

PREDIKSI NILAI CBR LABORATORIUM DARI HASIL MINI CONE RESISTANCE ALAT PENGUJIAN PENETRASI TVA (Q-TVA) PADA TANAH PESISIR RIAU

**Soewignjo Agus Nugroho^{*}, Ferry Fatnanta, Agus Ika Putra, Gunawan Wibisono,
Muhamad Yusa, Syawal Satibi**

*Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Riau, HR Subrantas KM 12 Pekanbaru
e-mail: nugroho.sa@eng.unri.ac.id*

ABSTRACT

This study aims to develop an empirical equation for predicting the California Bearing Ratio (CBR) value based on the results of the q-TVA Penetrometer (Hand Cone Penetrometer) test on soft soils, particularly in coastal areas. The soil samples were prepared by mixing bentonite clay, kaolin, and sand, then compacted and tested in the laboratory to obtain both CBR and Q_{CTVA} data. A stepwise regression analysis was conducted on four parameters: CBR, Q_{CTVA} , moisture content, and dry unit weight. The results indicated that only Q_{CTVA} was statistically significant as a predictor of CBR. The resulting regression model showed a coefficient of determination (R^2) of 0.70 and a p-value of 1.90×10^{-17} , with good accuracy based on the MSE value of 3.214, RMSE of 1.793, and MAE of 1.295. These findings suggest that Q_{CTVA} can be used as a practical method to estimate CBR values without requiring field tests involving heavy equipment. However, the model has limitations when applied to soil types with high CBR values. Therefore, its use is recommended only for soft soils or similar ground conditions, such as those commonly found in coastal regions

Keywords: CBR, TVA Penetrometer, Q_{CTVA} , Coastal Soil, Stepwise Regression

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan persamaan empiris dalam memprediksi nilai California Bearing Ratio (CBR) berdasarkan hasil pengujian q-TVA Penetrometer (*Hand Cone Penetrometer*) pada tanah lunak, khususnya di wilayah pesisir. Sampel tanah disusun dari campuran lempung bentonite, kaolin, dan pasir, kemudian dipadatkan dan diuji di laboratorium untuk memperoleh data CBR dan nilai Q_{CTVA} . Analisis regresi dilakukan dengan metode stepwise terhadap empat parameter, yaitu nilai CBR, Q_{CTVA} , kadar air, dan berat isi kering. Hasil analisis menunjukkan bahwa hanya nilai Q_{CTVA} yang signifikan sebagai prediktor nilai CBR. Model regresi yang diperoleh memiliki koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,70 dan p-value sebesar $1,90 \times 10^{-17}$, dengan akurasi yang baik berdasarkan nilai MSE sebesar 3,214, RMSE 1,793, dan MAE 1,295. Temuan ini mengindikasikan bahwa Q_{CTVA} berpotensi digunakan sebagai metode praktis untuk memperkirakan nilai CBR tanpa memerlukan pengujian langsung di lapangan yang umumnya membutuhkan alat berat. Namun, model ini memiliki keterbatasan pada jenis tanah dengan nilai CBR tinggi, sehingga disarankan hanya digunakan pada tanah lunak atau kondisi tanah serupa seperti di daerah pesisir.

Kata kunci: CBR, TVA Penetrometer, Q_{CTVA} , Tanah Pesisir, Regresi Stepwise

PENDAHULUAN

Tanah di wilayah pesisir umumnya memiliki karakteristik fisik yang lunak dan kurang stabil, sehingga tidak mampu secara optimal mendukung beban konstruksi. Hal ini disebabkan oleh dominasi material penyusun berupa pasir halus dan lempung dengan tingkat kepadatan rendah serta plastisitas tinggi. Sifat-sifat tersebut menyebabkan daya dukung tanah menjadi rendah dan cenderung mengalami deformasi yang signifikan, terutama saat menerima beban struktural. Oleh karena itu, perencanaan dan evaluasi daya dukung tanah pada wilayah pesisir memerlukan perhatian khusus, baik untuk pembangunan infrastruktur ringan maupun berat.

Metode uji lapangan yang umum digunakan dalam evaluasi daya dukung tanah, seperti pengujian California Bearing Ratio (CBR), sering kali menghadapi kendala, terutama pada tanah dengan kondisi lunak dan lokasi yang sulit diakses. Alat uji CBR lapangan membutuhkan infrastruktur pendukung seperti alat berat yang dapat mengganggu struktur alami tanah, sehingga dapat menurunkan akurasi hasil pengujian. Situasi ini mendorong perlunya penggunaan metode alternatif yang lebih praktis, efisien, dan adaptif terhadap kondisi lapangan.

Salah satu alternatif yang potensial adalah penggunaan alat Hand Cone Penetrometer (HCP), khususnya jenis TVA Penetrometer yang memiliki beberapa ukuran konus dan mudah digunakan di lapangan. Alat ini mampu mengukur tahanan penetrasi tanah secara langsung, yang selanjutnya dapat dikorelasikan dengan nilai CBR melalui pendekatan

empiris. Selain hemat waktu dan biaya, metode ini juga lebih aman diterapkan pada tanah lunak karena tidak merusak struktur tanah secara signifikan.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pendekatan prediksi nilai CBR berdasarkan hasil pengujian laboratorium dan data lapangan. Nugroho et al.(2019) mengembangkan model estimasi CBR berdasarkan data HCP di wilayah Pekanbaru, namun terbatas pada jenis tanah tertentu. Penelitian lain oleh Handayani dan Saputra (2019) mengevaluasi hubungan antara indeks plastisitas dan nilai CBR pada tanah lempung, sementara Ahmed et al. (2018) memanfaatkan kombinasi parameter laboratorium seperti indeks plastisitas, berat volume kering, dan nilai unsoaked CBR (Tabel 1).

Tabel 1. Nilai Konsistensi Tanah Berdasarkan Nilai Tahanan qonus (qc)

cone resistance, qc (kg/cm ²)	soil consistency/density	
	Cohesive	Non-Cohesive
less than 6	Very Soft	
12	Soft	
24	Medium stiff	
45	stiff	
74	very stiff	
more than 75	Hard	

Sumber : (Bria et al., 2020)

Beberapa contoh penelitian sebelumnya tentang hubungan nilai CBR dengan tahanan ujung qonus dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Korelasi CBR dengan Parameter Geoteknik penelitian terdahulu

Peneliti	Jenis Tanah	Korelasi
(Erny, 2022)	Pasir	CBR = 0.26 qc
	Tanah Lempung	CBR = 0.48 qc
(Kuttah, 2019)	Tanah Berpasir	CBR _{LD} = 0.3546 ω + 118.3 γd - 178.886

Selain itu penelitian (Cahyadi, 2019) mengenai korelasi tahanan ujung konus (Qc) dengan nilai CBR menunjukkan adanya hubungan positif yang signifikan antara kedua parameter tersebut. Semakin tinggi nilai Qc, nilai CBR tanah cenderung meningkat, sehingga pengujian penetrometer dapat dijadikan metode cepat dan praktis untuk memperkirakan nilai CBR.

. Namun demikian, kajian mengenai penggunaan TVA Penetrometer sebagai instrumen utama dalam prediksi nilai CBR, khususnya pada tanah pasir berlempung lunak yang banyak dijumpai di wilayah pesisir, masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model prediksi nilai CBR berdasarkan data pengujian TVA Penetrometer yang didukung oleh parameter laboratorium. Tanah yang digunakan merupakan campuran rekayasa antara pasir, lempung bentonit, dan kaolin, untuk menyerupai karakteristik tanah lunak khas daerah pesisir. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam menyediakan metode evaluasi daya dukung tanah yang lebih efisien, praktis, dan aplikatif, khususnya untuk kondisi tanah lunak di lapangan

METHODOLOGY

Hubungan empiris antara nilai California Bearing Ratio (CBR), sifat fisik dan mekanis tanah, dan data hasil pengujian TVA Hand Cone Penetrometer (q-TVA) dikaji dalam penelitian ini. Tujuan utama penelitian adalah menyusun model regresi yang mampu memperkirakan nilai CBR secara praktis berdasarkan data pengujian yang lebih mudah dan cepat dilakukan di lapangan. Penelitian difokuskan pada campuran tanah yang terdiri dari lempung dan pasir, yang dirancang secara khusus untuk merepresentasikan kondisi tanah lunak, terutama yang banyak ditemukan di wilayah pesisir.

Untuk merepresentasikan kondisi tanah lunak pesisir secara ter-kontrol di laboratorium, digunakan kombinasi material utama berupa lempung dan pasir (Gambar 1). Sifat plastisitas dan ekspansif lempung sangat bergantung pada jenis mineral lempung yang terkandung di dalamnya (Das & Sobhan, 2017). Mineral montmorillonite pada lempung, mempunyai kemampuan menyerap air dalam jumlah besar serta mengembang signifikan ketika basah. Sifat ini menyebabkan tingkat plastisitas yang tinggi, dan nilai ekspansif yang cukup besar. Sedangkan mineral kaolin merupakan jenis mineral lempung dengan struktur kristal yang stabil dan memiliki sifat non-ekspansif, berbeda dengan mineral montmorillonite yang lebih aktif dan ekspansif (Utami, 2018). Kaolin memiliki plastisitas yang relatif rendah serta tingkat ekspansif yang minimal, sehingga perilaku mekanis cenderung lebih stabil terhadap perubahan kadar air. Material/mineral ini dipilih karena memiliki karakteristik yang berbeda namun saling melengkapi dalam

membentuk perilaku tanah lunak. Bentonite (montmorillonite) berperan sebagai lempung ekspansif dengan plastisitas tinggi, kaolin sebagai lempung mempunyai struktur lebih stabil, serta pasir sebagai material granular.



Gambar 1 Material Tanah

Tabel 3. Hasil Pengujian Batas Atterberg untuk Campuran Bentonite dan Kaolin

Soil Minerals (%)			Plasticity Index (%)				Shrinkage Limit (SL)
Sand	Kaolin	Montmorillonite	Liquid Limit (LL)	Plastic Limit (PL)	Shrinkage limit		
-	-	100	100-900	50-100		8.5-15*	
-	100	-	30-110	25-40		25-29*	
-	0	100	410.50	70.82			
-	20	80	338.32	36.52			
-	25	75	302.42	51.58			
-	30	70	308.13	44.84			
-	35	65	256.52	25.72			
-	40	60	291.71	62.79			
-	45	55	249.46	29.58			
-	50	50	246.72	63.02			
-	55	45	212.65	63.36			
-	60	40	195.44	38.98			
-	65	35	188.10	55.33			
-	70	30	132.76	42.01			
-	75	25	124.47	38.06			
-	80	20	102.56	33.45			
-	100	0	51.63	33.85			

*Sumber: (Mitchell & Soga, 2005)

Pasir merupakan tanah yang sebagian besarnya berupa mineral quartz. Secara teknis, diklasifikasikan sebagai material non-kohesif. Pasir tidak memiliki kohesi dan hampir tidak bisa menjadi lebih padat, yang menghasilkan daya dukung yang lebih tinggi. Untuk mengatasi masalah ini, beberapa bahan pengikat seperti tanah kohesif (lempung) harus ditambahkan ke dalam pasir (Wibisono et al., 2018). Pemodelan tanah lunak pesisir dalam penelitian ini bertujuan untuk me-rekayasa karakteristik tanah campuran yang memenuhi kriteria sebagai tanah dengan plastisitas tinggi, namun tetap didominasi oleh fraksi pasir. Dengan kata lain, sampel yang diharapkan adalah tanah tipe SC high plasticity. Oleh karena itu, variasi pencampuran dilakukan untuk memperoleh nilai batas cair, batas plastis, dan indeks plastisitas yang masuk ke dalam zona plastisitas tinggi pada bagan plastisitas (Tabel 3). Komposisi dan variasi dirancang sedemikian rupa untuk menghasilkan sampel tanah (Tabel 4) yang sesuai dengan karakteristik fisik tanah lunak di lapangan, sehingga model regresi yang dibangun nantinya dapat lebih mewakili kondisi nyata di wilayah pesisir.

Tabel 4. Laboratory Result of Atterberg Limit for Clayey-Sand Mixture

Sand	fraction Fine Grain/Clay		Atterberg Limits		
	Bentonite (%)	Kaolin (%)	Liq. Limit (%)	Plast. Lim.	Plast. Ind. (%)

80	70	30	52.94	20.55	32.39
70	70	30	76.27	23.79	52.48
65	70	30	89.62	25.08	64.54
80	50	50	51.01	20.23	30.78
70	50	50	71.11	22.34	48.77
65	50	50	84.87	23.12	61.75

Menurut Das, (1995) Sistem USCS menetapkan nilai batas cair dengan kategori low plasticity memiliki nilai liquid limit <50%, sehingga dalam penelitian ini digunakan tiga variasi pasir, yaitu 80%, 70%, dan 65%. Sisanya merupakan campuran lempung yang berupa bentonite dan kaolin dengan perbandingan tertentu. Pemilihan bentonite dalam proporsi yang lebih tinggi dimaksudkan untuk menjaga karakteristik ekspansif dan meningkatkan plastisitas campuran karena sifat dan karakteristik tanah pada kawasan pesisir juga memiliki plastisitas yang tinggi pada butiran halus (Zaika et al., 2019).

Alat Pemadat, Modifikasi Dinamis untuk mencetak sampel tanah uji, yang dirancang khusus untuk penelitian ini (Gambar 2). Proses pemasakan bertujuan untuk meningkatkan densitas/kepadatan tanah sehingga diperoleh kekuatan geser dan daya dukung tanah yang lebih tinggi (Das, 2016). Kepadatan tanah merupakan suatu proses naiknya kerapatan tanah dengan memperkecil jarak antar partikel sehingga mengakibatkan terjadinya reduksi terhadap volume udara tetapi tidak terjadi perubahan terhadap volume air (Asnur & Yunita, 2023). Mould yang digunakan pada alat ini memiliki diameter sebesar 20,38 cm dan tinggi 15,05 cm. Energi tumbukan dihasilkan dari beban seberat 8 kg yang dijatuhkan dari ketinggian setara dengan alat Dynamic Cone Penetrometer (DCP), sehingga memberikan energi yang tinggi dan seragam pada setiap lapisan tanah. Faktor-faktor yang mempengaruhi hasil pemasakan antara lain jenis tanah, kadar air, dan energi pemasakan yang digunakan (Holtz & Kovacs, 1981). Selain jumlah pukulan standar sebesar 40 pukulan (densitas setara dengan 25 pukulan Proctor), digunakan juga variasi pukulan sebanyak 32 dan 16 pukulan. kadar air yang digunakan dalam pengujian ditetapkan sebesar 15%, 20%, dan 25%, dengan tujuan agar tanah berada dalam kondisi kepadatan yang rendah. Penelitian yang dilakukan Nur et al. (2023) mendapatkan hasil kawasan pesisir menunjukkan bahwa lapisan tanah lunak memiliki nilai tahanan ujung konus (qc) yang sangat rendah, berkisar antara 0–5 kg/cm² (0–0,5 MPa)



(a) Alat Penumbuk memadatkan sampel



(b) Mould/cetakan sampel uji

Gambar 2. Frame Pemadat tanah dan Mold CBR

pengujian lanjutan dilakukan untuk mengetahui karakteristik daya dukung dan kekuatan tanah hasil pemodelan. Dua jenis pengujian yang digunakan dalam penelitian ini adalah uji California Bearing Ratio (CBR) laboratorium dan uji penetrasi menggunakan alat TVA Penetrometer (Gambar 3). CBR merupakan metode pengujian yang umum digunakan untuk mengukur kekuatan dan daya dukung permukaan tanah atau material dasar jalan terhadap penetrasi sebuah piston standar dan umumnya dinyatakan dalam persentase. Uji CBR bertujuan untuk meng-evaluasi daya dukung tanah, Nugroho et al. (2019) menyatakan bahwa besaran daya dukung ini dipengaruhi terutama oleh tipe tanah, kadar air, dan densitas (berat isi) tanah. Sementara uji TVA Penetrometer digunakan untuk memperoleh nilai penetrasi sebagai representasi ketahanan tanah terhadap beban penetrasi statis. TVA penetrometer merupakan pengujian yang bertujuan untuk memperoleh informasi mengenai kekuatan tanah dangkal, terutama pada lapisan tanah atas yang

sangat mempengaruhi kestabilan struktur bangunan di atasnya. Alat HCP ini mudah digunakan untuk penyelidikan tanah sampai kedalaman 1 meter dibawah tanah dasar (Yusa & Nugroho, 2009). Pengujian ini sangat sesuai digunakan pada pekerjaan awal survei geoteknik, terutama dalam kondisi lapangan yang sulit dijangkau atau pada area yang tidak memungkinkan untuk dilakukan pengujian laboratorium secara langsung. Dari Pengujian TVA ini kita dapat menentukan jenis konsistensi tanah. Konsistensi tanah adalah ketahanan tanah terhadap gaya tekanan, gaya gravitasi dan tarikan serta kecenderungan massa tanah untuk melekat satu dengan yang lain atau terhadap benda lain (Mursyid & Anwar, 2023).



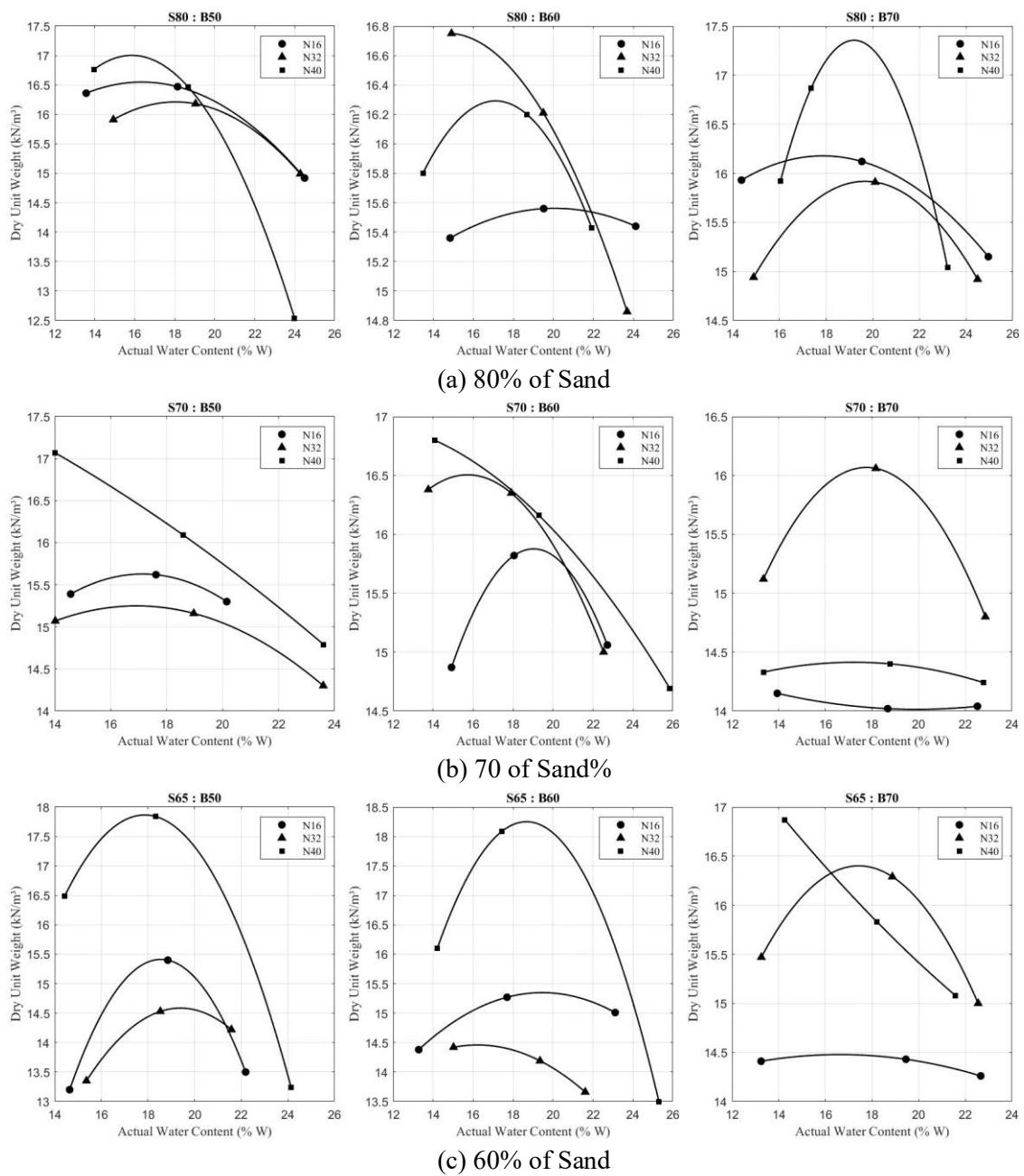
(a) CBR Laboratory apparatus (b) TVA penetrometer
 Gambar 3. CBR Laboratorium dan TVA Aparatus

Setelah seluruh data pengujian diperoleh, analisis dimulai dengan proses eliminating outlier menggunakan metode Robust Mahala Nobis Distance. Metode ini digunakan untuk mendeteksi dan mengeluarkan data yang memiliki penyimpanan signifikan terhadap distribusi umum, sehingga model prediksi yang dibangun menjadi lebih akurat dan tidak terpengaruh oleh nilai-nilai ekstrem. Proses ini dilakukan terhadap seluruh variabel yang akan dianalisis, termasuk nilai CBR, perlawanahan penetrasi (Q_{cTV}), berat isi kering (γ_{dry}), dan kadar air (w).

Setelah data bersih dari outlier, dilakukan analisis regresi stepwise untuk membangun model prediksi nilai CBR berdasarkan kombinasi variabel independen yang paling signifikan. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB R2022b, dengan pendekatan yang secara bertahap memilih variabel berdasarkan kontribusinya terhadap peningkatan akurasi model. Evaluasi model dilakukan menggunakan parameter statistik seperti nilai signifikansi dan koefisien determinasi (R^2) untuk memastikan bahwa model dapat merepresentasikan hubungan antar variabel secara optimal.

RESULT

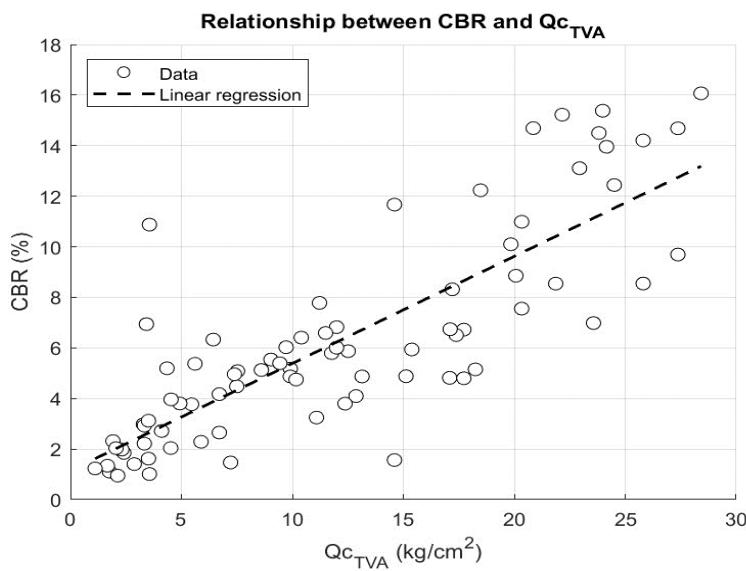
Analisis hasil pengujian laboratorium diawali dengan melihat hubungan antara kadar air dan berat isi kering (γ_{dry}) pada berbagai variasi campuran tanah. Hubungan antara kadar air dan berat isi kering (γ_{dry}) pada tanah campuran menunjukkan beberapa kecenderungan penting. Pertama, peningkatan jumlah tumbukan (N) menghasilkan peningkatan nilai γ_{dry} secara konsisten, yang mengindikasikan bahwa energi pemasukan terdistribusi secara efektif dalam massa tanah, meningkatkan kerapatan susunan partikel. Kedua, pada campuran dengan proporsi bentonite dan kadar air yang tinggi, pola γ_{dry} cenderung tidak konsisten. Ketidak-teraturan ini disebabkan oleh dominasi sifat plastis dan kohesif bentonite yang tinggi, sehingga mempengaruhi hasil pemasukan secara signifikan dan tidak seragam. Ketiga, pengaruh kaolin sebagai bahan campuran bentonite terlihat jelas pada variasi dengan komposisi 50% bentonite dan 50% kaolin. Dalam proporsi ini, kaolin yang memiliki sifat fisik berbeda dari bentonite memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan nilai γ_{dry} , menunjukkan bahwa kombinasi dua jenis lempung tersebut menghasilkan efek sinergis dalam proses pemasukan.



Gambar 4. Relationship between actual water content and dry unit weight

Selanjutnya, dilakukan analisis hubungan linear antara nilai CBR dengan parameter hasil uji lanjutan (Gambar 4), yaitu nilai Q_{CTVA} dan berat isi kering (γ -dry). Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi keterkaitan antara kuat dukung tanah (CBR) dengan nilai tahanan penetrasi (Q_{CTVA}) serta kepadatan kering tanah yang diperoleh melalui pengujian laboratorium. Nilai Q_{CTVA} merupakan indikator resistensi penetrasi yang dipengaruhi oleh karakteristik material dan tingkat kepadatan, sedangkan γ -dry mencerminkan kondisi kepadatan optimal pada kadar air tertentu. Dengan menganalisis hubungan ini, diharapkan diperoleh pola linier yang signifikan sebagai dasar dalam penyusunan model prediktif nilai CBR berdasarkan parameter-parameter tersebut.

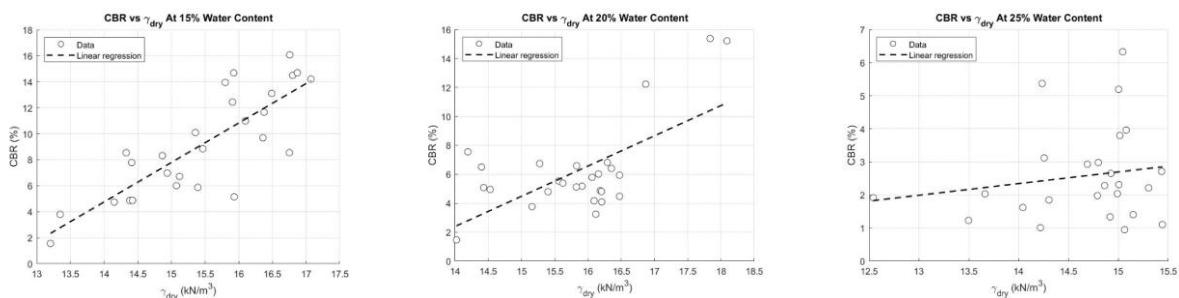
Hubungan antara nilai CBR dan nilai Q_{CTVA} menunjukkan pola kecenderungan linier yang mencerminkan korelasi positif antara kedua parameter tersebut (Gambar 5). Artinya, semakin besar daya dukung tanah yang ditunjukkan oleh nilai CBR, maka nilai tahanan ujung konus yang diukur melalui pengujian TVA Penetrometer juga meningkat. Temuan ini sejalan dengan prinsip dasar dalam geoteknik, di mana parameter-parameter mekanika tanah yang menggambarkan kekuatan dan daya dukung tanah, seperti CBR dan Q_c , umumnya memiliki keterkaitan yang saling menguatkan. Dengan demikian, nilai Q_{CTVA} berpotensi dimanfaatkan sebagai indikator atau prediktor awal terhadap nilai CBR pada jenis tanah campuran yang diuji.



Gambar 5. Relationship between CBR and Qc_{TVA}

Hubungan antara nilai CBR dan berat isi kering (γ_{dry}) pada berbagai kadar air menunjukkan pola yang bervariasi tergantung pada tingkat kelembaban tanah. Untuk memahami karakteristik hubungan ini, dilakukan analisis pada tiga kadar air yang berbeda, yaitu 15%, 20%, dan 25%. Pada kadar air 15%, hubungan antara CBR dan γ_{dry} menunjukkan kecenderungan linier positif yang kuat, di mana peningkatan kepadatan tanah selalu diikuti oleh peningkatan nilai CBR. Hal ini sesuai dengan prinsip dasar geoteknik bahwa tanah yang lebih padat memiliki daya dukung yang lebih tinggi. Pada kadar air 20%, pola hubungan masih menunjukkan tren positif, meskipun mulai tampak penyimpangan pada beberapa titik data, yang mengindikasikan awal munculnya perilaku non-linier akibat sensitivities material seperti bentonite terhadap kelembaban.

Pada kadar air 25%, pola hubungan menjadi fluctuated. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh terbentuknya rongga dalam cetakan tanah akibat penggumpalan partikel bentonite yang tidak tersebar merata, sehingga meskipun berat isi kering tampak meningkat, nilai CBR justru menurun. Selain itu, distribusi air yang tidak homogen juga berpotensi menyebabkan ketidak-tepatan dalam pengukuran kadar air aktual, sehingga hasil γ_{dry} pada kadar air tinggi menjadi kurang representative dibandingkan kadar air yang lebih rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa pada kadar air tinggi, parameter teknis tanah dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor fisik lain seperti Homogenitas pencampuran dan stabilitas struktur tanah selama proses pemanatan dan pengujian.

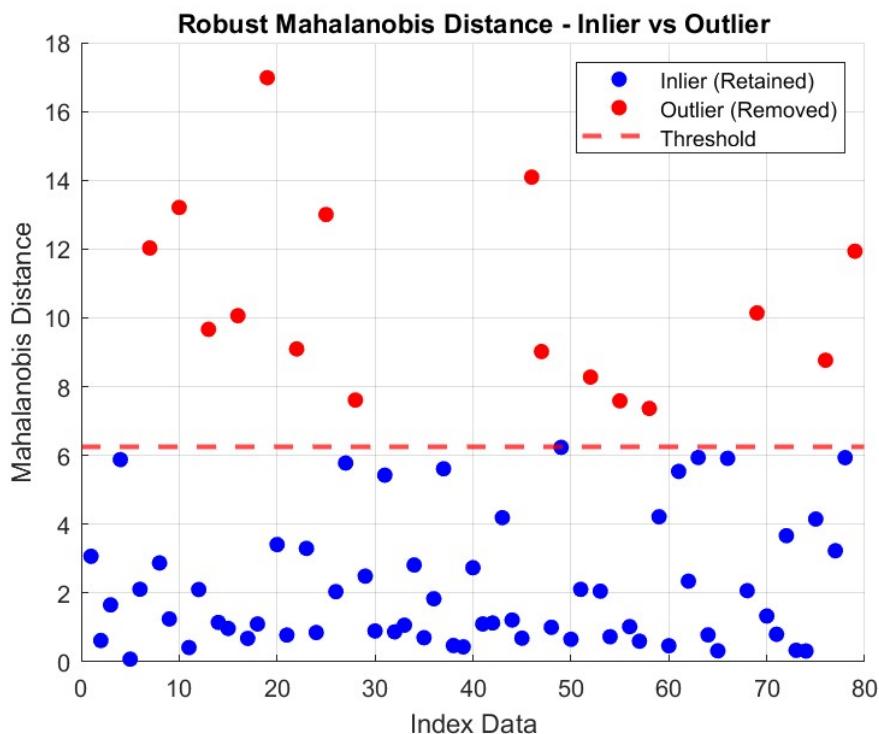


Gambar 6 Relationship between CBR and γ_{dry}

Setelah melihat hubungan berbagai parameter terhadap nilai CBR, analisis dilanjutkan ke tahap pemodelan prediktor untuk memperoleh estimasi nilai CBR yang lebih akurat. Proses ini diawali dengan eliminasi data outlier menggunakan metode Robust Mahalanobis Distance, yang dipilih karena kemampuannya dalam mengidentifikasi data-data menyimpang secara lebih stabil dibandingkan metode Mahala Nobis Distance biasa, terutama pada data yang tidak terdistribusi normal. Setelah data-data anomali disisihkan, dilakukan analisis regresi stepwise dengan parameter bebas berupa nilai Qc_{TVA}, berat isi kering tanah (γ_{dry}), dan kadar air.

Dari total 81 data awal, metode Robust Mahala Nobis Distance berhasil menyaring data dengan mengeliminasi 19 data yang ter-Indikasi menyimpang, sehingga diperoleh 62 data yang dianggap valid dan representative untuk proses pemodelan. Proses eliminasi ini dilakukan berdasarkan nilai batas ambang (cut-off value) dari jarak Mahala Nobis yang dihitung secara robust, di mana data yang memiliki jarak melebihi ambang tersebut dianggap sebagai outlier

multivariant. Dengan demikian, data yang tersisa memiliki distribusi yang lebih homogen dan mampu mencerminkan hubungan sebenarnya antara parameter input (Q_{CTVA} , γ_{dry} , dan kadar air) terhadap nilai CBR, sehingga meningkatkan reliabilitas dan akurasi model regresi yang dibangun.



Gambar 7. Inlier vs Outlier Robust Mahalanobis Distance

Setelah memperoleh kumpulan data yang telah dibersihkan dari outlier, tahap selanjutnya adalah membangun model prediksi nilai CBR menggunakan pendekatan regresi linier berganda. Metode regresi yang digunakan adalah regresi stepwise, yang dipilih karena kemampuannya dalam menyeleksi variabel bebas secara otomatis berdasarkan kontribusi signifikan terhadap model.

Dalam proses pemodelan ini, beberapa alternatif model dibangun untuk mengevaluasi kombinasi variabel bebas yang paling optimal. Model pertama menggunakan nilai Q_{CTVA} sebagai satu-satunya prediktor. Model kedua menggabungkan Q_{CTVA} dengan berat isi kering tanah (γ_{dry}). Pada model ketiga, Q_{CTVA} dipasangkan dengan kadar air aktual (w). Sementara itu, model keempat merupakan bentuk paling kompleks, yang melibatkan ketiga parameter secara simultan, yaitu Q_{CTVA} , γ_{dry} , dan w aktual. Pengujian terhadap keempat model ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana penambahan variabel bebas dapat meningkatkan akurasi prediksi, serta untuk menilai relevance masing-masing parameter dalam mempengaruhi nilai CBR.

Hasil analisis regresi stepwise terhadap keempat model yang telah direncanakan menunjukkan bahwa variabel Q_{CTVA} memiliki pengaruh paling dominan dalam memprediksi nilai CBR. Meskipun beberapa model menggabungkan Q_{CTVA} dengan variabel lain seperti berat isi kering tanah (γ_{dry}) dan kadar air aktual (w), hasil seleksi stepwise menyaring variabel-variabel tersebut dan menghasilkan model akhir yang paling optimal hanya dengan satu prediktor, yaitu Q_{CTVA} . Dengan demikian, diperoleh persamaan regresi terbaik sebagai berikut:

$$CBR = 0.524 \times Q_{CTVA} \quad (1)$$

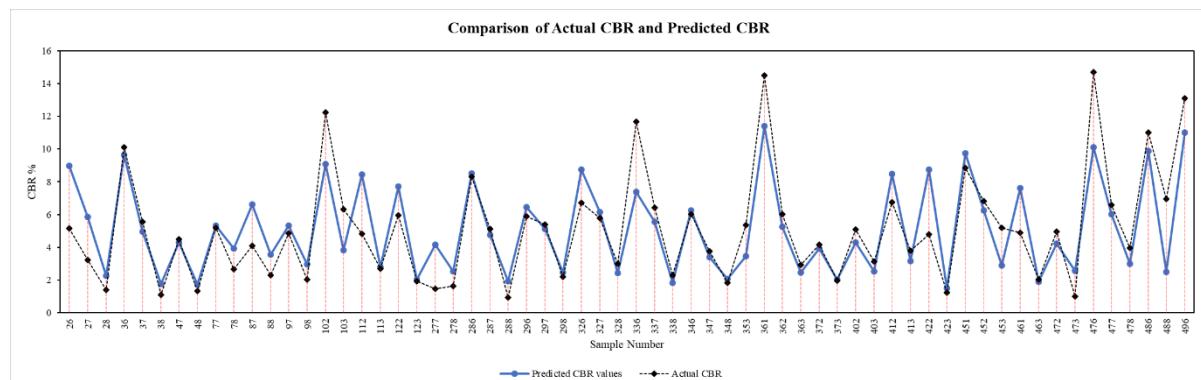
Evaluasi statistik terhadap model regresi yang dihasilkan menunjukkan kinerja prediktor yang cukup baik. Nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,70 mengindikasikan bahwa 70 % variasi pada variabel terikat (CBR) dapat dijelaskan oleh variabel prediktor Q_{CTVA} . Ini mencerminkan kekuatan hubungan linier yang cukup tinggi antara keduanya, sehingga model mampu menangkap sebagian besar pola dari data yang diamati. Selain itu, nilai p-value yang sangat kecil ($1,90055 \times 10^{-17}$) menunjukkan bahwa koefisien regresi Q_{CTVA} sangat signifikan secara statistik, bahkan pada tingkat signifikansi yang paling ketat sekalipun. Artinya, terdapat bukti yang sangat kuat untuk menolak hipotesis nol, yang menyatakan bahwa pengaruh Q_{CTVA} terhadap CBR adalah nol. Nilai Variance Inflation Factor (VIF) sebesar 1 semakin menguatkan kualitas model, karena menunjukkan tidak adanya multicollinearities, sehingga variabel Q_{CTVA} berdiri sebagai prediktor yang bebas dari redundansi dengan variabel lainnya.

DISCUSSION

Untuk menilai ketepatan dan reliabilitas prediksi model, digunakan tiga metrik kesalahan yaitu Mean Squared Error (MSE), Root Mean Squared Error (RMSE), dan Mean Absolute Error (MAE). Hasilnya, MSE sebesar 3,214 menggambarkan rata-rata kuadrat selisih antara nilai observasi dan prediksi, sedangkan RMSE sebesar 1,793 menunjukkan rata-rata deviasi prediksi terhadap nilai CBR aktual pada skala yang sama. Sementara itu, MAE sebesar 1,295 mencerminkan rata-rata kesalahan Absolut model tanpa terpengaruh oleh penciled. Ketiga nilai ini secara bersama-sama menegaskan bahwa model memiliki ketelitian yang cukup baik, dengan kesalahan prediksi rata-rata hanya berkisar antara 1,3 hingga 1,8 satuan CBR. Oleh karena itu, model regresi ini dinilai layak digunakan sebagai alat estimasi praktis untuk memperkirakan nilai CBR berdasarkan hasil pengujian Q_{CTVA} .

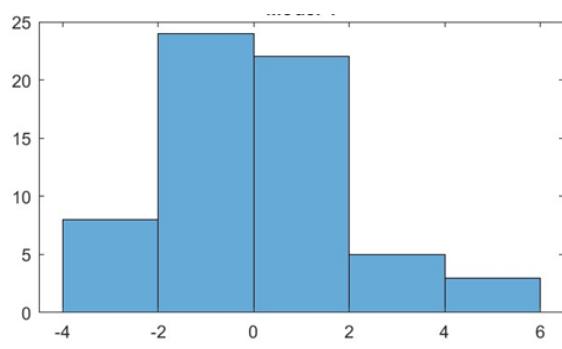
Verifikasi residual dilakukan untuk menilai kualitas dan kehandalan model dalam memprediksi nilai CBR. Perbandingan antara nilai aktual dan prediksi menunjukkan bahwa model menghasilkan estimasi yang mendekati data observasi. Analisis residual lebih lanjut ditampilkan melalui berbagai visualisasi, seperti Quantile-Quantile (Q-Q) Plot untuk menilai distribusi, histogram residual untuk mengamati penyebaran kesalahan, serta residual versus fitted plot guna mendeteksi pola sistematis atau Indikasi heteroskedasticities. Hasil visualisasi menunjukkan bahwa residual tersebut secara acak, tidak membentuk pola tertentu, dan mendekati distribusi normal. Hal ini mengindikasikan bahwa model tidak hanya memiliki kecocokan yang baik terhadap data, tetapi juga memenuhi asumsi klasik regresi linier, sehingga dapat diandalkan untuk estimasi nilai CBR berdasarkan Q_{CTVA} .

Verifikasi model dengan membandingkan nilai CBR aktual terhadap nilai CBR hasil prediksi. Toleransi eror sebesar 3% diterapkan sebagai batas wajar penyimpangan antara nilai prediksi dan observasi. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa sebagian besar data berada dalam rentang toleransi tersebut, yang mengindikasikan bahwa model memiliki tingkat akurasi yang dapat diterima. Visualisasi dan hasil lengkap dari analisis residual disajikan pada Gambar 8, yang memperkuat keandalan model dalam merepresentasikan hubungan antara variabel bebas dan nilai CBR.

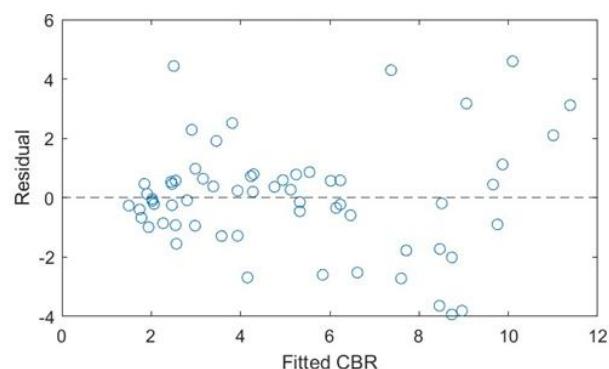


Gambar 8. Comparison of Actual CBR and Predicted CBR

Histogram residual menunjukkan bahwa interval residual pada rentang $[-1, 0]$ memiliki frekuensi tertinggi, dengan jumlah observasi berkisar antara 20 hingga 24 data yang ditunjukkan pada Gambar 9. Pola ini mengindikasikan bahwa sebagian besar nilai prediksi sedikit lebih besar dibandingkan nilai aktual, yang berarti model cenderung melakukan over-prediksi secara sistematis dalam skala yang relatif kecil. Distribusi ini tetap berada dalam batas toleransi error yang telah ditetapkan, sehingga model masih dapat dianggap valid untuk digunakan dalam prediksi nilai CBR.



(a) Histogram Residual



(b) Residuals vs Fitted Values

Gambar 9. Histogram Residual and Residuals vs Fitted Values

Hasil visualisasi melalui Quantile-Quantile (Q-Q) plot menunjukkan bahwa titik-titik residual mengikuti garis distribusi normal teoretis dengan cukup baik, terutama pada bagian tengah (quantile antara -1 hingga $+1$). Hal ini mengindikasikan bahwa distribusi residual cenderung normal di sekitar nilai rata-rata. Namun, pada bagian ekor distribusi, yaitu quantile kurang dari -2 dan lebih dari $+1.5$, terdapat penumpukan titik-titik yang menyimpang dari garis teoretis. Fenomena ini mencerminkan adanya sedikit karakteristik heavy tails, yang menunjukkan bahwa terdapat beberapa residual dengan nilai ekstrem, baik positif maupun negatif, yang berpotensi merupakan outlier. Meskipun demikian, penyimpangan ini masih dalam batas yang dapat diterima untuk keperluan prediktor model. Secara keseluruhan, Q-Q plot memberikan Indikasi bahwa asumsi Normalisasi residual telah terpenuhi dengan cukup baik, sehingga model regresi yang dikembangkan dapat dikatakan valid dan dapat diandalkan untuk melakukan prediksi nilai CBR dalam rentang data yang dianalisis.

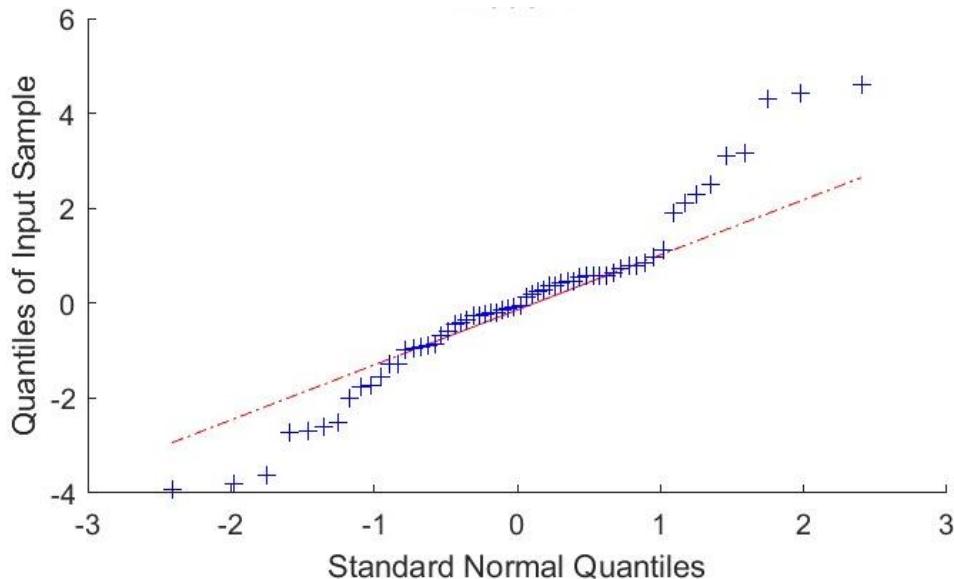


Figure 10. Verifikasi Q-Q Plot

Visualisasi melalui plot Residual vs Fitted menunjukkan bahwa tidak terdapat pola melengkung atau tren sistematis yang jelas, seperti kecenderungan residual meningkat atau menurun seiring dengan nilai fitted. Hal ini mengindikasikan bahwa asumsi model regresi linier telah terpenuhi dengan cukup baik. Selain itu, penyebaran residual tampak relatif merata di sepanjang rentang nilai fitted, yang mencerminkan karakteristik homoskedastisitas atau variance residual yang konstan. Meskipun demikian, pada rentang nilai fitted yang paling tinggi (sekitar 8 hingga 11), terdapat beberapa titik residual yang menyimpang secara signifikan (lebih dari ± 3) yang ditunjukkan pada Gambar 10. Temuan ini sejalan dengan indikasi heavy tails yang sebelumnya teridentifikasi pada Q-Q plot, yang mengarah pada kemungkinan keberadaan beberapa outlier residual. Kendati demikian, secara umum pola distribusi residual pada plot ini mendukung validitas model regresi yang digunakan.

Untuk menguji kestabilan model serta kemampuannya dalam melakukan generalisasi terhadap data baru yang belum pernah digunakan dalam proses pelatihan, dilakukan verifikasi menggunakan metode k-fold cross-validation. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai koefisien determinasi (R^2) pada data uji sebesar 0,703, yang berarti model mampu menjelaskan hampir 70% variasi nilai CBR. Ini merupakan indikasi yang baik terhadap kemampuan generalisasi model. Selain itu, nilai Root Mean Square Error (RMSE) pada data uji sebesar 1,782 masih berada dalam batas kesalahan yang dapat diterima, dan hanya sedikit lebih kecil dibandingkan dengan nilai RMSE pada data pelatihan sebesar 1,855. Selisih yang kecil ini menunjukkan bahwa model tidak mengalami gejala overfitting yang signifikan. Secara keseluruhan, hasil validasi melalui k-fold cross-validation ini mengonfirmasi bahwa model yang dibangun memiliki perform predictive yang stabil dan akurat, serta layak digunakan untuk memprediksi nilai CBR berdasarkan parameter-parameter geoteknik yang tersedia.

Setiap mengambil data atau mengutip pernyataan dari pustaka lainnya maka penulis wajib menuliskan sumber rujukannya. Rujukan atau sitasi ditulis di dalam uraian/teks dengan cara nama penulis dan tahun (Irwan dan Salim, 1998). Jika penulis lebih dari dua, maka hanya dituliskan nama penulis pertama diikuti "et al." (Bezuidenhout et al., 2009; Roeva, 2012). Semua yang dirujuk di dalam teks harus didaftarkan di bagian Daftar Pustaka, demikian juga sebaliknya, semua yang dituliskan di Daftar Pustaka harus dirujuk di dalam teks (Wang et al., 2011).

CONCLUSION

Hasil analisis menunjukkan bahwa kadar air (ω) memiliki pengaruh yang sangat rendah terhadap nilai CBR, ditunjukkan dengan dieliminasinya variabel ini oleh metode regresi stepwise. Demikian pula, variabel berat isi kering (γ_{dry}) tidak layak digunakan sebagai prediktor karena data yang fluktuatif terutama pada kadar air di atas 20%. Dari hasil regresi, parameter Q_{CTVA} menjadi variabel paling signifikan dalam memprediksi nilai CBR, sebagaimana tercermin dalam model yang hanya menggunakan Q_{CTVA} sebagai prediktor dalam persamaan.

Model ini dapat direkomendasikan sebagai pendekatan empiris dalam estimasi nilai CBR berdasarkan pengujian TVA Penetrometer, dengan tetap memperhatikan batasan geoteknik tertentu. Penggunaan model memungkinkan estimasi cepat tanpa peralatan berat, dan meskipun pada nilai $CBR > 7\%$ terjadi peningkatan rata-rata residual hingga $\pm 1-1,5$, hal ini masih dalam batas toleransi untuk perencanaan awal. Jika diperlukan, validasi lapangan tambahan dapat difokuskan pada titik-titik kritis guna memastikan faktor keamanan.

REFERENCES

- Ahmed, S. S., Hossain, N., Khan, A. J., & Islam, M. S. (2018). Prediction of Soaked CBR Using Index Properties, Dry Density and Unsoaked CBR of Lean Clay. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 28(2), 270283.
- Asnur, H., & Yunita, R. (2023). Perbandingan Tingkat Kepadatan Tanah Di Lima Kecamatan Kota Payakumbuh Dengan Metoda Standar Proctor. *SAINTEKES: Jurnal Sains, Teknologi Dan Kesehatan*, 2(1), 5461.
- Bria, Y., Alwi, A., & Aprianto, A. (2020). Korelasi Daya Dukung Tanah Dasar yang Didapat dari Hasil Uji Sondir, DCP dan Hand Penetrometer. *JeLAST: Jurnal PWK, Laut, Sipil, Tambang*, 7(1), 1–10.
- Cahyadi, H. (2019). Korelasi Tahanan Ujung Konus (qc) Dengan California Bearing Ratio (CBR) Untuk Tanah Di Banjarbaru. *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 8(1), 9–16.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah: Prinsip-prinsip rekayasa geoteknis*. Erlangga.
- Das, B. M. (2016). *Principles of Geotechnical Engineering* (8 ed.). Cengage Learning.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2017). *Principles of Geotechnical Engineering* (9th Ed). Cengage Learning.
- Erny, E. (2022). Analisis Korelasi Tahanan Konus Dengan Nilai CBR Laboratorium dan CBR Hasil Uji DCP Studi Kasus Indragiri Hulu dan Pekanbaru. *Jurnal Syntax Admiration*, 3(3), 490–505.
- Handayani, N., & Saputra, N. Ajie. (2019). PERSAMAAN NILAI KORELASI INDEKS PLASTISITAS (PI) TANAH DENGAN CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR) TANAH LEMPUNG PALANGKA RAYA. *8(1)*, 63–71.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall.
- Kuttah, D. (2019). Strong correlation between the laboratory dynamic CBR and the compaction characteristics of sandy soil. *International Journal of GeoEngineering*, 10(1).
- Mitchell, James K., & Soga, K. (2005). *Fundamental Of Soil Behavior*.
- Mursyid, & Anwar, A. (2023). Sifat dan Morfologi Tanah. In *Jurnal Ilmu Pendidikan* (Vol. 7, Nomor 2).
- Nugroho, S. A., Yusa, M., & Satibi, S. (2019). Value Estimation Of California Bearing Ratio From Hand Cone Penetrometer Test For Pekanbaru Soils. *Jurnal Teknik Sipil*, 26(1), 25.
- Nur, S., Sari, I., & Wahyuni, D. (2023). Analysis of Soil Characteristics by Layer Based on the Robertson Et Al and Schmertmann Method from CPT (Cone Penetration Test). *Sriwijaya Journal of Environment*, 8(2), 76–81.
- Utami, D. N. (2018). Kajian Jenis Mineralogi Lempung Dan Implikasinya Dengan Gerakan Tanah Study of Clay Mineral Type and Its Implication Toward Landslide. *Jurnal Alami*, 2(2), 89–97.
- Waruwu, A., Zega, O., Rano, D., Maureent, B., Panjaitan, T., & Harefa, S. (2021). Kajian Nilai California Bearing Ratio (CBR) Pada Tanah lempung Lunak Dengan Variasi Tebal Stabilisasi Menggunakan Abu Vulkanik. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 17(2), 116.
- Wibisono, G., Nugroho, S. A., & Umam, K. (2018). THE INFLUENCE of SAND's GRADATION and CLAY CONTENT of DIRECT SHEART TEST on CLAYEY SAND. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 316(1).
- Yusa, M., & Nugroho, S. A. (2009). Korelasi Pengujian Kepadatan Lapangan Dan Static Hand Penetrometer Terhadap Hasil CBR Laboratorium Pada Beberapa Jenis Tanah. *Media Teknik Sipil*, 8(1), 25–32.
- Zaika, Y., Rachmansyah, A., & Harimurti. (2019). Geotechnical behaviour of soft soil in East Java, Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 615(1).