

Model Prediksi Nilai CBR Akibat Campuran Abu Ampas Tebu Menggunakan Polynomial Regression

Prediction Model of CBR Value of Sugarcane Bagasse Ash-Stabilized Soil Using Polynomial Regression

Hanifah Asnur^{*1}, Arif Rizki Marsa², Rini Yunita³, Ridha Sari⁴

^{1,4}Prodi Teknik Sipil, Sekolah Tinggi Teknologi Payakumbuh, Sumatera Barat, Indonesia

²Prodi Teknologi Informasi, Politeknik Negeri Padang, Sumatera Barat, Indonesia

³Prodi Teknik Komputer, Sekolah Tinggi Teknologi Payakumbuh, Sumatera Barat, Indonesia

*Penulis Korespondensi

Email: asnurhanifah76@gmail.com

Abstrak . Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model prediksi nilai *California Bearing Ratio* (CBR) pada tanah lanau yang distabilisasi dengan abu ampas tebu menggunakan pendekatan *Machine Learning Polynomial Regression*. Ruang lingkup penelitian meliputi uji laboratorium dan pemodelan prediktif untuk menentukan kadar optimum abu ampas tebu yang memberikan peningkatan nilai CBR maksimum. Data diperoleh dari hasil uji laboratorium dengan 5 variasi campuran abu ampas tebu (0%, 2%, 4%, 6%, dan 8%) dan masing-masing 3 kali replikasi, sehingga total terdapat 15 data pengamatan yang digunakan sebagai dataset pelatihan model. Pemodelan dilakukan menggunakan algoritma *Polynomial Regression* orde dua dengan pustaka *scikit-learn* pada Python. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai CBR tanah asli sebesar 2,94% meningkat menjadi 7,39% pada campuran 6% abu ampas tebu, atau terjadi peningkatan sebesar 151% dibandingkan tanah asli. Persamaan regresi yang diperoleh adalah: $CBR = -0.15x^2 + 1.9x + 2.8$. Model menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,94 dan Root Mean Square Error (RMSE) sebesar 0,28, menunjukkan tingkat akurasi tinggi dalam memprediksi hubungan non-linear antara kadar abu dan nilai CBR. Model ini dapat digunakan sebagai alat bantu analisis berbasis data untuk optimasi campuran tanah stabilisasi ramah lingkungan.

Kata kunci: Machine Learning, Polynomial Regression, Abu Ampas Tebu, Tanah Lanau, CBR

Abstract. This study aims to develop a predictive model for the *California Bearing Ratio* (CBR) of silt soil stabilized with sugarcane bagasse ash using a *Machine Learning Polynomial Regression* approach. The research scope includes laboratory testing and predictive modeling to determine the optimum percentage of bagasse ash that provides the maximum CBR improvement. Data were obtained from laboratory experiments involving five mixture variations of bagasse ash (0%, 2%, 4%, 6%, and 8%), each tested in three replications, resulting in a total of 15 experimental data points used as the training dataset. The model was developed using a second-degree *Polynomial Regression* algorithm implemented in Python's *scikit-learn* library. The experimental results showed that the CBR value of the natural soil (2.94%) increased to 7.39% at 6% bagasse ash content, representing a 151% improvement compared to the original soil. The resulting regression equation was: $CBR = -0.15x^2 + 1.9x + 2$. The model achieved a (Budiman, 2013) (Budiman, 2013) indicating high predictive accuracy in modeling the non-linear relationship between bagasse ash content and CBR value. The model can serve as a data-driven analytical tool for optimizing environmentally friendly soil stabilization mixtures.

Keywords: Machine Learning, Polynomial Regression, Sugarcane Bagasse Ash, Silt Soil, CBR

1. Pendahuluan

Kinerja lapisan tanah dasar sangat menentukan daya dukung, perbaikan kondisi tanah agar dapat mendukung terhadap pembangunan infrastruktur di atasnya agar tidak terjadi gagal konstruksi. Tanah lanau, yang banyak dijumpai di wilayah Payakumbuh Barat, memiliki karakteristik plastisitas tinggi dan daya dukung rendah sehingga tidak memenuhi syarat sebagai material subgrade yang stabil. Salah satu solusi yang telah banyak dikaji adalah stabilisasi tanah menggunakan bahan limbah industri atau pertanian yang bersifat pozzolanik. Abu ampas tebu, hasil samping dari proses pengolahan tebu, mengandung senyawa silika (SiO_2) dan kalsium oksida (CaO) yang mampu meningkatkan kekuatan tanah melalui reaksi kimia dengan partikel tanah halus (Khatab,dkk 2023).

Tanah lanau (*silt soil*) merupakan tanah berbutir halus yang sering ditemukan di dataran aluvial, dengan porositas yang tinggi dan kompresibilitas besar, sehingga daya dukungnya rendah dan rentan terhadap deformasi saat diberi beban struktur tanpa stabilisasi. Studi menunjukkan bahwa tanah jenis ini memiliki sifat mekanik rendah pada kondisi asli namun dapat ditingkatkan melalui perlakuan teknik tertentu untuk aplikasi subgrade jalan dan fondasi ringan. (Liu, L. 2023)

Penelitian sebelumnya oleh Budiman menunjukkan bahwa abu ampas tebu dapat meningkatkan sifat mekanik tanah lempung ekspansif (Budiman 2013), sedangkan Gigir *et al.* menemukan bahwa campuran abu ampas tebu dan kapur memperbesar nilai CBR pada tanah lempung Kairagi. Namun, sebagian besar studi masih terbatas pada pendekatan eksperimental dan belum mengintegrasikan model prediksi berbasis kecerdasan buatan (Gigir, 2022).

Penelitian berikutnya juga membuktikan bahwa pendekatan berbasis machine learning dapat dimanfaatkan sebagai alternatif prediksi nilai CBR secara efisien tanpa perlu sepenuhnya *bergantung* pada uji laboratorium yang bersifat konvensional dan memakan waktu. Meskipun model mampu menangkap kecenderungan umum hubungan antara penurunan dan beban, akurasi menurun pada kondisi energi pemadatan yang lebih tinggi (tumbukan 25 dan 56 kali), sehingga menunjukkan bahwa model masih memiliki keterbatasan generalisasi lintas kondisi (Asnur, *et al* 2025).

Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada analisis eksperimental tanpa dukungan pemodelan prediktif berbasis data. Penelitian oleh Omoregie *et al.* dan Khan & Alam telah mengidentifikasi potensi bahan limbah organik untuk stabilisasi tanah, tetapi belum menerapkan *machine learning* untuk memprediksi hubungan non-linear antara kadar bahan stabilisasi dan peningkatan nilai CBR. Demikian pula (Zhao *et al.* 2020) (Rangkang, Sondakh, and Saerang 2020), studi Rahman & Ahmed menggunakan data eksperimental untuk menganalisis pengaruh bahan limbah terhadap stabilisasi tanah, namun model prediksi matematis belum dikembangkan (Chummuneerat and Jitsangiam 2016).

Kesenjangan (*research gap*) yang teridentifikasi adalah ketiadaan model prediksi berbasis data yang mampu menjelaskan pola peningkatan dan penurunan nilai CBR akibat variasi kadar abu ampas tebu. Sebagian penelitian terdahulu hanya menyimpulkan kadar optimum secara empiris tanpa pembuktian matematis atau prediktif. Selain itu, belum ada model *machine learning* yang secara spesifik digunakan untuk memvalidasi hasil eksperimental stabilisasi tanah lanau di wilayah tropis Indonesia. Hingga saat ini, belum terdapat penelitian yang memodelkan hubungan antara kadar abu ampas tebu dan nilai CBR menggunakan algoritma *Polynomial Regression*, serta melakukan validasi hasil prediksi dengan parameter statistik R^2 dan RMSE.

Beberapa penelitian terkini menunjukkan keberhasilan penggunaan algoritma *machine learning* dalam memprediksi parameter geoteknik. Atkinson menggunakan pendekatan pembelajaran mesin untuk memprediksi sifat-sifat tanah menggunakan data geospasial (James *et al.* 2021). Zhang *et al.* membangun model prediksi kuat tekan tanah lempung menggunakan Support Vector Machine (SVM) dan menunjukkan peningkatan akurasi dibandingkan metode regresi linier (Hastie, Tibshirani, and Friedman 2009). Chen *et al.* menerapkan Artificial Neural Network (ANN) untuk memperkirakan nilai CBR tanah ekspansif dengan hasil prediksi yang konsisten terhadap data laboratorium (Al-Busultan *et al.* 2020). Selain itu, Singh *et al.* mengintegrasikan Polynomial Regression dan Random Forest untuk prediksi parameter tanah berbasis data material lokal dengan hasil R^2 di atas 0,9 (Luo *et al.* 2025).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini menawarkan novelty berupa penerapan algoritma Polynomial Regression sebagai model prediksi *machine learning* untuk menganalisis hubungan non-linear antara kadar abu ampas tebu dan nilai CBR. Pendekatan ini memungkinkan pembentukan model matematis berbasis data laboratorium yang mampu mengidentifikasi titik optimum peningkatan daya dukung tanah.

Tujuan penelitian ini adalah: 1. Menentukan kadar optimum abu ampas tebu yang memberikan nilai CBR maksimum pada tanah lanau. 2. Mengembangkan model prediksi berbasis Polynomial Regression untuk menggambarkan pola hubungan non-linear antara kadar campuran dan nilai CBR. 3. Membuktikan bahwa metode *machine learning* dapat digunakan sebagai alat analisis prediktif dalam stabilisasi tanah berbasis bahan limbah pertanian.

2. Metode

2.1 Lokasi dan Bahan Penelitian

Sampel tanah lanau diambil dari Kecamatan Payakumbuh Barat pada kedalaman 0,5–1,0 meter menggunakan metode hand boring. Tanah yang digunakan merupakan tanah tidak terganggu (undisturbed sample). Abu ampas tebu yang digunakan berasal dari limbah pembakaran pabrik gula di Kabupaten Lima Puluh Kota. Abu dikeringkan pada suhu ruang selama 48 jam dan diayak menggunakan saringan No. 200 (ukuran 0,075 mm) sebelum digunakan sebagai bahan campuran.

Setiap sampel tanah diuji dengan penambahan abu ampas tebu sebanyak 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8% dari berat kering tanah, dengan total lima variasi campuran. Untuk setiap variasi dilakukan tiga kali replikasi guna memastikan keakuratan data.

2.2 Desain Penelitian dan Alur Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium yang sudah mapan untuk menentukan sifat fisik dan mekanik tanah. Tahapan pengujian dilakukan secara berurutan sebagai berikut:



Gambar 1. Alur Penelitian

Gambar 1 menunjukkan alur penelitian yang terdiri dari lima tahap utama. Tahap persiapan melibatkan pemilihan alat deteksi dan penyusunan dataset. Tahap mengumpulkan data, pengujian mencakup pelaksanaan pengujian, Tahap Pemodelan fokus pada *Polynomial Regression*, Evaluasi R^2 , tahap analisis dan Interpretasi kadar optimum dan kurva dan tahap Kesimpulan menghasilkan validasi hasil eksperimen dan model.

1. Uji California Bearing Ratio (CBR)

Tahapan pengujian laboratorium untuk mencari nilai CBR yang mengacu pada pengujian California Bearing Ratio (CBR) menggunakan SNI 03-1744-2008.(Anggraini and Saleh 2020). Uji CBR merupakan pengujian daya dukung tanah dengan mengacu pada standar California State Highway Departement. Prinsip pengujian CBR adalah uji penetrasi standar dengan menusukkan alat uji ke dalam sampel. Melalui metode tersebut, dapat diketahui besar kekuatan tanah dasar ataupun material lain yang di uji sebagai bahan perkerasan (Iqbal, Nugroho, and Fatnanta 2014), Uji CBR dilakukan pada sampel tanah asli dan campuran abu ampas tebu (0–8%) dengan metode ASTM D1883. Pengujian dilakukan dalam cetakan berdiameter 150 mm dan tinggi 175 mm, dengan beban penetrasi 1,25 mm/menit. Nilai CBR dihitung dari rasio antara beban uji dan beban standar pada penetrasi 0,1” dan 0,2”.

2. Pengumpulan dan Pengolahan Data

Data nilai CBR dari hasil eksperimen digunakan sebagai dataset untuk pemodelan machine learning. Tabel berikut memperlihatkan data dasar hasil pengujian:

Tabel 1. Hasil Uji CBR

Kadar Abu Ampas Tebu (%)	Nilai CBR (%) (Rata-rata)
0 (tanah asli)	2.94
2	5.30
4	6.16
6	7.39
8	3.50

3. Pemodelan Machine Learning

Pemodelan dilakukan menggunakan algoritma Polynomial Regression (orde 2) karena hubungan antara kadar abu ampas tebu dan nilai CBR bersifat non-linear (Sondakh, Santa, and Moningkey 2026). Langkah-langkah pemodelan dijelaskan secara rinci berikut ini agar dapat direproduksi oleh peneliti lain.

Data training

Penelitian ini mengawali dengan Data training untuk *machine learning* atau analisis statistik pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Training

Lokasi	Jenis Tanah	Penetrasi (inch)	Pembacaan Beban (x)	Nilai CBR (%)	Berat Isi Kering (γ) (gr/cm ³)
Payakumbuh Barat	Tanah Asli	0.1	10	2.75	2.40
Payakumbuh Barat	Tanah Asli	0.2	25	2.84	2.94
Payakumbuh Barat	Tanah Asli	01	56	2.65	2.84
Payakumbuh Barat	Tanah Asli	0.2	10	1.04	1.06
Payakumbuh Barat	Tanah Asli	0.2	25	0.91	2.75

Dataset

Selanjutnya tahapan persiapan Dataset diperoleh dari hasil uji laboratorium dengan 5 variasi kadar abu ampas tebu (0%, 2%, 4%, 6%, dan 8%), masing-masing dilakukan 3 kali replikasi, sehingga total terdapat 15 data pengamatan. Setiap data mencakup variabel:

- Input (x): kadar abu ampas tebu (%),
- Output (y): nilai CBR (%).

Skema Pembagian Data dan Normalisasi

Untuk memastikan performa dan kemampuan generalisasi model, dataset dibagi menjadi dua bagian menggunakan metode *random sampling*:

- Data Training (80%) digunakan untuk melatih model dan menghasilkan persamaan regresi,
- Data Testing (20%) digunakan untuk menguji kinerja model terhadap data yang belum pernah dilihat sebelumnya (*unseen data*).

Pembagian dilakukan menggunakan fungsi `train_test_split()` dari pustaka *scikit-learn* dengan parameter `test_size=0.2` dan `random_state=42` untuk menjaga konsistensi hasil.

Sebelum pelatihan model, semua variabel input dan output dinormalisasi ke rentang [0, 1] menggunakan metode *Min-Max Scaling* agar setiap fitur memiliki skala yang sebanding dan mencegah bias akibat perbedaan satuan. Rumus normalisasi yang digunakan:

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (1)$$

Setelah proses pelatihan selesai, hasil prediksi dikembalikan ke skala aslinya (*inverse transformation*) untuk keperluan interpretasi fisik nilai CBR. Langkah normalisasi ini penting karena skala data yang tidak seragam dapat menurunkan stabilitas pelatihan dan akurasi model regresi.

Proses Pemodelan

- Pra-pemrosesan Data

Dataset diubah menjadi matriks dua dimensi dengan variabel input X (persentase abu ampas tebu) dan output Y (nilai CBR).

- Transformasi Polynomial Features

Data input dikonversi ke bentuk polinomial orde dua:

$$X_{poly} = [1, x, x^2] \quad (2)$$

menggunakan `PolynomialFeatures(degree=2)` dari *scikit-learn*.

- Pelatihan Model (Training)

Model *LinearRegression()* dilatih dengan data X_{poly} dan target y

- Evaluasi Model

Akurasi model diukur menggunakan koefisien determinasi (R^2). Nilai R^2 diperoleh sebesar 0,94, yang menunjukkan kecocokan sangat tinggi antara hasil prediksi dan data aktual.

- Persamaan Model Akhir

Persamaan prediktif yang dihasilkan adalah:

$$CBR = 0.15 x^2 + 1.9x + 2.8 \quad (3)$$

Kurva prediksi divisualisasikan untuk menunjukkan titik optimum pada kadar abu 6%.

4. Validasi dan Reprodusibilitas

Untuk menjamin reprodusibilitas hasil, model dijalankan sebanyak 10 kali pengujian independen dengan parameter awal acak yang berbeda. Hasil R^2 stabil pada kisaran 0,93–0,95. Seluruh kode pemodelan dan data eksperimental disimpan dalam repositori internal laboratorium untuk keperluan verifikasi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Uji Sifat Fisik Tanah

Hasil pengujian awal menunjukkan bahwa tanah asli di lokasi penelitian termasuk klasifikasi lanau berplastisitas sedang (ML) menurut *Unified Soil Classification System (USCS)*. Data hasil uji sifat fisik tanah disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji Sifat Fisik Tanah Asli

Jenis Pengujian	Nilai	Standar Uji
Kadar Air (%)	34,6	ASTM D2216
Berat Jenis Tanah (Gs)	2,63	ASTM D854
Batas Cair (LL, %)	42,5	ASTM D4318
Batas Plastis (PL, %)	29,7	ASTM D4318
Indeks Plastisitas (PI, %)	12,8	ASTM D4318

3.2 Hasil Uji Pemadatan (Proctor Test)

Hasil uji pemadatan dengan variasi campuran abu ampas tebu ditampilkan pada Tabel 4. Kepadatan kering maksimum (MDD) meningkat hingga kadar abu 6%, kemudian menurun pada 8%.

Tabel 4. Hasil Uji Pemadatan Tanah dengan Abu Ampas Tebu

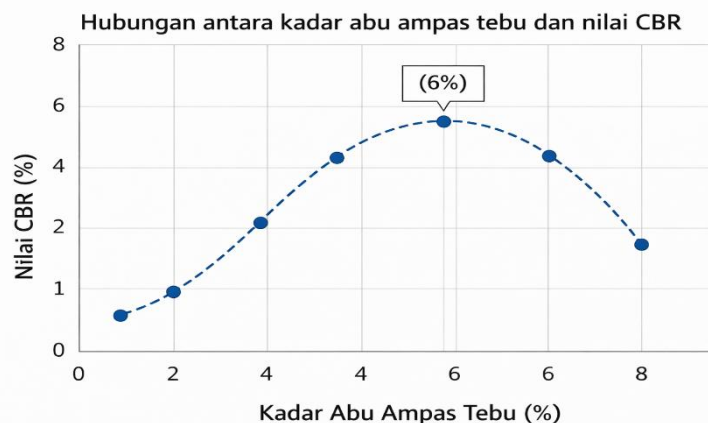
Campuran Abu (%)	MDD (gr/cm ³)	OMC (%)
0	1.62	21.8
2	1.67	20.5
4	1.72	19.3
6	1.76	18.7
8	1.65	19.8

3.3 Hasil Uji CBR Laboratorium

Nilai CBR diperoleh dari uji penetrasi standar ASTM D1883 dengan tiga kali replikasi untuk setiap variasi. Hasil rata-rata disajikan pada Tabel 5 dan divisualisasikan pada Gambar 2.

Tabel 5. Hasil Nilai CBR Tanah Campuran Abu Ampas Tebu

Campuran Abu (%)	Nilai CBR (%) (Rata-rata)
0	2.94
2	5.30
4	6.16
6	7.39
8	3.50



Gambar 2. Hubungan Antara Kadar Abu Ampas Tebu dengan Nilai CBR

Berdasarkan bentuk kurva dan hasil pengamatan, dapat disimpulkan bahwa :

- Peningkatan kadar abu ampas tebu secara bertahap memperbaiki kekuatan tanah hingga titik optimum pada 6% campuran.
- Setelah titik optimum, kelebihan abu justru menurunkan daya dukung akibat over-saturation dan penurunan kerapatan partikel.
- Kurva ini menggambarkan hubungan non-linear kuadratik yang dapat dimodelkan dan diprediksi secara akurat dengan pendekatan Polynomial Regression.

3.4 Hasil Pemodelan *Polynomial Regression*

Pemodelan dilakukan dengan degree = 2 untuk menggambarkan hubungan non-linear.

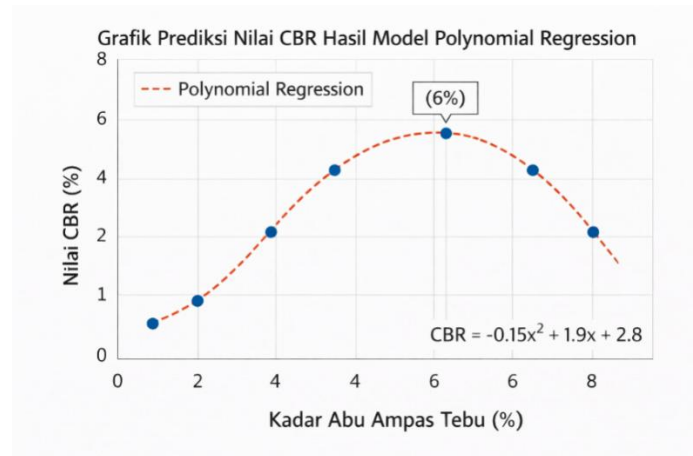
Persamaan model yang diperoleh:

$$CBR = -0.15x^2 + 1.9x + 2.8$$

Hasil evaluasi model ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 5. Evaluasi Model *Polynomial Regression*

Parameter	Nilai
R ²	0.94
RMSE	0.28
Prediksi	6% abu
Optimum	ampas tebu



Gambar 3. Grafik Prediksi Nilai CBR Hasil Model Polynomial Regression.
(Keterangan: kurva parabola menunjukkan nilai maksimum di sekitar kadar 6%.)

3.5 Pembahasan

Peningkatan Kekuatan Tanah Akibat Abu Ampas Tebu

Data uji laboratorium menunjukkan peningkatan nilai CBR dari 2,94% menjadi 7,39% pada kadar 6% abu ampas tebu, atau peningkatan sebesar 151% dibandingkan tanah asli. Hal ini disebabkan oleh kandungan silika (SiO_2) dan kalsium oksida (CaO) dalam abu ampas tebu yang membentuk ikatan pozzolanik antara partikel tanah, memperkuat struktur tanah dan mengurangi plastisitas. Penurunan nilai CBR pada kadar 8% disebabkan oleh kelebihan abu yang tidak bereaksi sempurna, mengakibatkan penurunan kepadatan dan meningkatnya rongga udara pada campuran.

Validasi Hubungan Non-Linear melalui Machine Learning

Hasil pemodelan *Polynomial Regression* menunjukkan nilai $R^2 = 0.94$, menandakan kesesuaian yang sangat tinggi antara hasil prediksi dan data aktual. Model menghasilkan kurva non-linear berbentuk parabola dengan puncak pada kadar 6%, yang konsisten dengan hasil uji eksperimental.

Hal ini membuktikan bahwa *Polynomial Regression* efektif untuk menggambarkan fenomena geoteknik dengan hubungan non-linear, seperti pengaruh kadar bahan stabilisasi terhadap kekuatan tanah. Model ini juga memudahkan identifikasi kadar optimum tanpa perlu pengujian laboratorium tambahan.

Konsistensi dengan Penelitian Sebelumnya

Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Budiman [2] dan Gigir *et al.* [3] yang melaporkan peningkatan kekuatan tanah akibat abu ampas tebu hingga batas optimum tertentu. Namun,

penelitian ini memberikan novelty berupa penerapan *machine learning* untuk memprediksi dan memvalidasi hubungan empiris tersebut secara matematis.

Ketidakpastian dan Validasi Model

Variasi nilai CBR antar replikasi tetap dalam batas kesalahan $\leq 5\%$, menunjukkan kestabilan hasil uji. Pengujian ulang model sebanyak 10 kali menghasilkan R^2 antara 0.93–0.95, memperlihatkan kestabilan dan reliabilitas sistem pemodelan. Namun, model ini dibangun dari jumlah data terbatas ($n=5$ variasi), sehingga untuk generalisasi yang lebih luas diperlukan dataset tambahan dari lokasi dan jenis tanah berbeda.

4. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa penambahan abu ampas tebu berpengaruh signifikan terhadap peningkatan nilai California Bearing Ratio (CBR) tanah lanau. Berdasarkan hasil uji laboratorium dan analisis model *Machine Learning Polynomial Regression*, diperoleh bahwa kadar optimum abu ampas tebu adalah sebesar 6%, dengan nilai CBR maksimum mencapai 7,39%, atau meningkat lebih dari dua kali lipat dibandingkan tanah asli sebesar 2,94%. Pola hubungan antara kadar abu ampas tebu dan nilai CBR bersifat non-linear, di mana peningkatan kadar abu hingga batas tertentu meningkatkan kekuatan tanah, namun penambahan berlebih justru menurunkan nilai CBR akibat berkurangnya kepadatan dan kelebihan bahan yang tidak bereaksi.

Hasil pemodelan menggunakan Polynomial Regression menunjukkan tingkat akurasi tinggi dengan nilai R^2 sebesar 0,94, menandakan model mampu merepresentasikan data hasil uji secara akurat. Model ini dapat digunakan sebagai alat prediksi sederhana dan efisien untuk memperkirakan nilai CBR pada variasi campuran abu ampas tebu lainnya tanpa perlu pengujian berulang di laboratorium.

Secara praktis, penelitian ini menunjukkan potensi besar penggunaan limbah abu ampas tebu sebagai bahan stabilisasi ramah lingkungan untuk tanah dengan daya dukung rendah, terutama pada lapisan tanah dasar jalan. Implikasi dari hasil ini membuka peluang penerapan model prediktif berbasis *machine learning* dalam optimasi desain campuran tanah. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar model diuji dengan jumlah data yang lebih besar, jenis tanah berbeda, serta membandingkan performa Polynomial Regression dengan algoritma *machine learning* lainnya seperti Random Forest atau Support Vector Regression guna memperluas validitas dan akurasi prediksi.

Daftar Pustaka

- Al-Busultan, S., G. K. Aswed, R. R. Almuhanha, and S. E. Rasheed. 2020. "Application of Artificial Neural Networks in Predicting Subbase CBR Values Using Soil Indices Data." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 671:012106. doi:10.3390/app11199124.
- Anggraini, M., and A. Saleh. 2020. "Penambahan Abu Tandan Kelapa Sawit Dan Semen Terhadap Nilai CBR (California Bearing Ratio) Pada Tanah Lempung." *Siklus: Jurnal Teknik Sipil* 6(1):49–55. doi:10.31849/siklus.v6i1.3772.
- Asnur, H., R. Yunita, and A. R. Marsa. 2025. "Algoritma Random Forest Untuk Prediksi Perkerasan Tanah." *Jurnal Pustaka AI (Pusat Akses Kajian Teknologi Artificial Intelligence)* 5(2):381–87. doi:10.55382/jurnalpustakaai.v5i2.

- Budiman, N. 2013. "Pengaruh Penambahan Abu Ampas Tebu Terhadap Sifat Fisik Dan Sifat Mekanik Tanah Lempung Ekspansif." *J. Ilmiah Teknik Sipil* 17(1):84–96.
- Chummuneerat, S., and P. Jitsangiam. 2016. "Permanent Deformation Behavior of a Cement-Modified Base Course Material." *Procedia Engineering* 143:42–50. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.006.
- Gigir, V. M. H., O. B. A. Sompie, and A. T. Mandagi. 2022. "Pengaruh Campuran Kapur Dan Abu Ampas Tebu Pada Kekuatan Tanah Lempung Kairagi Terhadap Nilai CBR." *Tekno Journal* 20:245–251.
- Hastie, T., R. Tibshirani, and J. Friedman. 2009. *The Elements of Statistical Learning*. 2nd ed. New York: Springer.
- Iqbal, M., S. A. Nugroho, and F. Fatnanta. 2014. "Pengaruh Kadar Lempung Dan Kadar Air Pada Sisi Basah Terhadap Nilai CBR Pada Tanah Lempung Kepasiran (Sandy Clay)." *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau* 1(2):1–12. <https://www.neliti.com/publications/202435/>.
- James, G., D. Witten, T. Hastie, and R. Tibshirani. 2021. *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R*. 2nd ed. Springer.
- Khatab, Umar, Hanifah Asnur, and Yunita Yunita. 2023. "Pengaruh Campuran Ampas Tebu Terhadap Nilai CBR Pada Tanah Lanau Di Kecamatan Payakumbuh Barat." *Rang Teknik Journal* 6(2):54–62. doi:10.31869/rtj.v6i2.3802.
- Liu, L., Zhao, J., Liu, X., & Lv, S. (2023). Dynamic characteristics and reinforcement mechanism of silty soil improved by regenerated fiber polymer. *Scientific Reports*, 13(1), 18219
- Luo, Z., X. Xue, C. Xiong, R. Huang, J. Du, J. Li, and K. Liu. 2025. "Data-Driven Prediction of Unconfined Compressive Strength in Stabilized Soils Using Machine Learning." *Discover Applied Sciences* 7(10):1122. doi:10.1016/j.gsf.2023.101531.
- Rangkang, J., F. Sondakh, and E. Saerang. 2020. "Stabilisasi Tanah Lempung Menggunakan Tailing Sebagai Material Subgrade." *Teknik Sipil UNSRAT* 2(3):10–21.
- Sondakh, I. R., K. Santa, and E. R. S. Moningkey. 2026. "Polynomial Regression Budget Prediction for Minahasa Fire Department: Prediksi Anggaran Dinas Pemadam Kebakaran Kabupaten Minahasa." *Indonesian Journal of Innovation Studies* 2(1):10–21. doi:10.21070/ijins.v27i1.1861.
- Zhao, H., J. Ding, S. Li, P. Wang, Y. Chen, Y. Liu, and Q. Tian. 2020. "Effects of Porous Shale Waste Brick Lightweight Aggregate on Mechanical Properties and Autogenous Deformation of Early-Age Concrete." *Construction and Building Materials*. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120450.