

KORELASI ANTARA KUAT TEKAN BEBAS DAN KEPADATAN TANAH DICAMPUR ABU SAWIT TERAKTIVASI ALKALI AKTIVATOR

Muhammad Toyeb^{1*}, Puspa Ningrum² dan Elizar³

¹ Magister Ilmu Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Lancang Kuning, Pekanbaru

² Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Abdurrah, Pekanbaru

³ Magister Teknik Sipil, Program Pascasarjana, Universitas Islam Riau, Pekanbaru

E-mail: mtoyeb@unilak.ac.id^{1*}, puspa.ningrum@univrab.ac.id² dan elizar@eng.uir.ac.id³

(*) Penulis Korespondensi

(Artikel dikirim : 26 Mei 2025, Direvisi : 13 Juni 2025, Diterima : 18 Juli 2025)

DOI: <http://dx.doi.org/10.30742/axial.v13i2.4472>

ABSTRAK: Tanah dengan daya dukung rendah memerlukan stabilisasi untuk meningkatkan kekuatan dan kestabilannya, terutama dalam pembangunan infrastruktur jalan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan abu sawit (POFA) dan alkali aktivator terhadap kuat tekan bebas (UCS) dan nilai *California Bearing Ratio* (CBR) tanah asli. Metode yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan variasi komposisi POFA dan pemberian alkali aktivator sodium hidroksida (NaOH) 10 M dan sodium silika (Na_2SiO_3) pada tanah asli. Pengujian dilakukan untuk mengukur nilai UCS dan CBR pada variasi campuran 20% POFA dan alkali aktivator rasio Si/Al 2.5. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan POFA secara signifikan meningkatkan kekuatan dan daya dukung tanah, dengan peningkatan paling tinggi terjadi pada campuran 20% POFA dengan larutan alkali aktivator, di mana nilai UCS dan CBR meningkat lebih dari 6 kali lipat dibandingkan tanah tanpa perlakuan. Analisis korelasi antara UCS dan CBR menghasilkan model regresi $\text{CBR} = 24.162x - 4.9963$ dan $R^2 = 0.9994$ yang menunjukkan hubungan positif dan signifikan antara kedua parameter. Temuan ini mengindikasikan bahwa nilai UCS dapat digunakan sebagai parameter prediktif untuk memperkirakan nilai CBR, yang bermanfaat dalam proses desain dan evaluasi tanah dasar perkerasan. Stabilisasi tanah menggunakan POFA dan alkali aktivator terbukti efektif dan berpotensi diterapkan secara luas dalam pendekatan rekayasa geoteknik berkelanjutan, sekaligus mendukung pemanfaatan limbah industri sebagai material konstruksi alternatif.

KATA KUNCI : Abu sawit, Alkali aktivator, CBR, Korelasi, UCS

1. PENDAHULUAN

Tanah sebagai material utama dalam konstruksi timbunan sering kali memiliki sifat fisik dan mekanik yang tidak selalu memenuhi persyaratan teknis, khususnya dalam pekerjaan lapisan tanah dasar (subgrade). Salah satu parameter penting dalam perencanaan struktur tanah dasar adalah nilai kuat tekan bebas, yang merepresentasikan tingkat kekakuan tanah dalam menerima beban vertikal. Namun, nilai kuat tekan bebas pada tanah alami berkepadatan rendah, seringkali berada pada lemahnya daya dukung. Sehingga memerlukan perbaikan atau stabilisasi untuk meningkatkan kapasitas dukungnya. Sifat-sifat tanah dengan daya dukung rendah dapat diperbaiki dengan cara stabilisasi untuk pemenuhan syarat teknis (Hardiyatmo, 2017).

Dalam upaya meningkatkan kualitas subgrade, berbagai teknik stabilisasi telah dikembangkan, salah satunya adalah pemanfaatan limbah industri sebagai material aditif atau pengganti sebagian tanah. Abu kelapa sawit (*Palm Oil Fuel Ash*/POFA) merupakan limbah padat hasil

pembakaran biomassa dari pabrik kelapa sawit yang banyak ditemukan di wilayah Indonesia, terutama di Pulau Sumatera dan Kalimantan. Penggunaan bahan dari limbah telah digunakan untuk stabilisasi tanah karena murah dan ramah lingkungan (Kamaruddin, 2020). Pemanfaatan limbah POFA untuk stabilisasi tanah merupakan cara terbaik mengurangi limbah (Al-Khafaji & Al-Najar, 2018). POFA merupakan material mengandung senyawa silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) yang bersifat pozzolan (McCarthy & Dyer, 2019). Dimana sifat pozzolan ini, identik dengan perilaku semen sebagai *binder*, sehingga POFA punya potensi untuk menambah kekuatan tanah melalui reaksi kimianya.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa POFA dapat meningkatkan nilai kuat tekan bebas (UCS) dan CBR, serta daya dukung tanah ketika digunakan sebagai bahan stabilisasi. Penambahan limbah POFA mempengaruhi peningkatan kuat tekan bebas tanah lempung (Kusuma et al., 2015). Kemudian, kuat geser tanah meningkat dengan penambahan POFA (Ningrum et al., 2022).

KORELASI ANTARA KUAT TEKAN BEBAS DAN KEPADATAN TANAH DICAMPUR ABU SAWIT TERAKTIVASI ALKALI AKTIVATOR

(Muhammad Toyeb, Puspa Ningrum, Elizar)

Namun, korelasi langsung antara kuat tekan bebas dan kepadatan dari campuran tanah-POFA khususnya yang telah diaktivasi dengan alkali aktivator, masih jarang dieksplorasi secara kuantitatif. Padahal, aktivasi alkali dengan menggunakan larutan seperti sodium hidroksida (NaOH) dan sodium silika (Na_2SiO_3) terbukti mampu memicu pembentukan gel geopolimer seperti C-A-S-H atau N-A-S-H yang memperkuat struktur mikroskopik tanah, sehingga dapat berdampak signifikan terhadap peningkatan kekuatan *subgrade* (Toyeb et al., 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara kuat tekan bebas dan kepadatan dari campuran tanah-abu sawit yang telah diaktivasi dengan larutan alkali, sehingga dapat memberikan acuan empiris dalam perancangan struktur perkerasan jalan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan laboratorium untuk mengetahui korelasi antara kepadatan tanah hasil uji CBR rendaman dan kuat tekan bebas dari hasil uji tekan bebas (UCT) pada berbagai variasi komposisi campuran. Standar Uji CBR merujuk pada (SNI 1744, 2012) dan UCS pada (SNI 3638:2012, 2012). Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam bentuk model korelasi empiris yang aplikatif bagi perencanaan teknis tanah dasar yang memanfaatkan limbah abu sawit sebagai material alternatif, sekaligus mendukung pengembangan konstruksi berkelanjutan.

Bahan tanah yang digunakan berasal dari lokasi galian tanah kota Pekanbaru untuk kebutuhan proyek timbunan jalan. Bahan abu sawit berasal dari hasil pembakaran limbah padat dari pabrik kelapa sawit. Bahan alkali aktivator diperoleh dari toko penjualan bahan kimia berupa sodium silika dan sodium hidroksida.



Gambar 1. Lokasi sumber tanah asli
(Sumber: Hasil Penelitian)



Gambar 2. Limbah abu sawit
(Sumber: Hasil Penelitian)

Prosedur pertama yang dilakukan adalah melakukan uji penentuan klasifikasi tanah asli yang digunakan sebagai sampel utama. Dalam menentukan klasifikasi tanah, pengujian menggunakan seperangkat alat uji sifat fisik. Kemudian melakukan uji penentuan kepadatan kering maksimum dan kadar air optimum tanah yang telah dicampur POFA menggunakan alat uji pemadatan standar (Proctor standar). Pemilihan pemadatan dengan Proctor standar karena penelitian ini merupakan pengujian awal (*preliminary test*) yang dikhususkan untuk infrastruktur jalan lokal. Dengan alasan tersebut, diperkenankan menggunakan energi pemadatan lebih rendah, tidak seperti pada infrastruktur besar seperti bandara atau jalan tol yang membutuhkan energi kepadatan tinggi yang lebih tinggi.

Parameter tanah yang sudah diperoleh baik secara fisis dan mekanis kemudian dikumpulkan untuk sebagai acuan awal pencampuran. Pertama sekali adalah menentukan kadar POFA. Beberapa studi terdahulu telah memperoleh kenaikan kekuatan benda uji yang optimal dengan menambahkan 20% POFA (Salam et al., 2013), (Safiuddin et al., 2014) dan (Alsubari et al., 2015). Berdasarkan studi terdahulu tersebut, penelitian ini menetapkan kadar POFA sebanyak 20% yang dicampurkan pada tanah. Penambahan kadar POFA sebanyak 20% kedalam campuran tanah, akan mendapatkan keuntungan ekonomis dan layak sebagai material stabilisasi dengan pengaruh pada lama pemeraman (Toyeb et al., 2023). Kadar POFA 20-25% merupakan jumlah efektif dan dan molaritas sodium hidroksida 10 M dinyatakan layak untuk menambah kenaikan kekuatan tanah (Pourakbar et al., 2016). Selanjutnya benda uji ditambahkan larutan sodium hidroksida dengan molaritas, Al 10M dan sodium silika, Si dengan rasio Si/Al 2.5.

Uji kepadatan tanah asli dan campuran menggunakan alat uji UCS dan CBR kondisi rendaman. Lama perawatan benda uji merujuk pada ketentuan masa perawatan minimum 7 hari

untuk rancangan campuran tanah terstabilisasi yang dinyatakan oleh (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020). Berdasarkan rujukan tersebut, pada benda uji CBR, pemeraman benda uji ditetapkan selama 4, 7 dan 11 hari. Selama masa pemeraman tersebut, benda uji mendapatkan perlakuan rendaman selama 4 hari yang dimulai dari akhir periode masa rendaman. Misalnya untuk pemeraman 11 hari, maka benda uji direndam saat memasuki hari ke 8 sampai 11. Sedangkan pemeraman benda uji UCS selama 0, 7, 14 dan 28 hari.

Benda uji CBR menetapkan puncak pemeraman pada umur 11 hari dan untuk uji UCS umur 28 hari. Lama pemeraman dirancang melebihi batas minimum yang ditetapkan, dengan maksud untuk memberikan reaksi alkali aktivator pada benda uji seperti reaksi yang terjadi dengan campuran semen.

Kemudian dilanjutkan dengan analisis data yang menampilkan korelasi dalam bentuk grafik antara nilai kepadatan berdasarkan uji CBR dan UCS. Desain campuran untuk pembuatan benda uji tersebut dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Desain Campuran Benda Uji

Bahan	Komposisi		
	0%	20%P	20%P + AA
UCS			
Tanah (gr)	350	280	280
POFA (gr)	-	70	70
Silika (gr)	-	-	42.5
Alumina (gr)	-	-	17
CBR			
Tanah (gr)	5000	4000	4000
POFA (gr)	-	1000	1000
Silika (gr)	-	-	607.1
Alumina (gr)	-	-	242.9

Ket: P = POFA; AA = Alkali Aktivator
(Sumber: Hasil Penelitian)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Properties Tanah Asli

Hasil pengujian properties tanah asli setelah dilakukan beberapa pengujian dasar, dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Berdasarkan hasil uji sifat fisis dan mekanis, tanah asli mengandung ukuran butiran pasir sebesar 94,88% dan lempung 5,12%, yang menunjukkan dominasi fraksi kasar. Menurut sistem klasifikasi AASHTO, tanah ini tergolong dalam kelompok A-2-6, yang merupakan pasir berlempung dengan plastisitas sedang. Kelompok A-2 secara umum dianggap sebagai material dengan kualitas *subgrade* sedang

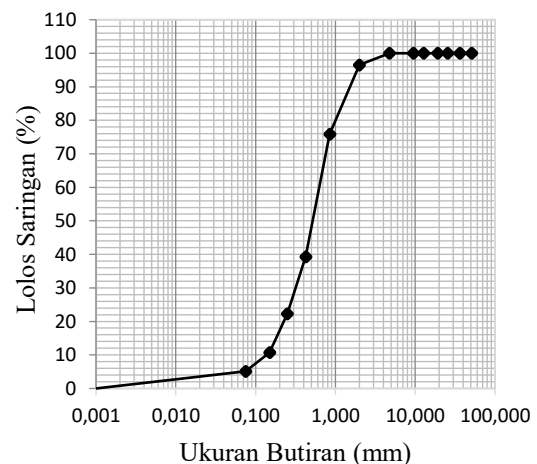
hingga baik, tetapi subkelas A-2-6 menunjukkan adanya fraksi halus yang dapat mempengaruhi perilaku jangka panjang terhadap perubahan kadar air.

Tabel 2. Hasil Uji Properties Tanah Asli

Pengujian	Hasil
Butiran pasir	94.88 %
Butiran lempung	5.12 %
Kerapatan relative, D_r	31.14%
Batas cair	31.59%
Batas plastis	20.39%
Indeks plastisitas	11.20%
Klasifikasi tanah	A-2-6
Menurut AASHTO	Pasir berlempung
Menurut USCS	SC
Pasir berlempung	
Tanah Asli + 20% POFA	
Kepadatan maksimum	1.68 gr/cm ³
Kadar air optimum	17%

(Sumber: Hasil Penelitian)

Sementara itu, bila dilihat dari metode USCS, tanah asli lebih dari 50% memiliki ukuran butiran lebih besar dari 0.075 mm dan lebih kecil dari 4.75 mm, mengandung banyak butiran halus dengan indeks plastisitas yang lebih besar dari 7%, maka tanah asli masuk dalam simbol kelompok SC (pasir berlempung).



Gambar 3. Kurva analisa butiran tanah asli
(Sumber: Hasil Penelitian)

Nilai batas cair (LL) sebesar 31,59% dan batas plastis (PL) sebesar 20,39%, memberikan indeks plastisitas (PI) sebesar 11,20%. Ini mengindikasikan bahwa tanah memiliki plastisitas sedang, dan walaupun tidak tergolong tanah ekspansif, tetapi tetap menunjukkan potensi perubahan volume ketika kadar air

KORELASI ANTARA KUAT TEKAN BEBAS DAN KEPADATAN TANAH DICAMPUR ABU SAWIT TERAKTIVASI ALKALI AKTIVATOR

(Muhammad Toyeb, Puspa Ningrum, Elizar)

berubah. Hal ini penting dalam desain perkerasan jalan, terutama pada daerah dengan perubahan kadar air tanah yang sering berubah. Tanah asli tidak sepenuhnya mengandung butiran dengan klasifikasi pasir. Berdasarkan uji saringan terdapat sekitar 5.12% tanah butiran halus yang berukuran kecil dari 0.075 mm. Butiran halus ini memberikan pengaruh pada nilai indeks plastisitas tanah asli menjadi 11.20%. Menurut USCS, tanah yang memiliki indeks plastisitas lebih besar dari 7% dapat diklasifikasikan sebagai tanah berlempung.

Hasil uji Standard Proctor untuk tanah asli yang telah ditambah 20% POFA menunjukkan kepadatan kering maksimum 1,68 gr/cm³ dan kadar air optimum 17%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa tanah memiliki kepadatan sedang, namun dibutuhkan kontrol kadar air yang ketat selama proses pemadatan agar dicapai densitas optimal.

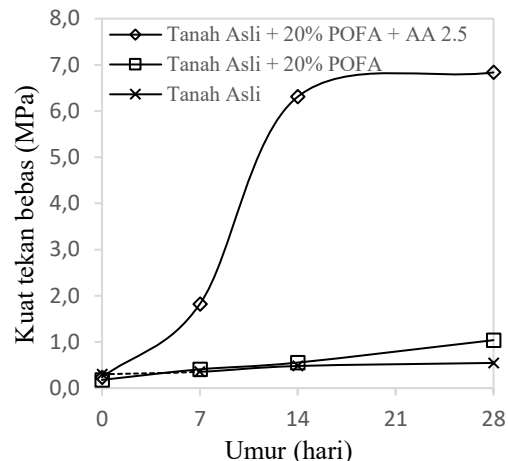
Secara keseluruhan, tanah asli layak digunakan sebagai material subgrade dengan perlakuan atau stabilisasi tambahan, terutama untuk meningkatkan kuat tekan dan daya dukung (CBR). Dominasi pasir memberikan potensi drainase yang baik, tetapi fraksi lempung dan plastisitasnya harus diperhitungkan dalam evaluasi jangka panjang dan stabilitas.

Dari sisi kerapatan, nilai kerapatan relatif (Dr) sebesar 31,14% menunjukkan bahwa kondisi awal tanah adalah lepas (*loose*). Dalam keadaan seperti ini, tanah sangat rentan terhadap penurunan (*settlement*) dan kehilangan kekuatan geser, terutama saat dibebani atau jenuh air.

b. Kuat tekan bebas

Benda uji diberi beban vertikal tanpa ada tekanan kekang sampai mengalami keruntuhan. Hasil uji kuat tekan bebas berdasarkan variasi campuran dan umur pemeraman dapat dilihat pada **Gambar 4**.

Data kuat tekan bebas (UCS) pada berbagai umur pemeraman menunjukkan bahwa tanah asli memiliki nilai kekuatan awal sebesar 0,30 MPa pada hari ke-0, yang secara teknis dikategorikan sebagai tanah dengan kekuatan sangat rendah dan tidak cukup untuk mendukung beban struktural tanpa perkuatan. Nilai ini meningkat menjadi 0,55 MPa pada umur 28 hari, yang dapat dikaitkan dengan proses pemadatan dan ikatan antar partikel seiring waktu. Namun, peningkatan ini masih tergolong rendah dan belum signifikan secara teknis.



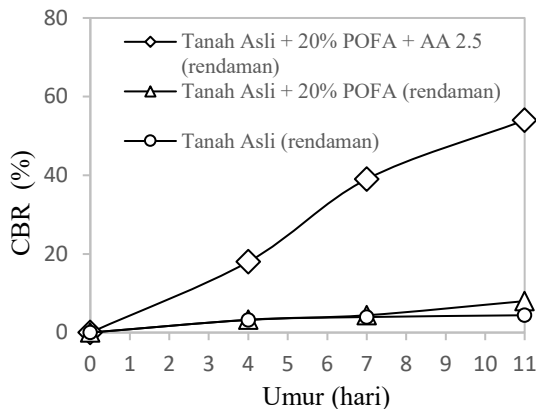
Gambar 4. Hasil uji kuat tekan bebas
(Sumber: Hasil Penelitian)

Pada saat kadar 20% POFA dicampurkan, terjadi penurunan nilai UCS pada hari ke-0 menjadi 0,18 MPa, yang dapat dijelaskan oleh karakter awal POFA sebagai material yang belum reaktif sebelum terjadinya reaksi pozzolan. Namun, seiring bertambahnya umur pemeraman, terjadi peningkatan bertahap menjadi 1,04 MPa pada 28 hari. Sedikit terjadinya peningkatan kuat tekan seiring umur pemeraman dengan penambahan POFA pada tanah lempung (Pourakbar et al., 2015). Kondisi ini menunjukkan bahwa POFA memiliki sifat pozzolan yang secara bertahap meningkatkan kekuatan tanah melalui pembentukan senyawa semen alami (C–S–H), terutama pemeraman setelah 7–14 hari. Pemeraman yang lebih lama berpengaruh pada efektivitas stabilisasi dengan hasil yang lebih baik (Darmawan et al., 2025). Peningkatan yang paling signifikan terjadi pada campuran 20% POFA dan alkali aktivator. Pada hari ke-0, nilai UCS sebesar 0,23 MPa meningkat secara drastis menjadi 1,82 MPa pada hari ke-7, dan terus naik menjadi 6,84 MPa pada umur 28 hari. Hal ini menunjukkan bahwa aktivasi alkali terhadap POFA secara nyata mempercepat dan memperkuat reaksi geopolymerisasi, membentuk senyawa C–A–S–H dan N–A–S–H yang memperkuat ikatan antar partikel tanah dan menghasilkan struktur yang lebih kaku dan kuat. Peningkatan kekuatan tanah terjadi sejak pemeraman 7 hari dengan menambahkan campuran POFA dan alkali aktivator (Khasib et al., 2021). Fenomena ini secara ilmiah memperlihatkan bahwa kombinasi material limbah industri (POFA) dengan bahan kimia aktivator (NaOH) dan sodium silika (Na₂SiO₃) dapat merubah tanah asli menjadi material yang memiliki kekuatan tekan signifikan dalam waktu singkat. Pendekatan ini sangat relevan untuk tema

proyek teknik sipil berkelanjutan yang memerlukan peningkatan daya dukung subgrade secara efisien dan ramah lingkungan.

c. Kepadatan

Nilai CBR merepresentasikan tingkat kepadatan benda uji, baik untuk tanah asli maupun tanah yang sudah dicampur POFA dan alkali aktivator. Hasil pengujian pada benda uji CBR dapat dilihat pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Hasil Uji CBR
(Sumber: Hasil Penelitian)

Hasil uji CBR pada tanah asli dengan perlakuan rendaman menunjukkan nilai yang rendah, yaitu 3,20% pada hari ke-4, meningkat menjadi 3,95% pada hari ke-7, dan 4,40% pada hari ke-11. Perlakuan rendaman dan acuan kepadatan benda uji CBR berdasarkan Proctor standar, memberikan dampak pada rendahnya nilai CBR yang diperoleh. Nilai yang rendah ini mengindikasikan bahwa tanah berada dalam klasifikasi tanah dasar berkualitas sangat rendah, tidak memenuhi persyaratan minimum sebagai subgrade dalam perkerasan jalan (umumnya disyaratkan minimal CBR 6%–10%) (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020). Peningkatan kecil ini terjadi karena adanya sedikit proses pemadatan alami selama waktu pemeraman, tetapi belum signifikan secara teknis.

Ketika tanah dicampur dengan 20% POFA, nilai CBR menunjukkan peningkatan bertahap yang lebih baik dibandingkan tanah asli. Pada hari ke-4, nilai CBR sebesar 3,25% tidak jauh berbeda dengan tanah asli, namun meningkat menjadi 8,00% pada hari ke-11. Peningkatan ini menunjukkan bahwa reaksi pozzolan antara POFA dan tanah menghasilkan senyawa pengikat seperti C–S–H secara bertahap, sehingga memperkuat struktur dan mengurangi deformasi saat diuji penetrasi. Penambahan POFA dan alkali aktivator kedalam campuran

tanah dapat menciptakan reaksi sintesis aluminosilicate berupa gel C–S–H (Toye et al., 2024). Peningkatan nilai CBR tanah asli dicampur POFA teraktivasi alkali aktivator meningkat hampir 2 kali (Khasib et al., 2023). Peningkatan paling signifikan terjadi pada campuran 20% POFA dan alkali aktivator. Nilai CBR melonjak drastis dari 18,00% pada hari ke-4 menjadi 39,00% pada hari ke-7, dan mencapai 54,00% pada hari ke-11. Ini mencerminkan peran sentral aktivasi alkali dalam mempercepat reaksi geopolymerisasi, membentuk ikatan antar partikel yang lebih kuat dan padat. Kandungan NaOH sebagai aktivator memfasilitasi pembentukan gel geopolimer (C–A–S–H dan N–A–S–H), meningkatkan daya dukung dan kekakuan tanah secara signifikan. Penyertaan sodium silika dan sodium hidroksida berdampak besar dalam peningkatan kekerasan lapisan subbase (Miranda et al., 2020).

Secara teknis, lonjakan nilai CBR ini menunjukkan bahwa kombinasi POFA dan alkali aktivator sangat efektif sebagai material stabilisasi untuk tanah asli. Selain memberikan performa struktural yang tinggi, solusi ini juga ramah lingkungan karena memanfaatkan limbah industri. Hasil ini sangat relevan untuk diterapkan pada proyek pembangunan jalan di daerah dengan karakteristik tanah berkarakteristik kuat dukung rendah.

d. Korelasi Kepadatan dan Kuat Tekan Bebas

Kuat tekan bebas (UCS) dan nilai CBR merupakan dua parameter utama yang menggambarkan kekuatan dan daya dukung tanah. UCS menggambarkan kekuatan aksial tanah terhadap beban tanpa penahan lateral. Sedangkan CBR digunakan untuk mengevaluasi ketahanan dan kepadatan tanah terhadap penetrasi beban vertikal, khususnya dalam desain lapisan perkerasan jalan.

Dari hasil penelitian, terlihat bahwa tanah asli memiliki nilai UCS dan CBR yang rendah, yaitu sekitar 0,30–0,55 MPa untuk UCS dan 3,20–4,40% untuk CBR. Nilai-nilai tersebut secara teknik menunjukkan tanah dengan performa rendah yang tidak cukup layak dan tidak memenuhi standar teknis bila digunakan sebagai subgrade tanpa perlakuan khusus.

Setelah dilakukan stabilisasi menggunakan 20% POFA dan aktivasi alkali (NaOH), terjadi peningkatan yang sangat signifikan pada kedua parameter. Nilai UCS meningkat dari 0,23 MPa menjadi 6,84 MPa, sementara CBR meningkat dari 18% menjadi 54% dalam waktu 11–28 hari. Peningkatan paralel ini menunjukkan hubungan positif dan kuat antara UCS dan CBR, yang

KORELASI ANTARA KUAT TEKAN BEBAS DAN KEPADATAN TANAH DICAMPUR ABU SAWIT TERAKTIVASI ALKALI AKTIVATOR

(Muhammad Toyeb, Puspa Ningrum, Elizar)

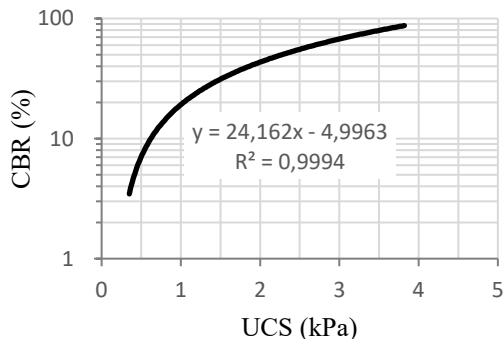
dapat dijelaskan oleh transformasi mikrostruktur tanah akibat reaksi geopolymerisasi.

Peningkatan nilai kuat tekan bebas menunjukkan terjadinya peningkatan kohesi dan kepadatan internal tanah, yang secara langsung berkontribusi pada peningkatan ketahanan terhadap deformasi, sebagaimana yang telah diketahui dari uji CBR. Dengan demikian, semakin tinggi nilai UCS, semakin besar pula kemampuan tanah menahan penetrasi beban, yang ditunjukkan dalam peningkatan nilai CBR. Secara praktis, hubungan antara UCS dan CBR dapat digunakan untuk memprediksi salah satu parameter bila hanya tersedia data salah satunya, yang sangat bermanfaat dalam kondisi keterbatasan data laboratorium. Korelasi antara hasil uji UCS dan CBR ditetapkan pada data pemeraman 7 hari, karena memiliki kesamaan lama pemeraman.

Nilai kekuatan tanah berdasarkan variasi campuran antara hasil uji UCS dan CBR dapat dilihat pada **Tabel 3** dan **Gambar 6**.

Tabel 3. Korelasi UCS dan CBR

Umur (hr)	Komposisi		
	0%	20%P	20%P + AA
UCS	0.35	0.41	1.82
CBR	3.95	4.40	39.00



Gambar 6. Korelasi UCS dan CBR
(Sumber: Penelitian)

Analisis hubungan antara kuat tekan bebas (UCS) dan nilai CBR (California Bearing Ratio) menunjukkan adanya keterkaitan erat dan tidak linier antara kedua parameter tersebut. Pada tanah tanpa perlakuan, UCS yang rendah hanya menghasilkan nilai CBR yang juga sangat terbatas, mencerminkan kondisi tanah dasar yang lemah secara mekanik dan struktural. Penambahan POFA sebagai bahan stabilisasi memberikan peningkatan yang sedang terhadap nilai UCS dan CBR, dan mencerminkan aktivitas pozzolan yang mulai berkontribusi pada penguatan struktur tanah.

Namun, peningkatan yang paling signifikan terjadi pada perlakuan dengan kombinasi POFA dan alkali aktivator, di mana nilai UCS meningkat secara signifikan dan diikuti dengan kenaikan nilai CBR yang sangat tinggi. Ketika data CBR dan UCS divisualisasikan dalam model korelasi, terlihat pola hubungan yang linear, di mana peningkatan kecil pada UCS berkontribusi terhadap peningkatan CBR yang jauh lebih besar.

Fenomena ini menunjukkan bahwa penguatan mikrostruktur tanah melalui reaksi kimia aktivasi alkali menghasilkan ikatan yang lebih kuat dan padat, bukan hanya terhadap tekanan aksial, tetapi juga dalam ketahanan terhadap deformasi akibat beban penetrasi. Reaksi ini menghasilkan senyawa geopolimer (C–A–S–H dan N–A–S–H) yang secara efektif meningkatkan kohesi antarpartikel dan kekakuan keseluruhan tanah.

Hubungan ini menunjukkan bahwa nilai UCS dapat digunakan sebagai parameter prediktif awal untuk estimasi performa CBR, terutama dalam sistem stabilisasi tanah berbasis bahan limbah seperti POFA. Penggunaan grafik regresi linear membantu menegaskan bahwa respons mekanik tanah terhadap cara stabilisasi dapat bersifat linier, dan optimalisasi parameter desain harus mempertimbangkan dinamika ini untuk hasil perkerasan yang efisien dan berkelanjutan.

Model ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai UCS yang meskipun tidak besar, tetapi dapat menyebabkan peningkatan nilai CBR secara signifikan. Hal ini memperkuat pemahaman bahwa UCS dapat digunakan sebagai indikator awal yang handal untuk memprediksi daya dukung tanah, khususnya dalam konteks penggunaan material stabilisasi berbasis limbah biomassa.

Implikasi dari temuan ini penting dalam perencanaan dan desain infrastruktur, karena mendukung efisiensi pengujian laboratorium serta penerapan pendekatan rekayasa berkelanjutan. Penggunaan POFA dan alkali aktivator tidak hanya meningkatkan performa mekanik tanah, tetapi juga mendukung pengelolaan limbah industri secara produktif.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat korelasi yang signifikan antara kuat tekan bebas (UCS) dan nilai *California Bearing Ratio* (CBR) pada tanah yang distabilisasi menggunakan abu sawit (POFA) dan alkali aktivator. Penambahan POFA secara bertahap meningkatkan nilai UCS dan CBR, sedangkan kombinasi POFA dengan aktivasi alkali

menghasilkan peningkatan yang jauh lebih signifikan pada kedua parameter tersebut. Hubungan antara UCS dan CBR dapat dirumuskan dalam bentuk persamaan regresi $CBR = 24.162x - 4.9963$ dan nilai $R^2 = 0.9994$. Penelitian ini merekomendasikan penerapan kombinasi POFA dan aktivator alkali sebagai metode perkuatan tanah yang efektif, terutama pada proyek jalan dan perkerasan di wilayah dengan kondisi tanah berdaya dukung rendah.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Al-Khafaji, Z., & Al-Najar, A. (2018). A review applying industrial waste materials in stabilisation of soft soil. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 18(2), 16–23.
<https://doi.org/https://doi.org/10.56748/ejs.e.182602>
- Alsubari, B., Shafigh, P., & Jumaat, M. Z. (2015). Development of self-consolidating high strength concrete incorporating treated palm oil fuel ash. *Materials*, 8(5), 2154–2173.
<https://doi.org/10.3390/ma8052154>
- Darmawan, M. R., Putra, P. P., & Wicaksono, L. A. (2025). PERBAIKAN SIFAT FISIS DAN MEKANIS TANAH EKSPANSIF DENGAN STABILISASI KIMIWI MENGGUNAKAN CAMPURAN GARAM DAN SEMEN (STUDI KASUS KECAMATAN TEGALDLIMO KABUPATEN BANYUWANGI). *Axial : Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Konstruksi*, 13(1), 001.
<https://doi.org/10.30742/axial.v13i1.4328>
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2020). Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2). *Kementerian Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat*, Oktober, 1036.
- Hardiyatmo, H. C. (2017). *Stabilisasi Tanah Untuk Perkerasan Jalan* (3rd ed.). Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Kamaruddin, D. (2020). Improvement of marine clay soil using lime and alkaline activation stabilized with inclusion of treated coir fibre. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(6).
<https://doi.org/10.3390/app10062129>
- Khasib, I. A., Nik Daud, N. N., & Izadifar, M. (2023). Consolidation behaviour of palm-oil-fuel-ash-based geopolymer treated soil. *Geotechnical Research*, 10(3), 138–152.
<https://doi.org/10.1680/jgere.23.00013>
- Khasib, I. A., Norsyahariati, N., Daud, N., Azline, N., & Nasir, M. (2021). Strength Development and Microstructural Behavior of Soils Stabilized with Palm Oil Fuel Ash (POFA)-Based Geopolymer. *Applied Sciences*, 11(8), p.3572.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app11083572>
- Kusuma, R. I., Mina, E., & O M, B. R. (2015). Stabilisasi Tanah Lempung dengan Menggunakan Abu Sawit terhadap Nilai Kuat Tekan Bebas (Studi Kasus Jalan Desa Cibeulah, Pandeglang). *Fondasi*, 4, 69–80.
- McCarthy, M. J., & Dyer, T. D. (2019). 9 - Pozzolanas and Pozzolanic Materials. In P. C. Hewlett & M. Liska (Eds.), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete (Fifth Edition)* (pp. 363–467). Butterworth-Heinemann.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100773-0.00009-5>
- Miranda, T., Leitão, D., Oliveira, J., Corrêa-Silva, M., Araújo, N., Coelho, J., Fernández-Jiménez, A., & Cristelo, N. (2020). Application of alkali-activated industrial wastes for the stabilisation of a full-scale (sub)base layer. *Journal of Cleaner Production*, 242.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118427>
- Ningrum, P., Toyeb, M., & Husnah, H. (2022). Perubahan Nilai CBR Pada Tanah Lempung Yang Dicampur Abu Tandan Sawit. *Journal of Infrastructure and Civil Engineering*, 2(2), 127–133.
- Pourakbar, S., Asadi, A., Huat, B. B. K., & Fasihnikoutalab, M. H. (2015). Soil stabilisation with alkali-activated agro-waste. *Environmental Geotechnics*, 2(6), 359–370.
<https://doi.org/10.1680/envgeo.15.00009>
- Pourakbar, S., Huat, B. B. K., & Asadi, A. (2016). Model study of alkali-activated

KORELASI ANTARA KUAT TEKAN BEBAS DAN KEPADATAN TANAH DICAMPUR ABU SAWIT TERAKTIVASI ALKALI AKTIVATOR

(Muhammad Toyeb, Puspa Ningrum, Elizar)

- waste binder for soil stabilization. In *International Journal of* Springer. <https://doi.org/10.1007/s40891-016-0075-1>
- Safiuddin, Md., Salam, Md. A., & Jumaat, Mohd. Z. (2014). Key Fresh Properties of Self-Consolidating High-Strength POFA Concrete. In *Journal of Materials in Civil Engineering* (Vol. 26, Issue 1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000782](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000782)
- Salam, M. A., Safiuddin, M., & Jumaat, M. Z. (2013). Microstructure of self-consolidating high strength concrete incorporating palm oil fuel. *Pgysical Review & Research International*, 3(4), 674–687.
- SNI 1744. (2012). Metode uji CBR laboratorium Badan Standardisasi Nasional. *Badan Standardisasi Nasional*, 1–28. www.bsn.go.id
- SNI 3638:2012. (2012). *SNI 3638:2012 Standar Nasional Indonesia Metode uji kuat tekan-bebas tanah kohesif Badan Standardisasi Nasional " Copy SNI ini dibuat oleh BSN untuk. www.bsn.go.id*
- Toyeb, M., Hakam, A., & Andriani. (2023). The strength and economic benefit of soil stabilization with Palm Oil Fuel Ash (POFA) as agro-waste. *E3S Web Conf.*, 464. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346411001>
- Toyeb, M., Hakam, A., Fauzan, & Andriani. (2024). Study Experimental on Strength Characteristics of Alkali-Activated Pofa to Soil Stabilization as Subgrade. *Civil and Environmental Engineering*, 20(2), 730–741. <https://doi.org/10.2478/cee-2024-0055>