

Pengaruh Fluktuasi Muka Air Tanah terhadap Parameter CPT ternormalisasi dan Klasifikasi *Soil Behavior Type* (SBT)

Aswin Wahyu Kurniawan*^{1a}, Hulfa Istiqomah*², Lalu Samsul Aswadi*³, Dwi Sat Agus Yuwana*⁴

Submit:
3 April 2026

Review:
18 April 2026

Revised:
27 April 2026

Published:
13 Mei 2026

*¹Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Magelang, Indonesia,
aswin@untidar.ac.id

*²Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Magelang, Indonesia,
histikomah@untidar.ac.id

*³Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Magelang, Indonesia,
lalusamsulaswadi@untidar.ac.id

*⁴Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Magelang, Indonesia,
dwisatagus@untidar.ac.id

^aCorresponding Author: aswin@untidar.ac.id

Abstrak

Fluktuasi muka air tanah merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kondisi tegangan efektif tanah dan berpotensi memengaruhi interpretasi parameter geoteknik berbasis *Cone Penetration Test* (CPT). Fluktuasi muka air tanah pada umumnya dipengaruhi oleh dinamika kondisi hidrologi yang bersifat periodik, terutama akibat perbedaan intensitas curah hujan antara musim hujan dan musim kemarau. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh fluktuasi muka air tanah terhadap nilai *stress-normalized cone resistance* (Q_{tn}) serta implikasinya terhadap klasifikasi *Soil Behavior Type* (SBT). Data yang digunakan berasal dari tiga titik CPT (S-05, S-10, dan S-11) di Kota Magelang, dengan simulasi variasi muka air tanah pada kedalaman 1 m, 2 m, 3 m, dan 4 m. Analisis dilakukan melalui perhitungan tegangan vertikal efektif, normalisasi parameter CPT, serta evaluasi perubahan nilai Q_{tn} dan klasifikasi SBT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa fluktuasi muka air yang lebih dangkal menghasilkan nilai Q_{tn} yang lebih besar akibat penurunan tegangan efektif. Persentase perubahan Q_{tn} mencapai hingga 181,56% dan menunjukkan pola yang konsisten pada seluruh titik CPT. Meskipun demikian, perubahan nilai Q_{tn} tidak selalu diikuti oleh perubahan klasifikasi SBT yang signifikan pada seluruh kedalaman. Penelitian ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan kondisi muka air tanah dalam interpretasi parameter CPT ternormalisasi.

Kata kunci: CPT, muka air tanah, SBT, tegangan efektif, Q_{tn}

Abstract

Groundwater level fluctuation affects effective stress and may influence the interpretation of geotechnical parameters derived from Cone Penetration Test (CPT). This study aims to analyze the effect of groundwater fluctuations on stress-normalized cone resistance (Q_{tn}) and its implications for Soil Behavior Type (SBT) classification. Data were obtained from three CPT points (S-05, S-10, and S-11) in Magelang City, with simulated groundwater depths of 1 m, 2 m, 3 m, and 4 m. The analysis included effective stress calculation, CPT normalization, and evaluation of Q_{tn} changes and SBT classification. The Results show that shallower groundwater levels increase Q_{tn} due to reduced effective stress, with changes reaching up to 181.56% and consistent across all CPT points. However, these changes do not always lead to significant shifts in SBT classification. This study highlights the importance of considering groundwater conditions in CPT-based geotechnical interpretation.

Keywords: CPT, groundwater level, SBT, effective stress, Q_{tn}

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang berada di daerah tropis. Ciri khas dari negara yang berada pada zona iklim tropis adalah hanya memiliki dua musim utama, yaitu musim hujan dan musim kemarau [1,2]. Kondisi tersebut menyebabkan variasi kondisi hidrologi tanah secara periodik. Perbedaan intensitas curah hujan pada kedua musim tersebut mengakibatkan terjadinya fluktuasi muka air tanah, baik berupa kenaikan maupun penurunan pada waktu tertentu. Perubahan muka air tanah ini berpengaruh terhadap tegangan vertikal efektif tanah yang menjadi salah satu parameter penting dalam analisis geoteknik [3], [4]. Tegangan vertikal efektif merupakan parameter *fundamental* dalam mekanika tanah karena secara langsung mengontrol perilaku deformasi, kuat geser, kompresibilitas, dan konsolidasi. Perubahan tegangan efektif akibat fluktuasi muka air tanah akan mempengaruhi tekanan air pori dan distribusi tegangan dalam tanah, sehingga berdampak pada respons terhadap beban dan interpretasi parameter geoteknik [5]. Untuk mengetahui kondisi tanah bawah permukaan, salah satu pengujian yang umum digunakan adalah *Cone Penetration Test* (CPT). Pengujian tersebut menghasilkan data berupa tahanan ujung konus (q_c) dan *friction ratio* (Fr) pada setiap kedalaman [6].

Metode CPT telah banyak digunakan dalam penyelidikan tanah bawah permukaan, karena mampu mengidentifikasi lapisan tanah berdasarkan respon tanah terhadap penetrasi konus [7]. Data hasil pengujian CPT umumnya diinterpretasikan untuk mengklasifikasikan jenis dan perilaku tanah menggunakan metode *Soil Behavior Type* (SBT). Metode tersebut dilakukan dengan pendekatan parameter ternormalisasi dari *stress-normalized cone resistance* (Q_{tn}) dan *friction ratio* (Fr) [8], dimana tegangan efektif tanah memberikan pengaruh terhadap parameter tersebut. Pendekatan ini dinilai lebih representatif dalam menggambarkan perilaku tanah. Seiring perkembangan metode interpretasi dan pendekatan parameter ternormalisasi seperti *normalized cone resistance* (Q_t) dan *stress-normalized cone resistance* (Q_{tn}) yang dimana bertujuan untuk mengurangi pengaruh tegangan *overburden* [9]. Sebagian besar penelitian yang sudah dilakukan menunjukkan bahwa CPT digunakan untuk karakterisasi tanah dan estimasi parameter geoteknik [10], [11], [12]. Karakteristik dan perilaku tanah dilakukan melalui sifat fisik dan mekanik tanah, seperti uji kompaksi dan uji kuat geser menunjukkan bahwa parameter geoteknik sangat berpengaruh terhadap stabilitas dan daya dukung tanah [13], [14]. Selain itu penelitian sebelumnya terkait klasifikasi SBT masih menggunakan asumsi muka air tanah yang konstan dalam proses normalisasi parameter CPT [15], [16], [17]. Padahal, fluktuasi muka air tanah dapat memengaruhi tegangan vertikal efektif yang selanjutnya akan berdampak pada nilai Q_{tn} dan kemungkinan perubahan klasifikasi SBT. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memahami sensitivitas parameter CPT ternormalisasi terhadap variasi kondisi muka air tanah.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh fluktuasi muka air tanah terhadap nilai Q_{tn} serta mengevaluasi perubahan klasifikasi SBT. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang lebih komprehensif mengenai sensitivitas parameter CPT terhadap kondisi hidrologi. Selain itu juga kondisi hidrologi yang dinamis akan menjadi pertimbangan dalam interpretasi data CPT dan analisis geoteknik.

METODOLOGI

A. Lokasi Penelitian

Lokasi Penelitian berada di wilayah Desa Potrobangsari, Kecamatan Magelang Utara, Kota Magelang, Provinsi Jawa Tengah. Pemilihan lokasi penelitian didasarkan pada data penyelidikan tanah yang lengkap.

Data penyelidikan tanah tersebut meliputi hasil pengujian *Cone Penetration Test* (CPT)/Sondir, *boring* geoteknik, dan pengujian laboratorium.

B. Data Penyelidikan Tanah

Data penyelidikan tanah pada penelitian ini merupakan bagian dari kegiatan penyelidikan tanah yang telah dilakukan pada lokasi yang sama. Data penyelidikan tanah yang digunakan adalah data primer dan data sekunder. Data primer terdiri dari hasil pengujian CPT, sedangkan data sekunder adalah data hasil pengujian *boring* dan pengujian laboratorium sampel tanah. Dari keseluruhan 11 titik CPT yang telah dilakukan, penelitian ini hanya menggunakan 3 titik CPT (S-05, S-10, dan S-11). Pemilihan tiga titik CPT tersebut didasarkan pada representatif hasil pengujian yang telah dilakukan, dimana 3 titik tersebut memiliki karakteristik yang relatif seragam serta berada pada area yang sama dengan penyelidikan tanah sebelumnya. Selain itu, lokasi 3 titik CPT tersebut memiliki jarak yang relatif dekat (20 m sampai 80 m) dengan titik penyelidikan *boring*, karena data MAT dari hasil pengujian *boring* akan digunakan sebagai dasar untuk mengklasifikasikan *Soil Behavior Type* (SBT) ternormalisasi. Hasil dari pengujian CPT didapatkan hasil tahanan konus (q_c) dan *friction ratio* (Fr).

Pada pengujian *boring* geoteknik, selain untuk mengetahui ketebalan, deskripsi tanah, dan *Standard Penetration Test* (SPT) juga dilakukan pengambilan sampel tanah pada kedalaman tertentu. sampel tanah tersebut kemudian dilakukan pengujian laboratorium beberapa parameter tanah antara lain, kadar air, berat jenis, batas-batas *atterberg*, analisa ukuran butir tanah, dan geser langsung.

C. Parameter Tegangan Tanah

Parameter tegangan yang digunakan dalam perhitungan *stress-normalized cone resistance* adalah nilai tegangan vertikal total dan tegangan vertikal efektif. Tegangan vertikal total (σ_v) dihitung pada setiap kedalaman berdasarkan berat volume tanah [18]. perhitungan tegangan vertikal total dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad (1)$$

dengan,

σ_v = tegangan vertikal total (kN/m²)

γ = berat volume tanah (kN/m³)

z = kedalaman (m)

Tekanan air pori hidrostatik (u_0) ditentukan berdasarkan kedalaman muka air tanah [18]. Pada kedalaman di bawah muka air tanah, tekanan air pori dihitung menggunakan persamaan:

$$u_0 = \gamma_w (z - z_{MAT}) \quad (2)$$

dengan,

u_0 = tekanan air pori (kN/m²)

γ_w = berat volume air = 9.81 kN/m³

z_{MAT} = kedalaman muka air tanah (m)

Tegangan vertikal efektif (σ'_v) dihitung dari selisih antara tegangan vertikal total dan tekanan air pori hidrostatik [18] yang dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\sigma'_v = \sigma_v - u_0 \quad (3)$$

Nilai tegangan vertikal efektif ini digunakan sebagai parameter yang sangat penting dalam proses normalisasi tahanan konus pada analisis CPT. Dalam penelitian ini, variasi muka air tanah digunakan

sebagai parameter untuk mengetahui perubahan nilai tegangan vertikal efektif yang selanjutnya mempengaruhi nilai *normalized cone resistance* (Q_t) dan pengaruhnya terhadap hasil klasifikasi *Soil Behavior Type* (SBT).

D. Parameter CPT Ternormalisasi

Parameter CPT Ternormalisasi dihitung untuk mengurangi pengaruh tegangan *overburden* terhadap nilai tahanan konus. Sehingga nilai tahanan konus pada setiap kedalaman dapat dibandingkan secara lebih konsisten. Proses ini diperlukan dalam analisis klasifikasi *Soil Behavior Type* (SBT), karena nilai tahanan konus yang didapatkan dipengaruhi oleh kondisi tegangan efektif tanah.

Parameter pertama yang perlu dihitung adalah *normalized cone resistance* (Q_t). nilai tersebut diperoleh dari hubungan antara tahanan konus terkoreksi dan tegangan vertikal efektif (σ'_v) [19]. Nilai Q_t dihitung menggunakan persamaan:

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_v}{\sigma'_v} \quad (4)$$

dengan,

Q_t = *normalized cone resistance*

q_t = tahanan ujung terkoreksi (kN/m²), jika tidak ada data tekanan air pori u_2 maka dapat menggunakan q_c

Parameter selanjutnya adalah *stress-normalized cone resistance* (Q_{tn}), yang diperoleh dengan mempertimbangkan pengaruh tegangan vertikal efektif (σ'_v) terhadap *normalized cone resistance* (Q_t) [19]. Nilai Q_{tn} dihitung dengan persamaan:

$$Q_{tn} = Q_t \left(\frac{P_a}{\sigma'_v} \right)^n \quad (5)$$

dengan,

Q_{tn} = tahanan konus yang dinormalisasi terhadap tegangan

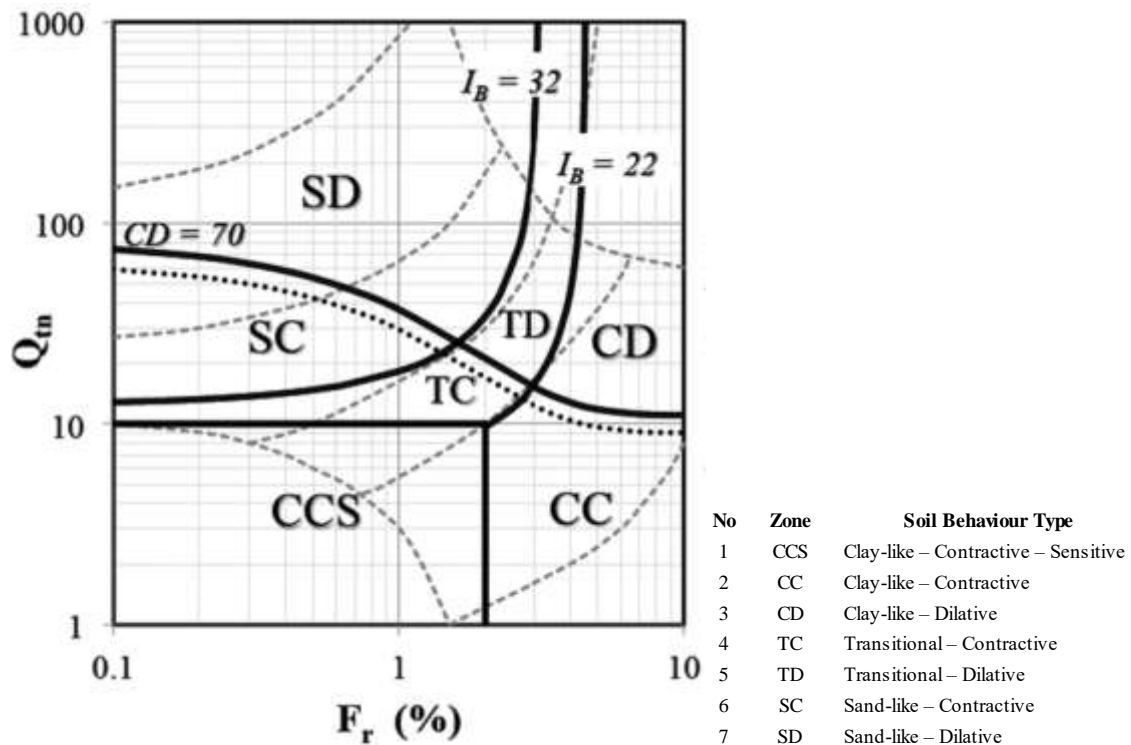
P_a = tekanan atmosfer ≈ 100 kN/m²

n = eksponen normalisasi tegangan (0.5 – 1)

Parameter Q_{tn} yang telah diperoleh dari hasil perhitungan dan nilai Fr didapatkan dari hasil CPT. Kedua parameter tersebut kemudian digunakan untuk menentukan zona perilaku tanah melalui grafik klasifikasi *normalized Soil Behavior Type* (SBTn).

E. Klasifikasi Normalized Soil Behavior Type

Klasifikasi *normalized Soil Behavior Type* (SBTn) dilakukan untuk menentukan zona perilaku tanah. Berdasarkan grafik tersebut tanah diklasifikasikan menjadi 7 zona seperti *Clay-like – Contractive – Sensitive*, *Clay-like – Contractive*, *Clay-like – Dilative*, *Transitional – Contractive*, *Transitional – Dilative*, *Sand-like – Contractive*, dan *Sand-like – Dilative* [19]. Grafik SBTn tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik hubungan Q_{tn} dan F_r dari klasifikasi *Normalized Soil Behavior Type* (SBTn)

F. Fluktuasi Muka Air Tanah

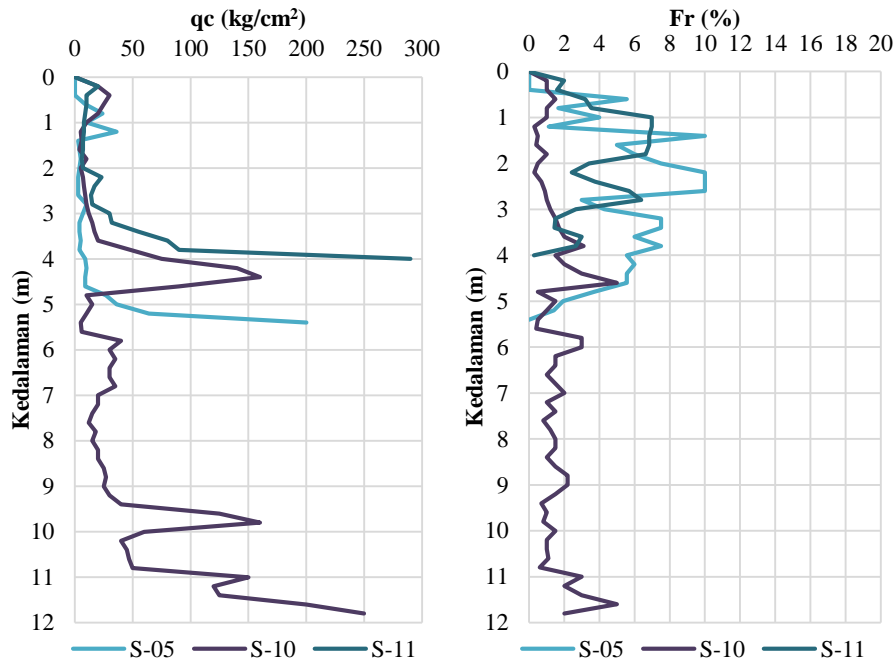
Fluktuasi muka air tanah dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh perubahan kondisi hidrologi terhadap nilai *stress-normalized cone resistance* (Q_{tn}) dan klasifikasi *normalized Soil Behavior Type* (SBTn). Untuk mengevaluasi sensitivitas parameter CPT terhadap perubahan MAT, dilakukan simulasi beberapa kondisi MAT pada kedalaman 1.00 m, 2.00 m, 3.00 m, dan 4.00 m. Variasi muka air tanah tersebut didasarkan pada kisaran fluktuasi muka air tanah yang umum terjadi pada daerah beriklim tropis [3]. Perubahan kedalaman MAT tersebut digunakan untuk menghitung tekanan air pori hidrostatik (u_0) dan tegangan vertikal efektif (σ'_v) setiap titik CPT. Hasil dari perhitungan tersebut kemudian dianalisis untuk mengetahui persentase perubahan nilai Q_{tn} serta kemungkinan perubahan zona klasifikasi SBTn pada setiap kedalaman.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penyelidikan Tanah

Hasil pengujian *Cone Penetration Test* (CPT) digunakan untuk menghitung variasi karakteristik tanah berdasarkan nilai tahanan konus (q_c) dan *friction ratio* (F_r). Nilai q_c dan F_r pada lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 2. Nilai q_c memberikan indikasi kepadatan tanah, sedangkan F_r menunjukkan kecenderungan jenis tanah berdasarkan perbandingan antara hambatan selimut dan tahanan ujung konus.

Selain itu, data hasil pengujian laboratorium yang digunakan adalah kadar air (w), berat jenis (G_s), dan berat volume tanah basah. Terdapat 4 kedalaman sampel tanah berbeda yang dilakukan pengujian laboratorium yaitu 2.00-2.50 m, 8.50 – 9.00 m, 17.00 – 17.50 m, dan 27.00 – 27.50 m. dari keempat kedalaman tersebut data yang digunakan adalah pada kedalaman 2.00 – 2.50 m, karena muka air tanah dari hasil *boring* geoteknik diketahui berada pada kedalaman 3.00 m. Kedalaman tersebut dipilih untuk mewakili kondisi tanah yang paling relevan terhadap analisis pengaruh fluktuasi muka air tanah terhadap parameter CPT ternormalisasi.



Gambar 2. Tahanan ujung konus (q_c) dan *friction ratio* (Fr) terhadap kedalaman hasil pengujian CPT

Tabel 1. Data Hasil Pengujian Laboratorium

No	Sampel	Kedalaman (m)	w (%)	G _s	γ_b (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)
1	BH-1	02.00 – 02.50	31.90	2.28	16.19	17.76

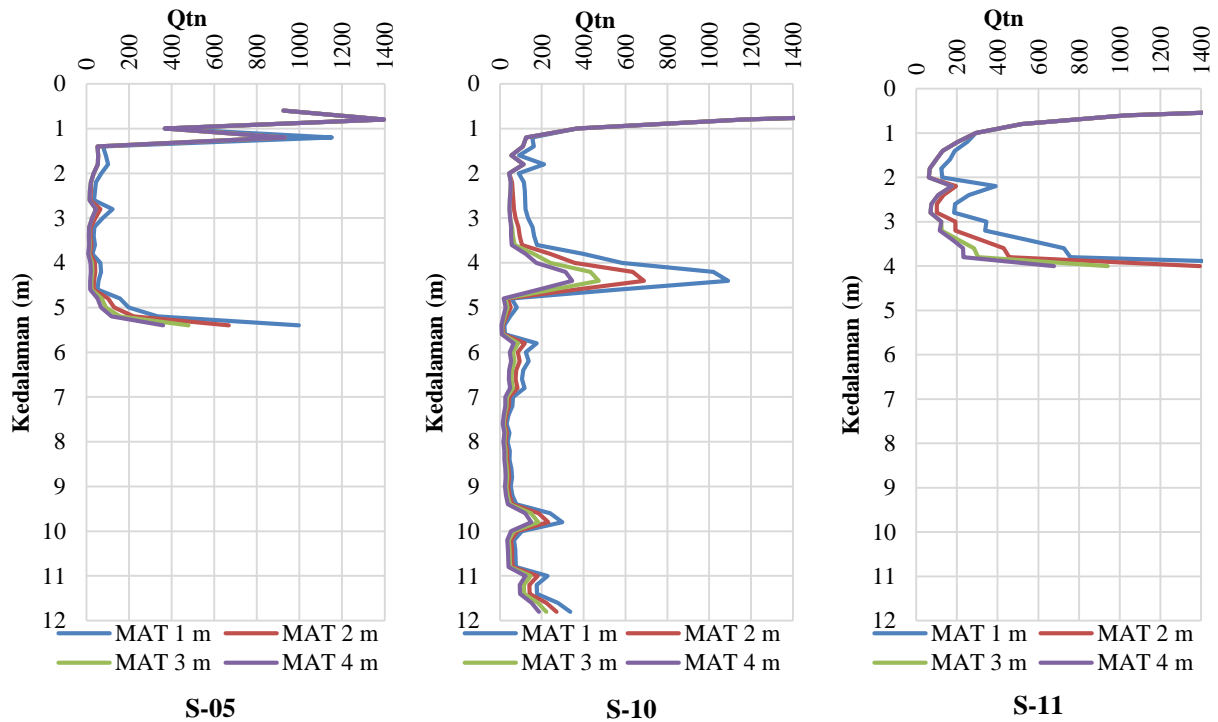
B. Tegangan Vertikal dan Tegangan Efektif

Distribusi tegangan vertikal dan tegangan vertikal efektif terhadap kedalaman setiap titik CPT (S-05, S-10, dan S-11) dengan kondisi fluktuasi muka air tanah (1 m, 2 m, 3 m, dan 4 m) dari permukaan tanah. Secara umum, nilai tegangan vertikal efektif meningkat seiring dengan bertambahnya kedalaman akibat pengaruh akumulasi berat tanah di atasnya. Pengaruh perubahan posisi muka air tanah memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai tegangan vertikal efektif. Nilai tegangan pada kondisi muka air tanah kedalaman 1 m cenderung lebih kecil dari pada kondisi muka air tanah kedalaman 2 m, 3 m, dan 4 m.

Perbedaan nilai tegangan efektif setiap kondisi muka air tanah terlihat lebih jelas pada kedalaman yang lebih besar. Selisih antar nilai (σ'_v) pada setiap kondisi semakin meningkat seiring bertambahnya kedalaman. Hal ini menunjukkan bahwa fluktuasi muka air tanah memengaruhi proses normalisasi parameter CPT.

C. Parameter CPT Ternormalisasi

Parameter CPT ternormalisasi yang dihitung dari proses normalisasi tahanan ujung konus terhadap tegangan vertikal efektif. Pada penelitian ini, karena tidak terdapat data tekanan air pori (u_2), maka nilai tahanan ujung konus terkoreksi diasumsikan sama dengan tahanan ujung konus ($q_t = q_c$). Dengan demikian, parameter Q_{tn} dihitung berdasarkan nilai q_c yang telah dinormalisasi terhadap tegangan vertikal efektif. Distribusi nilai *stress-normalized cone resistance* (Q_{tn}) terhadap kedalaman untuk setiap titik CPT (S-05, S-10, dan S-11) dengan berbagai kondisi fluktuasi muka air tanah ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Distribusi Q_{tn} terhadap kedalaman pada titik CPT S-05, S-10, dan S-11 dengan variasi muka air tanah

Nilai Q_{tn} menunjukkan variasi yang cukup signifikan pada setiap kedalaman. pengaruh fluktuasi muka air tanah terhadap nilai Q_{tn} terlihat jelas pada semua titik CPT. Pada kondisi muka air tanah lebih dangkal (MAT = 1 m), nilai Q_{tn} lebih besar dibandingkan kondisi muka air tanah yang lebih dalam (MAT = 2 m, 3 m, dan 4 m). Hal ini disebabkan oleh penurunan nilai tegangan efektif (σ'_v) akibat meningkatnya tekanan air pori, sehingga menghasilkan nilai Q_{tn} yang lebih besar. Sebaliknya pada kondisi muka air tanah yang lebih dalam nilai tegangan efektif meningkat sehingga nilai Q_{tn} lebih kecil.

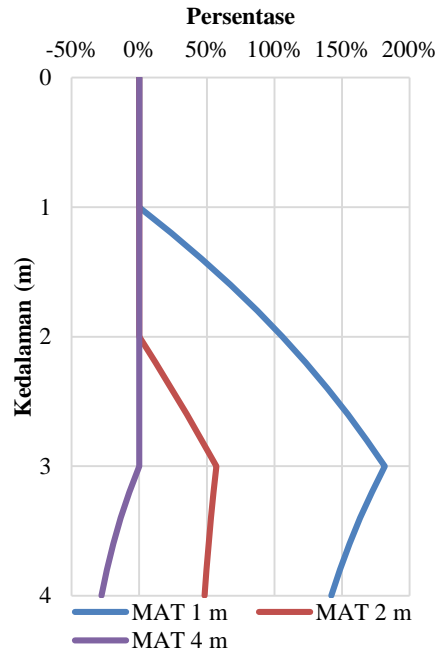
D. Persentase Perubahan Nilai Q_{tn}

Persentase perubahan nilai *stress-normalized cone resistance* (Q_{tn}) terhadap variasi muka air tanah digunakan untuk mengevaluasi tingkat sensitivitas parameter CPT ternormalisasi terhadap kondisi hidrologi. Perhitungan persentase perubahan dilakukan dengan membandingkan nilai Q_{tn} pada kondisi muka air tanah dari hasil uji bor, yaitu pada kedalaman 3 m terhadap fluktuasi muka air tanah pada kedalaman 1 m, 2 m, dan 4 m.

Hasil persentase perubahan nilai Q_{tn} dari ketiga titik CPT (S-05, S-10, dan S-11) menunjukkan hasil persentase yang sama pada setiap kondisi. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh fluktuasi muka air tanah terhadap nilai Q_{tn} bersifat konsisten dan tidak tergantung pada variasi lokasi pengujian CPT. Distribusi persentase perubahan nilai Q_{tn} terhadap kedalaman ditunjukkan pada Gambar 4.

Perubahan nilai Q_{tn} menunjukkan tren yang bervariasi pada setiap kondisi. Kondisi dengan muka air tanah lebih dangkal (MAT = 1 m), terjadi peningkatan nilai Q_{tn} yang cukup signifikan hingga mencapai 181.56% pada kedalaman 3 m. Nilai ini menunjukkan bahwa penurunan tegangan vertikal efektif akibat muka air tanah memberikan pengaruh besar terhadap nilai Q_{tn} . Dalam analisis ini, kondisi muka air tanah pada kedalaman 3 m tidak ditampilkan, karena digunakan sebagai acuan dalam perhitungan persentase perubahan nilai Q_{tn} . Kedalaman tersebut didasarkan pada data aktual hasil pengujian boring di lokasi penelitian.

Sedangkan pada kondisi muka air tanah MAT = 4 m, nilai Q_{tn} mengalami penurunan dibandingkan pada kedalaman MAT = 3 m. Hal tersebut ditunjukkan oleh persentase perubahan bernilai negatif. Kondisi ini disebabkan oleh meningkatnya tegangan vertikal efektif sehingga nilai Q_{tn} yang dihasilkan menjadi lebih kecil. Dengan demikian, parameter Q_{tn} sensitif terhadap perubahan tegangan vertikal efektif akibat fluktuasi muka air tanah. Kondisi muka air tanah perlu dipertimbangkan dalam interpretasi parameter CPT ternormalisasi.



Gambar 4. persentase perubahan Q_{tn} terhadap kedalaman pada berbagai kondisi muka air tanah (MAT)

E. Pengaruh Fluktuasi MAT terhadap Klasifikasi SBT

Klasifikasi *Soil Behavior Type* (SBT) akibat pengaruh fluktuasi muka air tanah dianalisis perubahan zona klasifikasi hasil plotting parameter Q_{tn} dan Fr pada grafik *Normalized Soil Behavior Type* (SBTn). Hasil klasifikasi untuk masing-masing titik CPT (S-05, S-10, dan S-11) dengan variasi muka air tanah ditunjukkan pada Tabel 2. Pada penelitian ini, analisis klasifikasi SBT kedalaman dibatasi hingga kedalaman 4 m, karena kedalaman tersebut berada pada zona yang paling terpengaruh oleh fluktuasi muka air tanah.

Tabel 2. Klasifikasi *Soil Behavior Type* (SBT) pada berbagai kedalaman dan kondisi muka air tanah

Kedalaman (m)	S-05				S-10				S-11			
	1 m	2 m	3 m	4 m	1 m	2 m	3 m	4 m	1 m	2 m	3 m	4 m
0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.20	-	-	-	-	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
0.40	-	-	-	-	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
0.60	CD	CD	CD	CD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
0.80	CD	CD	CD	CD	SD	SD	SD	SD	TD	TD	TD	TD
1.00	TD	TD	TD	TD	SD	SD	SD	SD	CD	CD	CD	CD
1.20	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	CD	CD	CD	CD
1.40	CD	CD	CD	CD	SD	SD	SD	SD	CD	CD	CD	CD
1.60	CD	CD	CD	CD	SD	SC	SC	SC	CD	CD	CD	CD
1.80	CD	CD	CD	CD	SD	SD	SD	SD	CD	CD	CD	CD

Kedalaman (m)	S-05				S-10				S-11			
	MAT											
	1 m	2 m	3 m	4 m	1 m	2 m	3 m	4 m	1 m	2 m	3 m	4 m
2.00	CD	CD	CD	CD	SD	SC	SC	SC	TD	TD	TD	TD
2.20	CD	CD	CD	CD	SD	SC	SC	SC	SD	SD	SD	SD
2.40	CD	CD	CD	CD	SD	SD	SD	SD	TD	TD	TD	TD
2.60	CD	CD	CD	CD	SD	SD	SD	SD	CD	CD	CD	CD
2.80	TD	TD	TD	TD	SD	SD	SD	SD	CD	CD	CD	CD
3.00	CD	CD	CD	CD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
3.20	CD	CD	CD	CD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
3.40	CD	CD	CD	CC	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
3.60	CD	CD	CD	CD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
3.80	CD	CD	CD	CC	TD	TD	TD	TD	SD	SD	SD	SD
4.00	CD	CD	CD	CD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD

Hasil klasifikasi menunjukkan bahwa perubahan muka air tanah memberikan pengaruh terhadap zona perilaku tanah pada kedalaman tertentu. Pada beberapa kedalaman, khususnya di sekitar zona muka air tanah, terlihat pergeseran klasifikasi tanah. Semula masuk kedalam zona *clay-like dilative* (CD) menjadi zona *clay-like contractive* (CC) dan zona *sand-like dilative* (SD) menjadi *sand-like contractive* (SC). Sebagian besar lapisan tanah pada ketiga titik CPT tetap berada pada zona klasifikasi yang sama *clay-like* dan *sand-like*, meskipun terjadi perubahan kondisi muka air tanah. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun parameter Q_{tn} sensitif terhadap fluktuasi muka air tanah, perubahan tersebut menghasilkan perubahan klasifikasi SBT yang signifikan pada seluruh kedalaman.

SIMPULAN

Fluktuasi muka air tanah berpengaruh signifikan terhadap nilai Q_{tn} , muka air tanah yang lebih dangkal meningkatkan nilai Q_{tn} dan sebaliknya. Meskipun persentase perubahan Q_{tn} cukup besar, perubahan tersebut tidak selalu diikuti dengan perubahan klasifikasi *Soil Behavior Type* (SBT). Oleh karena itu, kedalaman muka air tanah perlu dipertimbangkan dalam interpretasi parameter CPT ternormalisasi. Penelitian ini memiliki keterbatasan pada jumlah titik yang digunakan sebagai acuan terkait muka air tanah pada lokasi penelitian dan pendekatan fluktuasi muka air tanah yang masih berbasis simulasi sederhana. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan data yang lebih lengkap terkait kondisi muka air tanah baik pada saat musim hujan maupun kemarau. Sehingga hasil penelitian yang dihasilkan lebih komprehensif.

ACKNOWLEDGEMENT

Penulis menyampaikan apresiasi kepada Biro Perencanaan, Keuangan, dan Umum, Universitas Tidar atas dukungan serta akses data yang diberikan untuk keperluan penelitian ini. Ketersediaan data tersebut sangat membantu dalam proses analisis hingga penyusunan hasil penelitian.

REFERENSI

- [1] J. Lu, T. Li, and L. Wang, "Precipitation Diurnal Cycle Over The Maritime Continent Modulated By The Climatological Annual Cycle," *J. Clim.*, vol. 34, no. 4, pp. 1387–1402, Feb. 2021, doi: 10.1175/JCLI-D-20-0130.1.
- [2] K. dan G. (BMKG) Badan Meteorologi, "Prediksi Musim Hujan 2025/2026 di Indonesia," Jakarta, Sep. 2025. [Online]. Available: www.bmkg.go.id
- [3] M. J. Ascott *et al.*, "Time of Emergence of Impacts of Climate Change on Groundwater Levels in Sub-Saharan Africa," *J. Hydrol. (Amst.)*, vol. 612, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128107.

- [4] Z. Zhang *et al.*, “Effects of Changes in Soil Properties Caused by Progressive Infiltration of Rainwater on Rainfall-induced Landslides,” *Catena (Amst)*., vol. 233, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.catena.2023.107475.
- [5] X. Kang, S. Wang, and Z. Yu, “Effects of Soil–Water Interaction on the Mechanical Behaviors of Shear-Zone Soils,” *International Journal of Geomechanics*, vol. 22, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002528.
- [6] A. Alihudien and P. Priyono, “Identification of Soil Types of Areas Near the Puger Coast Using the 1990 Robertson Soil Classification Chart,” vol. 08, no. 02, pp. 133–143, Dec. 2023, [Online]. Available: <http://ejurnal.unmuhjember.ac.id/index.php/HEXAGON>
- [7] S. Collico, M. Arroyo, M. Devincenzi, A. Rodriguez, and A. Deu, “Probabilistic Delineation of Soil Layers Using Soil Behavior Type Index,” in *Cone Penetration Testing 2022 - Proceedings of the 5th International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT 2022*, CRC Press/Balkema, 2022, pp. 332–338. doi: 10.1201/9781003308829-44.
- [8] S. Rauter and F. Tschuchnigg, “CPT Data Interpretation Employing Different Machine Learning Techniques,” *Geosciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 7, Jul. 2021, doi: 10.3390/geosciences11070265.
- [9] Y. Zhang, X. Ma, C. Ji, X. Zhang, W. Li, and M. Yang, “Case Study on Interpretation of Cone Penetration Tests in Sandy Soil Layers,” in *Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society*, CRC Press, 2024, pp. 2047–2051. doi: 10.1201/9781003431749-385.
- [10] B. J. Ramaiah, G. V. Ramana, M. Datta, and P. K. Robertson, “Geotechnical Characterization of Municipal Solid Waste Via Cone Penetration Testing – A Case Study from Landfills in Delhi, India,” *Waste Management*, vol. 200, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.wasman.2025.114750.
- [11] Y. X. Wang, G. Y. Du, T. Ma, Y. M. Xiong, and Y. Xiao, “Engineering Geological Classification of Gravelly Deposits Based on Enhanced CPT,” *Eng. Geol.*, vol. 364, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.enggeo.2026.108588.
- [12] O. Zinas, I. Papaioannou, R. Schneider, and P. Cuéllar, “Multivariate Gaussian Process Regression for 3D Site Characterization from CPT and Categorical Borehole Data,” *Eng. Geol.*, vol. 352, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.enggeo.2025.108052.
- [13] Irwiyanti, I. L. K. Wong, and I. Apriyani, “Pengaruh Penambahan Semen dan Variasi Serat Kelapa pada Tanah terhadap Uji Kuat Geser Langsung,” *Paulus Civil Engineering Journal (PCEJ)*, vol. 7, no. 2, Apr. 2025.
- [14] W. Ratmayanty, “Penambahan Serabut Kelapa pada Tanah terhadap Uji Kompaksi,” *Paulus Civil Engineering Journal (PCEJ)*, vol. 7, no. 3, Sep. 2025.
- [15] Z. Yang, X. Liu, L. Guo, Y. Cui, X. Su, and X. Ling, “Soil Classification and Site Variability Analysis Based on CPT—A Case Study in The Yellow River Subaquatic Delta, China,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 4, Apr. 2021, doi: 10.3390/jmse9040431.
- [16] H. Li, M. Duan, X. Yang, R. Wang, and Z. Ouyang, “Modified CPTU Parameters and SBTn Chart for Predicting Shear Behavior of Organic Soils at Large Strains,” *Eng. Geol.*, vol. 356, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.enggeo.2025.108273.
- [17] W. Liu and M. Ghafghazi, “Evaluation of State Parameter Interpretation Methods Using CPT Calibration Chamber Data,” *Geotechnical Research*, vol. 11, no. 4, pp. 226–242, Oct. 2024, doi: 10.1680/jgere.23.00072.
- [18] Braja M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*, 7th Edition. Stamford, USA: Cengage Learning, 2010.
- [19] P. K. Robertson and K. Cabal, “Cone Penetration Testing Guide,” Signal Hill, California, 2022. [Online]. Available: www.greggdrilling.com