.1051/e3sconf/202451712004.
- Listyawan, Anto Budi, and Alva Rizki Syahputra. 2020. "Perilaku Konsolidasi Tanah Lempung Dengan Kolom Pecahan Beton Sebagai Drainase Vertikal." *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2020* (2018): 162–69.
- Misbah, Wikal Sundus. 2021. "Pemanfaatan Limbah Batu Bata Merah Dalam Stabilisasi Tanah Lempung Misbah." *Ensiklopedia of Journal* 3(17): 399–405.
- Nirmalawati, Mastura Labombang, and Nazir Mikhael Sir. 2016. "Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2016 Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta ISSN: 2459-9727." *Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta*: 116–23.

- Nugraha, Satia Dwi, Anto Budi Listyawan, and Muhammad Anwar Arifin. 2024. "Pengaruh Penambahan Kapur Pada Kuat Geser Tanah Yang Terkontaminasi Air Lindi." *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2024* (1): 225–32.
- Nur Khotimah Handayani, Tegar Yustisi Wibowo, Yenny Nurchasanah, Suhendro Tri Nugroho. 2024. "Pengaruh Jenis Pembakaran Abu Kayu Sebagai Bahan Tambah Terhadap Kuat Tekan Dan Daya Serap Paving Block." *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2024*: 25–29.
- Rangan, Parea Rusan, and Abdias Tandy Arrang. 2021. "Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif Dengan Limbah Keramik." *Journal Dynamic Saint* 5(2): 945–50. doi:10.47178/dynamicsaint.v5i2.1098.
- Renaningsih, R, R Rahmanto, and ... 2022. "Daya Dukung Tanah Lempung Berserat Limbah Plastik PET (Polyethylene Therephthalate)." *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2022*.
- Rudi Hartono, Elhusna, Fepy Supriani. 2022. "Pengaruh Penambahan Abu Sekam Padi (ASP) Terhadap Kuat Tekan Dan Absorpsi Bata Merah." *Jurnal Inersia* 7(1): 23–32.
- Santoso, Rahmat, Anto Budi Listyawan, Kata Kunci, Tanah Lempung, Serbuk Kaca, Nilai Kohesi, and Direct Shear Test. 2023. "Kuat Geser Tanah Lempung Dengan Bahan Tambah Kapur Dan Limbah Kaca." : 1–16.
- Siregar, M A, G Gusrizal, and S Syukri. 2021. "Pemanfaatan Limbah Abu Batu Bara (Fly Ash) Untuk Peningkatan Daya Dukung Tanah Lempung." *Jurnal Sipil Sains Terapan*.
- Solikin, Mochamad, and Maasah Nabiilah. 2016. "Analisis Pengaruh Penggunaan Variasi Fly Ash Terhadap Karakteristik Beton Dengan Penambahan Kapur Tohor." *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2022 Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta*: 116–23.
- Suherman, Liya Zakiyyatul Muna. 2024. "Pengaruh Penambahan Abu Sekam Padi Dan Matos Terhadap Nilai CBR Dan Swelling Tanah Lempung." (1): 3.
- Taslim, Rika, Inamul Hasan, Misra Hartati, Merry Siska, and Muhammad Ihsan Hamdy. 2020. "Analisa Karakteristik Mekanis Dan Tekno Ekonomi Pembuatan Komposit Batu Bata Merah Dari Limbah Gergaji Kayu Karet." *Jurnal Teknik Industri: Jurnal Hasil Penelitian dan Karya Ilmiah dalam Bidang Teknik Industri* 6(2): 114. doi:10.24014/jti.v6i2.10498.
- Wiqoyah, Qunik. 2024. "Nilai Parameter Kuat Geser Tanah Lempung Dengan Campuran Serbuk Batu Kumbung." *Simposium Nasional RAPI XXIII* (1): 9.
- Wiqoyah, Qunik, Rosy Elvry Alawiyah, Anto Budi Listyawan, and Renaningsih. 2022. "Analisa Perkuatan Timbunan Tanah Dengan Geotekstil Woven Sebagai Upaya Pengurangan Gaya Lateral Pada Abutmen." *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS*: 123–29.
- Wiqoyah, Qunik, Alvian Bagus, Putra Aji, and Agus Susanto. 2023. "Pemanfaatan Limbah Batu Paras Untuk Memperbaiki Kuat Geser Tanah Lempung Bayat Klaten." *Simposium Nasional RAPI XX*: 307–14.
- Wiqoyah, Qunik, Fardhan Ruslan Efendy, Anto BudiL, Agus Susanto, Jl A Yani Tromol Pos, and Pabelan Kartasura. 2024. "Pemanfaatan Limbah Bata Ringan Untuk Mengurangi Penurunan Konsolidasi Tanah Lempung Bayat Klaten." *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil*: 135–43.
- Yulianti, Dimitri, Ani Firda, Bahder Djohan, and Indra Syahrul Fuad. 2023. "Stabilitas Tanah Lempung Menggunakan Kapur Dan Fly Ash Dengan Pengujian Cbr." *Jurnal Teknik Sipil LATERAL* 1(2): 47–53. doi:10.52333/lateral.v1i2.411.
- Zakariya, Ali, Giri Yudhono, and Sasri Rosyadi. 2022. "Potensi Pemanfaatan Fly Ash Dalam Pembangunan Konstruksi Jalan Dan Jembatan Untuk Mewujudkan Infrastruktur Berke_Lanjutan Di Indonesi." *Jurnal Infrastruktur Research Gate* 8(1): 22–29.