

Karakterisasi Geoteknis dan Evaluasi Daya Dukung Fondasi pada Lokasi Pengembangan Kawasan Industri di Sulawesi Tenggara

Anafi Minmahddun¹, Laode Jonas Tugo^{2,*}

¹ Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo

² Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Halu Oleo

*) Email korespondensi: laodejonastugo@aho.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi geoteknis kawasan yang direncanakan sebagai lokasi pengembangan kawasan industri di Sulawesi Tenggara melalui karakterisasi tanah menggunakan Cone Penetration Test (CPT). Delapan titik uji diuji dengan alat berkapasitas 2,5 ton mengikuti ketentuan SNI 2827-2008. Hasil sondir menunjukkan bahwa tanah penyusun lokasi didominasi oleh lapisan Lempung Organik dengan kompresibilitas tinggi dan nilai tahanan konus (q_c) yang rendah, di mana tidak ditemukan lapisan tanah keras hingga kedalaman 20 meter. Klasifikasi Soil Behavior Type (SBT) mengonfirmasi dominasi Lempung Organik (SBT = 2), dengan pengecualian pada titik S-02 yang memperlihatkan karakteristik Lempung Lanauan (SBT = 3) pada kedalaman dangkal, sehingga memiliki kapasitas dukung yang relatif lebih tinggi. Analisis daya dukung pondasi dangkal menunjukkan bahwa sebagian besar titik pengujian tidak memenuhi kriteria kelayakan tanpa perbaikan tanah, dengan nilai daya dukung izin yang rendah. Sebaliknya, analisis pondasi dalam menunjukkan peningkatan kapasitas seiring bertambahnya diameter dan panjang tiang, meskipun keterbatasan tetap muncul pada titik dengan lapisan organik tebal. Temuan ini memperlihatkan adanya heterogenitas lateral yang signifikan sehingga diperlukan zonasi fondasi berbasis hasil CPT. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan dasar teknis bagi perencanaan fondasi yang aman dan ekonomis pada wilayah pesisir tropis dengan kondisi tanah lunak yang kompleks.

Kata kunci: Cone Penetration Test, daya dukung fondasi, tanah organik, karakterisasi geoteknis, kawasan industri.

Abstract

This study aims to evaluate the geotechnical conditions of an area designated for industrial estate development in Southeast Sulawesi through soil characterization using the Cone Penetration Test (CPT). Eight test locations were examined using a 2.5-ton capacity device in accordance with SNI 2827-2008. The CPT results indicate that the subsurface profile is predominantly composed of Organic Clay layers with high compressibility and low cone resistance (q_c), with no hard soil layer identified up to a depth of 20 meters. The Soil Behavior Type (SBT) classification confirms the dominance of Organic Clay (SBT = 2), with an exception at point S-02, which exhibits characteristics of Clayey Silt (SBT = 3) at shallow depths, thus indicating a relatively higher bearing capacity. The shallow foundation bearing capacity analysis shows that most test points do not meet feasibility criteria without ground improvement, as reflected by the low allowable bearing capacity values. Conversely, the deep foundation analysis demonstrates increasing capacity with larger pile diameters and lengths, although limitations persist at locations with thick organic layers. These findings highlight significant lateral heterogeneity, indicating the need for foundation zoning based on CPT results. Overall, this study provides a technical basis for safe and economical foundation planning in tropical coastal regions with complex soft soil conditions.

Keywords: Cone Penetration Test, foundation bearing capacity, organic soil, geotechnical characterization, industrial estate.

1. Pendahuluan

Pembangunan kawasan industri pada wilayah pesisir dan dataran aluvial, seperti di Sulawesi Tenggara, menghadapi tantangan geoteknis yang signifikan akibat dominasi tanah lunak dan tanah organik yang memiliki kompresibilitas tinggi serta kapasitas dukung rendah. Kondisi tanah seperti ini sering dikaitkan dengan risiko penurunan jangka panjang, penurunan diferensial, dan ketidakstabilan lokal apabila tidak ditangani melalui investigasi dan perencanaan fondasi yang memadai. Oleh karena itu, pemahaman yang akurat terkait kondisi bawah permukaan menjadi sangat penting dalam pengembangan infrastruktur berskala besar untuk menjamin keamanan struktural sekaligus efisiensi biaya konstruksi.

Dalam konteks karakterisasi tanah, penggunaan Cone Penetration Test (CPT) telah menjadi metode utama dalam rekayasa geoteknik modern, khususnya untuk menentukan Soil Behavior Type (SBT). Sistem SBT memberikan kerangka klasifikasi yang berfokus pada perilaku mekanis tanah in situ berdasarkan respons penetrasi konus, sehingga menawarkan pendekatan yang lebih representatif dibandingkan metode tradisional berbasis ukuran butir dan plastisitas. Sejumlah penelitian menunjukkan kemampuan prediktif yang kuat dari klasifikasi berbasis CPT terhadap batas-batas SBT, di mana nilai tahanan konus dan gesekan selubung berperan penting dalam mengidentifikasi karakteristik tanah [1], [2]. Keunggulan utama metode ini adalah kemampuannya untuk menggambarkan sifat mekanis tanah secara langsung dari pengukuran lapangan, menghindari potensi gangguan yang biasanya ditemukan pada sampel tanah laboratorium [3]. Salah satu parameter yang banyak digunakan adalah indeks tipe perilaku tanah, I_c , yang diperkenalkan oleh Robertson dan terbukti efektif dalam mengklasifikasikan perilaku tanah berdasarkan hasil CPT [4], [5].

Seiring perkembangan teknologi, metodologi interpretasi CPT terus berevolusi melalui integrasi pendekatan probabilistik seperti sistem Bayesian dan model-model statistik untuk stratifikasi tanah. Pendekatan modern ini memberikan kemampuan yang lebih baik dalam menangani kompleksitas dan ketidakpastian data geoteknik, sehingga meningkatkan ketepatan interpretasi kondisi bawah permukaan yang sangat penting dalam perencanaan infrastruktur [6]–[8].

Meskipun berbagai kemajuan tersebut telah dicapai, kesenjangan pengetahuan masih muncul pada lokasi dengan dominasi tanah organik dan tidak adanya lapisan keras hingga kedalaman yang lazim digunakan sebagai tumpuan pondasi. Kondisi demikian membutuhkan evaluasi geoteknik yang lebih rinci untuk memastikan akurasi pemilihan sistem pondasi serta mengidentifikasi kebutuhan perbaikan tanah agar risiko deformasi dapat diminimalkan.

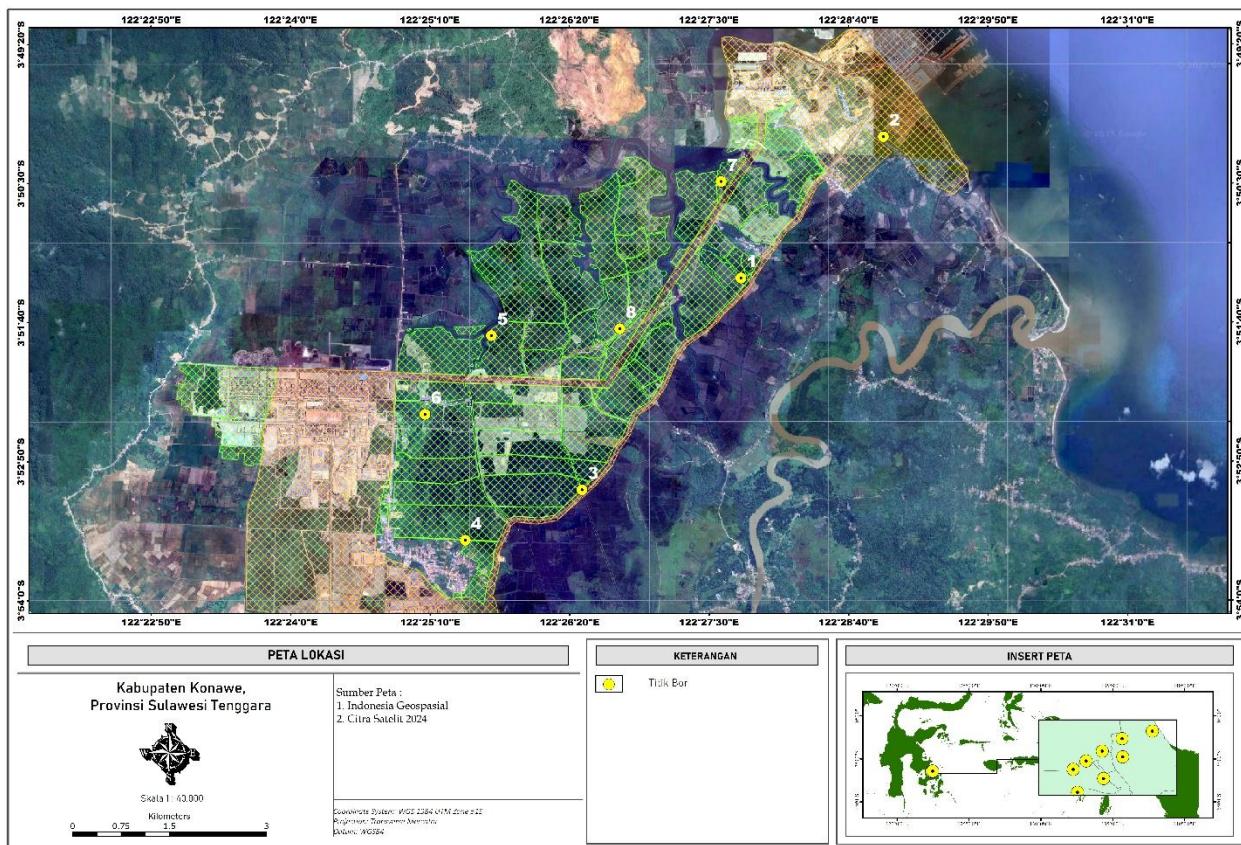
Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan karakterisasi tanah secara komprehensif menggunakan CPT/sondir serta melakukan klasifikasi kondisi tanah menggunakan sistem SBT Robertson. Selain itu, penelitian ini menganalisis kapasitas dukung izin pondasi dangkal dan kapasitas dukung aksial pondasi dalam pada delapan titik uji yang mewakili variasi kondisi tanah di lapangan.

Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar dalam merumuskan strategi desain fondasi berbasis zonasi, membantu pemilihan pondasi dangkal atau pondasi dalam yang tepat, serta mengidentifikasi area yang memerlukan perbaikan tanah. Selain itu, penelitian ini memberikan kontribusi empiris terkait perilaku tanah organik dan implikasinya terhadap daya dukung fondasi di lingkungan pesisir tropis, sehingga dapat menjadi rujukan bagi pengembangan pedoman desain yang lebih tepat untuk wilayah dengan karakteristik serupa.

2. Metode Penelitian

Studi ini dilakukan pada rencana pengembangan kawasan industri di Sulawesi Tenggara. Karakterisasi lahan dilakukan melalui pengujian Cone Penetration Test (CPT)/sondir yang mengacu pada SNI 2827:2008 [9]. Pengujian dilaksanakan pada delapan titik yang tersebar di area studi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Peralatan sondir yang digunakan memiliki kapasitas 2,5 ton dan dilengkapi dengan *Adhesion Jacket Cone* untuk meningkatkan akurasi pengukuran tahanan geser tanah. Adapun

spesifikasi alat penetrasi CPT meliputi luas konus sebesar 10 cm^2 , sudut puncak kerucut 60° , luas mantel atau selimut konus sebesar 150 cm^2 , serta luas piston penekan sebesar 10 cm^2 . Konfigurasi alat tersebut memastikan bahwa data karakteristik tanah yang diperoleh berada dalam tingkat ketelitian yang memadai untuk keperluan analisis daya dukung fondasi pada kawasan rencana pembangunan.



Gambar 1. Lokasi penyelidikan tanah

Dalam pelaksanaannya, penyondiran dilakukan hingga mencapai kedalaman permukaan tanah keras dengan indikasi yaitu pada saat nilai hambatan konus (*cone resistance*) $> 150 \text{ kg/cm}^2$, jika kedalaman sondir telah mencapai 20 meter dan lapisan tanah keras belum ditemukan, maka pekerjaan sondir dihentikan. Pembacaan *local Friction* (f_s) dilakukan pada setiap interval kedalam $0,2 \text{ m}$, begitu juga dengan hambatan konus.

Klasifikasi tanah dilakukan menggunakan hubungan antara nilai qc dan Fr yang diusulkan oleh Robertson [5]. Nilai qc dan Fr di plot pada grafik selanjutnya tanah diklasifikasikan menjadi sembilan jenis tipe tanah seperti yang terdapat pada Gambar 2.

Analisis daya dukung tanah yang dimaksud yakni analisis daya dukung tanah terhadap keruntuhan geser tanah menggunakan data hasil pengujian Sondir. Adapun metode analisis dan perhitungan daya dukung fondasi, akan dibahas secara spesifik sebagai berikut.

Berdasarkan profil geoteknis hasil penyelidikan sondir dan pertimbangan utilitas pondasi yang ada, maka pondasi bangunan dapat dipertimbangkan penggunaan pondasi dangkal (fondasi telapak/fondasi sumuran). Menurut Bowles [10], besarnya kapasitas daya dukung ijin netto dari pengujian SPT yakni sebagai berikut:

$$q_a = 20 \text{ N } K_d ; \text{ untuk lebar } B \leq 1,2 \text{ m} \quad (1)$$

$$q_a = 12,5 \text{ N } \left(\frac{B+0,3}{B} \right)^2 K_d ; \text{ untuk lebar } B > 1,2 \text{ m} \quad (2)$$

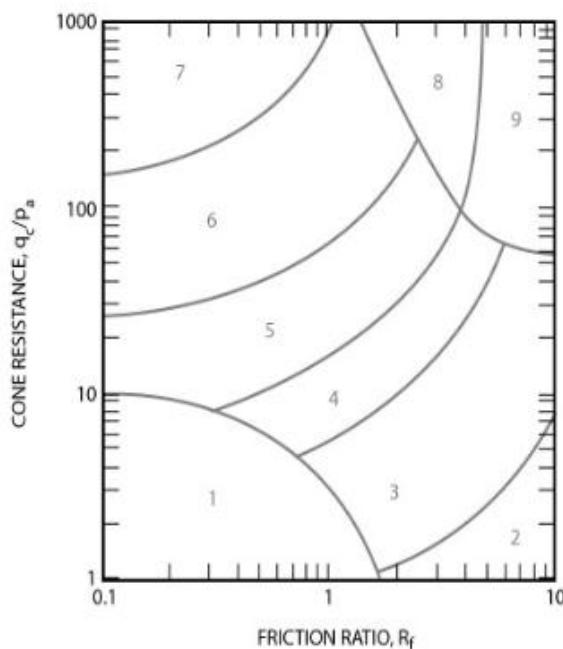
dengan,

- q_a = kapasitas dukung ijin netto untuk penurunan 1" (kN/m^2),
 K_d = $(1 + 0,33 D/B)$ = faktor kedalaman fondasi, dengan nilai maksimum $K_d = 1,33$,
 B = lebar fondasi (m),
 D = kedalaman fondasi (m),
 N = nilai *Standard Penetration Test* (SPT),

Untuk estimasi kapasitas daya dukung ijin netto dari pengujian sondir, dilakukan korelasi nilai SPT dan q_c , dimana hasil korelasi tersebut disubtitusikan pada Persamaan 1 dan 2. Pada perhitungan pondasi dangkal, nilai q_c Persamaan diatas merupakan q_c rata-rata dari 0 sampai dengan B yang dihitung dari dasar fondasi. Dengan mensubstitusi korelasi nilai q_c dan N ($q_c = 4N$ menurut Meyerhof [11]) serta konversi satuan dari kN/m^2 kedalam satuan kg/cm^2 , Persamaan daya dukung ijin netto untuk penurunan 2,54 cm (1") di atas (Persamaan 1 dan 2) menjadi :

$$q_a = \frac{q_c}{20} K_d (\text{kg}/\text{cm}^2) ; \text{ untuk } B \leq 1,2 \text{ m} \quad (3)$$

$$q_a = \frac{q_c}{33} \left(\frac{B+0,3}{B} \right)^2 K_d (\text{kg}/\text{cm}^2) ; \text{ untuk } B > 1,2 \text{ m} \quad (4)$$



Zona	Jenis Perilaku Tanah
1	Tanah halus yang sensitif
2	Tanah organik – lempung
3	Lempung – lempung lanauan hingga lempung
4	Campuran lanau – lanau berlempung hingga lempung lanauan
5	Campuran pasir – pasir lanauan hingga lanau berpasir
6	Pasir – pasir bersih hingga pasir lanauan
7	Pasir berkerikil hingga pasir padat
8	Pasir sangat kaku hingga pasir lempungan sangat kaku*
9	Tanah halus sangat kaku*

* Sangat terkonsolidasi atau tersemen

Gambar 2 Soil behaviour type (SBT) [12]

Perhitungan daya dukung fondasi dalam menggunakan persamaan deRuiter dan Beringen [13]. Daya dukung tekan tiang didefinisikan sebagai total tahanan ujung dan tahanan gesek tiang. Tahanan ujung tiang dihitung menggunakan Persamaan 5 dan 6, dimana nilai q_c merupakan nilai rata-rata 4D diatas dasar tiang sampai 8D dibawah dasar tiang.

$$f_b = 5 c_u ; \text{ maksimal } 150 \text{ kg}/\text{cm}^2 \quad (5)$$

$$c_u = \frac{q_c}{N_k} \quad (6)$$

dengan,

f_b = Tahanan ujung satuan

c_u = Kohesi *undrained*

N_k = Koefisien tak berdimensi (15-20)

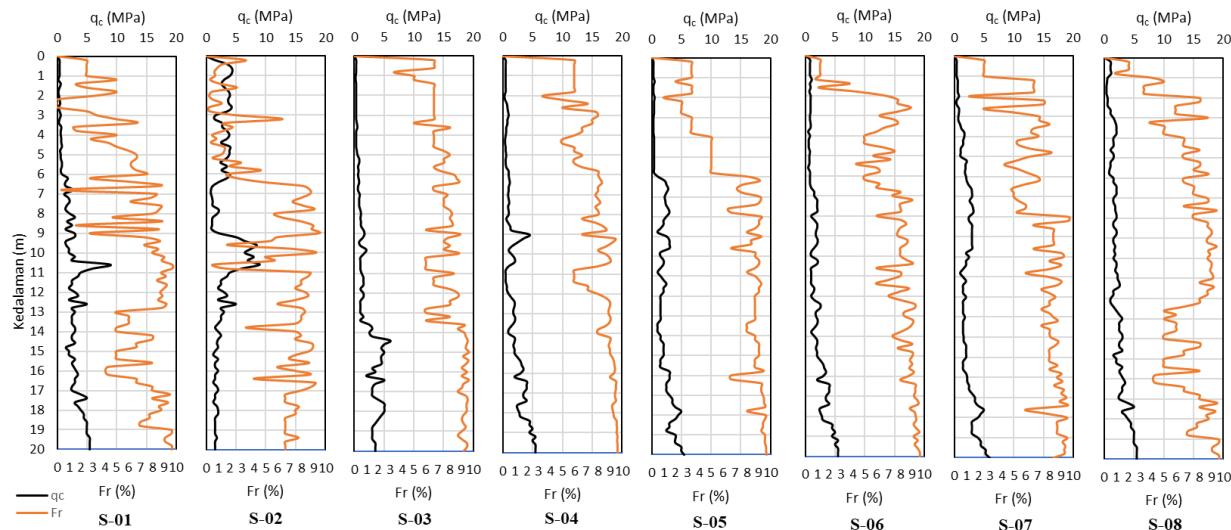
Tahanan gesek satuan tiang ditentukan dari nilai kohesi tak terdrainase yang dapat diperoleh dari Persamaan 6. Nilai f_s dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$f_s = \alpha c_u = 0,05 \alpha q_c \quad (7)$$

dengan, α adalah faktor adhesi (1 untuk NC dan 0,5 untuk OC); Tanah diasumsikan normally consolidated dengan asumsi dari Riwayat pembebangan tanah belum pernah mengalami pembebangan lebih dari tekanan overburden yang diterima. Asumsi ini dilakukan karena tidak ada uji konsolidasi.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian sondir (Gambar 3) hingga kedalaman 20 m menunjukkan bahwa kondisi tanah pada lokasi penelitian secara umum tidak mencapai nilai tahanan konus tinggi, karena tidak ditemukan nilai $q_c > 150 \text{ kg/cm}^2$ ($\approx 15 \text{ MPa}$) pada seluruh titik pengujian. Hal ini mengindikasikan bahwa lapisan tanah keras atau sangat padat yang biasanya digunakan sebagai tumpuan pondasi langsung tidak teridentifikasi hingga kedalaman tersebut. Profil q_c (garis hitam) memperlihatkan variasi yang relatif moderat, berada dalam kisaran yang dapat dikategorikan sebagai lempung kaku ($q_c > 1,5 \text{ MPa}$) hingga lempung keras ($q_c > 4 \text{ MPa}$) [14] pada beberapa segmen kedalaman, namun belum menunjukkan karakteristik tanah granular padat atau batuan lunak. Sementara itu, nilai Friction ratio (Fr, garis oranye) memperkuat kecenderungan bahwa tanah memiliki perilaku dominan kohesif.



Gambar 3. Hasil uji CPT

Interpretasi klasifikasi tanah berdasarkan *Soil Behavior Type* (SBT) menunjukkan bahwa seluruh titik pengujian hingga kedalaman 20 m dikategorikan sebagai Lempung Organik (SBT = 2), yang ditandai oleh kombinasi q_c rendah-sedang dan Fr relatif tinggi. Kondisi ini umumnya menggambarkan tanah yang memiliki kompresibilitas tinggi, modulus rendah, dan potensi penurunan yang signifikan. Satu pengecualian terdapat pada titik S-02, di mana pada kedalaman 0–6 m tanah diklasifikasikan sebagai Lempung Lanauan (SBT = 3), yang menunjukkan sifat sedikit lebih granular namun tetap tergolong tanah

berperilaku kohesif. Keberadaan tanah organik dalam zona yang cukup tebal pada sebagian besar titik mengindikasikan bahwa tanah di lokasi penelitian terbentuk dari lingkungan deposisi dengan kandungan material organik yang cukup tinggi, seperti rawa atau dataran aluvial jenuh. Hal ini terkonfirmasi dari sejarah lokasi studi yang sebelumnya merupakan daerah tambak sebelum berubah menjadi kawasan industry.

Meskipun nilai q_c pada sebagian zona mencapai kategori lempung keras, hal ini tidak serta-merta menyiratkan peningkatan kapasitas dukung yang signifikan, terutama karena sifat kohesif dan potensi kompresibilitas tanah organik tetap mempengaruhi deformasi jangka panjang. Lapisan-lapisan dengan $q_c > 4$ MPa memberi indikasi adanya peningkatan kekuatan material pada segmen kedalaman tertentu, namun lapisan tersebut tidak bersifat kontinu di seluruh titik dan tidak membentuk lapisan keras yang dapat diandalkan sebagai strata pendukung pondasi dangkal.

Karakteristik tanah yang didominasi oleh lempung organik (SBT = 2) memiliki implikasi signifikan terhadap desain konstruksi di lokasi penelitian. Tanah organik umumnya memiliki sifat kompresibilitas tinggi, kadar air tinggi, dan daya dukung rendah, serta sangat sensitif terhadap perubahan beban dan gangguan struktur [15]. Kondisi ini meningkatkan risiko terjadinya penurunan konsolidasi jangka panjang, penurunan diferensial, dan bahkan instabilitas lokal jika beban konstruksi tidak dikelola dengan baik.

Dengan tidak ditemukannya lapisan tanah keras hingga kedalaman 20 m, pondasi dangkal menjadi kurang direkomendasikan untuk struktur yang memiliki beban besar atau memerlukan kontrol penurunan yang ketat. Alternatif desain yang lebih tepat meliputi:

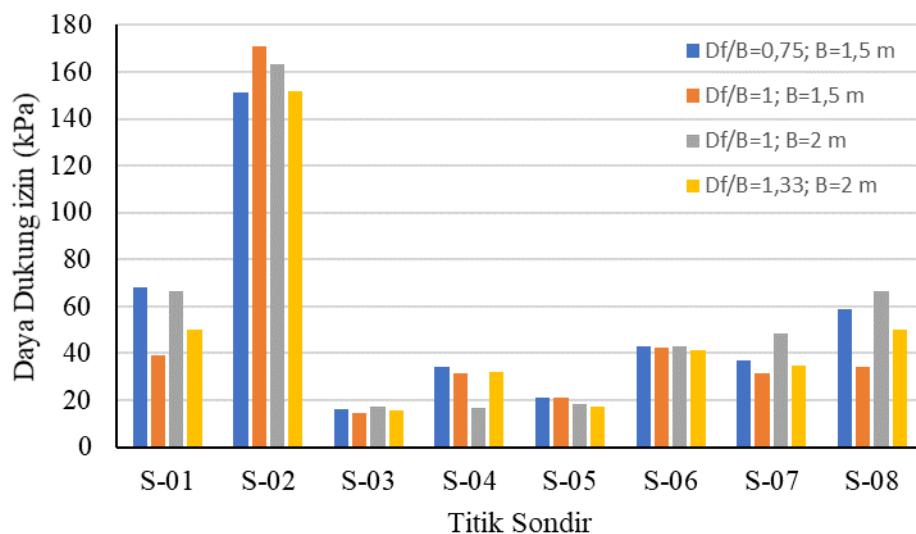
1. Pondasi dalam, seperti tiang bor atau tiang pancang, yang menyalurkan beban ke lapisan yang lebih padat di kedalaman lebih besar atau menggunakan daya dukung geser selimut pada tanah lempung keras lokal [16], [17].
2. Metode perbaikan tanah, seperti *preloading*, *deep soil mixing*, atau stabilisasi kapur-semen, terutama pada area dengan dominasi tanah organik tebal [18]–[20].

Dengan mempertimbangkan bahwa sebagian zona menunjukkan nilai q_c yang masuk kategori lempung keras meskipun tidak kontinu, pendekatan desain regional (*zoning*) dapat dilakukan dengan membagi area berdasarkan kekuatan tanah relatif, sehingga memungkinkan optimasi desain pondasi dan upaya perbaikan lokal hanya pada zona tertentu yang paling lemah, seperti area sekitar S-02.

Hasil perhitungan daya dukung izin (Gambar 4) untuk kombinasi lebar pondasi $B = 1,5\text{--}2,0$ m dan kedalaman pondasi $D = 1,5\text{--}2,0$ m menunjukkan variasi yang signifikan antar titik sondir. Secara ringkas, rentang nilai daya dukung izin pada kombinasi yang diuji adalah kira-kira 15–171 kPa dengan nilai rata-rata per kombinasi berkisar antara ≈49–55 kPa dan median yang berada di kisaran 32–46 kPa. Nilai minimum yang sangat rendah (≈15–17 kPa) tercatat pada beberapa titik (terutama S-03 dan S-04), sedangkan nilai maksimum yang relatif tinggi (≈151–171 kPa) konsisten terlihat pada titik S-02 untuk hampir semua konfigurasi pondasi. Perbedaan numerik ini mengindikasikan heterogenitas mekanika tanah secara lateral dan vertikal yang memiliki implikasi langsung terhadap pilihan sistem pondasi.

Interpretasi hasil daya dukung ini harus dibaca bersama hasil uji sondir (profil q_c dan Fr serta klasifikasi SBT) yang telah dijabarkan sebelumnya. Dari uji sondir tercatat bahwa sebagian besar lokasi diklasifikasikan sebagai Lempung Organik (SBT = 2) sampai kedalaman 20 m, kecuali S-02 yang pada kedalaman 0–6 m diklasifikasikan sebagai Lempung Lanauan (SBT = 3). Kecenderungan nilai q_c yang umumnya tidak melebihi ambang lapisan keras (tidak ada $q_c > 150 \text{ kg/cm}^2$ pada kedalaman hingga 20 m) dan dominasi SBT = 2 menjelaskan mengapa banyak titik menunjukkan daya dukung izin relatif rendah. Tanah organik bersifat kompresibel dan memiliki modulus rendah sehingga kapasitas dukung izin jangka pendek dan jangka panjang menjadi terbatas, hal yang tercermin pada banyak nilai daya dukung izin di bawah ≈50 kPa pada berbagai konfigurasi pondasi.

Korelasi khusus antara kedua set data memperlihatkan beberapa poin penting: pertama, titik S-02 menunjukkan nilai daya dukung izin yang jauh lebih tinggi dibanding titik-titik lain (151–171 kPa tergantung kombinasi B–D). Hal ini konsisten dengan klasifikasi SBT = 3 pada kedalaman 0–6 m (campuran lebih granul/lanau), yang kemungkinan menghasilkan lapisan permukaan lebih kaku dan kurang kompresibel dibanding lempung organik. Dengan kata lain, S-02 mempunyai kondisi lapisan dangkal yang relatif lebih menguntungkan untuk pondasi dangkal, sehingga daya dukung izin meningkat secara substansial untuk konfigurasi pondasi dangkal yang diuji. Kedua, titik-titik seperti S-03 dan S-04 menunjukkan nilai daya dukung izin yang sangat rendah (\approx 15–17 kPa pada beberapa konfigurasi), dan ini selaras dengan profil qc yang rendah dan nilai Fr yang meningkatkan indikasi keberadaan lapisan lempung lunak/organik. Ketiga, perubahan kecil pada kedalaman dan lebar pondasi (perubahan antara D = 1,5 m dan 2,0 m serta B = 1,5 m dan 2,0 m) hanya memberikan variasi moderat pada nilai izin; hal ini menandakan bahwa perilaku tanah pada zona yang dominan lempung organik mengontrol kapasitas jauh lebih kuat daripada variasi geometri pondasi kecil.



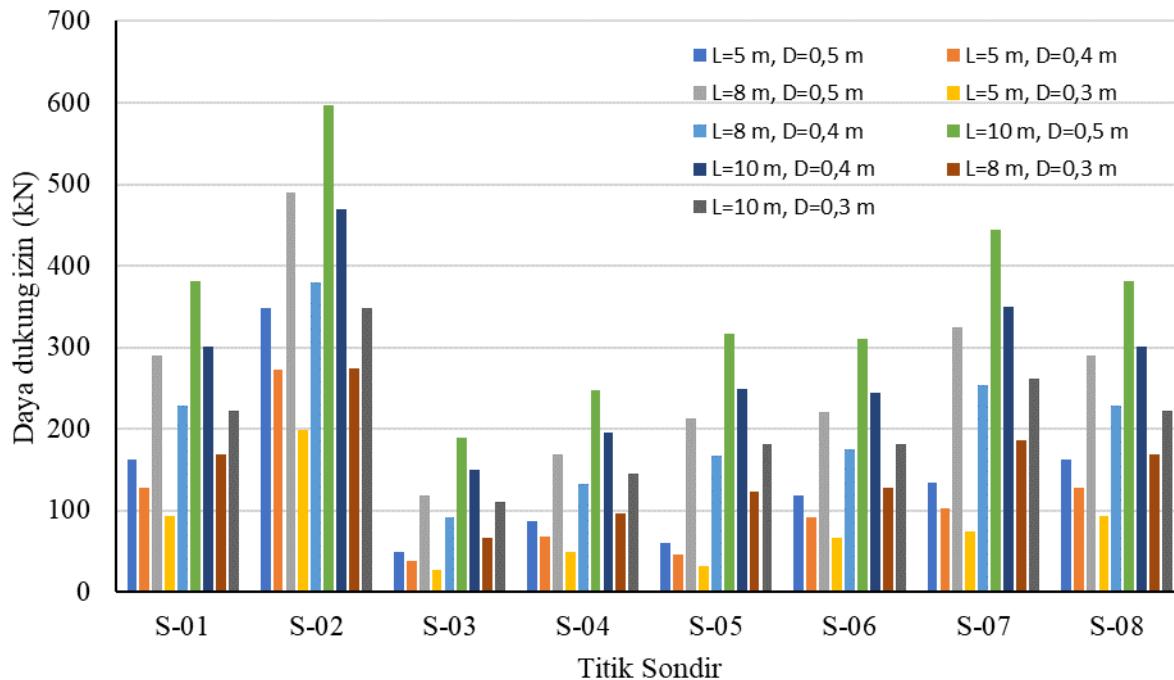
Gambar 4. Hasil analisis daya dukung fondasi dangkal

Dari perspektif desain teknis, temuan tersebut menyiratkan beberapa implikasi praktis. Area-area yang menunjukkan daya dukung izin tinggi (mis. S-02) dapat dipertimbangkan untuk penerapan pondasi dangkal pada struktur ringan sampai sedang, walaupun tetap diperlukan analisis penurunan (*settlement*) jangka panjang karena bahkan lapisan yang relatif kaku di permukaan dapat diikuti oleh lapisan organik tebal yang menghasilkan konsolidasi sekunder. Sebaliknya, area-area dengan nilai izin rendah (mis. S-03, S-04 dan beberapa lokasi lain dengan izin $<$ 25–30 kPa) tidak layak untuk mendukung beban struktur konvensional dengan pondasi dangkal tanpa perbaikan tanah atau penggunaan sistem pondasi alternatif.

Selain itu, karena nilai qc pada beberapa segmen masuk kategori lempung kaku ($qc > 1,5$ MPa) atau bahkan lempung keras ($qc > 4$ MPa) tetapi tidak kontinu secara lateral, strategi desain yang berbasis zoning menjadi penting: area-area dengan daya dukung izin relatif baik dapat direncanakan untuk beban lebih besar, sedangkan area dengan daya dukung rendah harus mendapatkan perlakuan perbaikan atau dihindari untuk penempatan elemen struktur berat.

Hasil analisis daya dukung aksial (Gambar 5) menunjukkan variasi kapasitas yang besar antar titik sondir dan sangat dipengaruhi oleh geometri tiang (panjang L dan diameter D). Untuk diameter 50 cm dan panjang 5 m, kapasitas izin aksial berkisar dari sekitar 50 kN (S-03) hingga 348 kN (S-02); peningkatan panjang tiang ke 8 m dan 10 m pada diameter yang sama meningkatkan kapasitas menjadi kisaran 118–

490 kN dan 190–596 kN berturut-turut. Perbandingan antar kombinasi geometri memperlihatkan pola yang konsisten: baik peningkatan panjang maupun diameter tiang secara signifikan meningkatkan daya dukung izin, namun peningkatan tersebut tidak mengeliminasi variasi antar titik, misalnya S-02 tetap menunjukkan kapasitas tertinggi pada hampir semua kombinasi, sedangkan S-03 dan S-04 cenderung menunjukkan kapasitas paling rendah walaupun geometri diubah.



Gambar 5. Hasil Analisis daya dukung fondasi dalam

Korelasi antara hasil kapasitas tiang dengan hasil uji sondir memperkuat interpretasi geoteknik. Titik S-02, yang pada uji sondir menunjukkan klasifikasi SBT = 3 (lempung lanauan pada 0–6 m) dan qc relatif lebih tinggi dibanding titik lainnya, konsisten memberikan nilai daya dukung aksial tertinggi di hampir semua konfigurasi tiang. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi lapisan dangkal di S-02 bersifat lebih kaku/lebih mampu menahan beban, sehingga bahkan tiang pendek atau dengan diameter sedang dapat menghasilkan kapasitas yang memadai. Sebaliknya, titik S-03 dan S-04 yang pada profil qc menunjukkan nilai rendah dan Fr yang mengindikasikan lapisan kohesif lunak/organik, menghasilkan kapasitas tiang yang rendah pada semua kombinasi L–D; ini mengindikasikan bahwa pada lokasi-lokasi tersebut tanah dasar tidak menyediakan *friction* maupun *end bearing* yang cukup.

Implikasi praktis bagi desain fondasi tiang yang dapat ditarik dari data ini adalah sebagai berikut. Pertama, lokasi S-02 dapat dipertimbangkan untuk penggunaan tiang pendek (mis. L = 5–8 m) atau tiang diameter sedang untuk struktur ringan sampai menengah karena kapasitas izin yang relatif besar; meskipun demikian, analisis penurunan jangka panjang tetap perlu dilakukan karena kemungkinan adanya lapisan organik lebih dalam. Kedua, lokasi S-03 dan S-04 membutuhkan perhatian khusus: meskipun peningkatan panjang/diameter meningkatkan kapasitas, bahkan pada kombinasi L = 10 m dan D = 50 cm kapasitas masih berada pada nilai moderat (mis. \approx 190–248 kN), sehingga untuk beban struktur yang lebih besar perlu dipertimbangkan tiang yang lebih panjang, diameter lebih besar, atau sistem pondasi alternatif (mis. tiang bor dengan ujung yang mencapai lapisan lebih kaku, atau tiang pancang yang dapat menembus lapisan lunak). Ketiga, variasi lateral yang nyata mensyaratkan pendekatan zonasi karena tidak semua lokasi dapat dilayani dengan satu solusi fondasi homogen; desain sebaiknya menempatkan elemen

struktur berat pada zona dengan kapasitas tinggi (S-02, S-07, S-01/S-08 pada beberapa konfigurasi) dan menerapkan perbaikan di zona lemah (S-03, S-04).

4. Kesimpulan

Hasil studi ini menunjukkan bahwa kondisi geoteknis pada daerah studi didominasi oleh tanah organik dengan kompresibilitas tinggi dan kapasitas dukung rendah, sebagaimana teridentifikasi melalui uji CPT/sondir pada delapan titik pengujian. Seluruh titik menunjukkan tidak adanya lapisan tanah keras hingga kedalaman 20 m, ditandai oleh nilai q_c yang tidak pernah melampaui 150 kg/cm^2 , sehingga lapisan yang biasanya digunakan sebagai tumpuan pondasi langsung tidak ditemukan. Klasifikasi tanah berdasarkan Soil Behavior Type (SBT) mengindikasikan dominasi Lempung Organik (SBT = 2) pada sebagian besar titik, dengan satu area (S-02) menunjukkan karakteristik Lempung Lanauan (SBT = 3) pada kedalaman dangkal, yang berkontribusi terhadap nilai daya dukung yang relatif lebih tinggi pada lokasi tersebut.

Analisis daya dukung pondasi dangkal memperlihatkan bahwa nilai izin bervariasi signifikan antartitik, dengan banyak lokasi menunjukkan kapasitas rendah ($< 50 \text{ kPa}$), sehingga pondasi dangkal dinilai kurang layak diterapkan tanpa perbaikan tanah. Sementara itu, analisis daya dukung pondasi dalam menunjukkan bahwa peningkatan diameter dan panjang tiang efektif meningkatkan kapasitas, namun kondisi tanah organik pada titik-titik lemah (terutama S-03 dan S-04) tetap membatasi daya dukung tiang, sehingga diperlukan panjang atau diameter tiang yang lebih besar atau penggunaan metode perbaikan tanah. Perbandingan antara hasil CPT dan kapasitas fondasi menegaskan bahwa heterogenitas lateral sangat berpengaruh terhadap performa fondasi.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan pentingnya karakterisasi geoteknis berbasis CPT untuk pengembangan zonasi fondasi pada wilayah pesisir dengan tanah organik tebal. Temuan ini memberikan dasar kuat untuk pemilihan strategi fondasi yang lebih adaptif, termasuk penggunaan pondasi dalam pada area lemah serta penggunaan pondasi dangkal hanya pada zona yang menunjukkan kapasitas lebih tinggi seperti di S-02. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat berkontribusi pada perencanaan konstruksi yang lebih aman, ekonomis, dan sesuai dengan kondisi bawah permukaan kawasan industri di wilayah pesisir tropis.

5. Daftar Pustaka

- [1] R. L. Boggess and P. K. Robertson, "CPT for Soft Sediments and Deepwater Investigations," 2011, doi: 10.4043/21244-ms.
- [2] R. Yuliet, M. Mera, and K. Hidayat, "Soil Classification at Muaro Baru Beach of Padang City Using CPT Data," *E3s Web Conf.*, vol. 331, p. 3005, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202133103005.
- [3] C. H. Juang, Y. Ge, and J. Zhang, "Geological Uncertainty: A Missing Element in Geotechnical Reliability Analysis," pp. 1–12, 2019, doi: 10.3850/978-981-11-2725-0-wt-cd.
- [4] C. S. Ku, C. H. Juang, and C.-Y. Ou, "Reliability of CPT $\langle i\rangle I\langle /I\rangle c\langle /Sub\rangle$ as an Index for Mechanical Behaviour Classification of Soils," *Géotechnique*, vol. 60, no. 11, pp. 861–875, 2010, doi: 10.1680/geot.09.p.097.
- [5] P. K. Robertson, "Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system — an update," *Can. Geotech. J.*, vol. 53, no. 12, pp. 1910–1927, Dec. 2016, doi: 10.1139/cgj-2016-0044.
- [6] M. S. Farhadi and T. Länsivaara, "Development of an Integrated Game Theory-Optimization Subground Stratification Model Using Cone Penetration Test (CPT) Measurements," *Eng. Comput.*, vol. 38, no. S2, pp. 1227–1242, 2021, doi: 10.1007/s00366-020-01243-0.
- [7] Y. Wang, Y. Hu, and T. Zhao, "Cone Penetration Test (CPT)-based Subsurface Soil Classification

- and Zonation in Two-Dimensional Vertical Cross Section Using Bayesian Compressive Sampling,” *Can. Geotech. J.*, vol. 57, no. 7, pp. 947–958, 2020, doi: 10.1139/cgj-2019-0131.
- [8] Y. Wang, K. Huang, and Z.-J. Cao, “Probabilistic Identification of Underground Soil Stratification Using Cone Penetration Tests,” *Can. Geotech. J.*, vol. 50, no. 7, pp. 766–776, 2013, doi: 10.1139/cgj-2013-0004.
- [9] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 2827: 2008 Cara Uji Penetrasi Lapangan dengan Alat Sondir*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2008.
- [10] J. E. Bowles, *Foundation Analysis and Design*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [11] H. C. Hardiyatmo, *Analisis dan Perancangan Fondasi I*, 3rd ed. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2014.
- [12] P. K. Robertson and K. Cabal, *Guide to Cone Penetration Testing*, 7th ed. Signal Hill, 2022.
- [13] H. C. Hardiyatmo, *Analisis dan Perancangan Fondasi II*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2015.
- [14] B. G. Look, *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. London: CRC Press, 2017. doi: 10.1201/b16520.
- [15] A. Desiani, “Kajian Pengaruh Materi Organik pada Sifat Fisis Tanah Lunak,” *J. Tek. Sipil*, vol. 13, no. 1, pp. 21–48, 2017, doi: <https://doi.org/10.28932/jts.v13i1.1427>.
- [16] L. Fitriyana and E. M. Satrio, “ANALISA KONFIGURASI TIANG GRUP TERHADAP DAYA DUKUNG DAN PENURUNAN PONDASI TIANG PANCANG PADA TANAH LUNAK,” *J. Tek. Silitek*, vol. 3, no. 2, pp. 91–98, 2023, doi: <https://doi.org/10.51135/jts.v3i02.103>.
- [17] N. H. Crista, T. Widorini, and B. Purnijant, “ANALISIS PERBANDINGAN DAYA DUKUNG PONDASI TIANG PANCANG PADA TANAH LUNAK DENGAN METODE MANUAL DAN ELEMEN HINGGA SAP 2000,” *J. Ilm. Teknosains*, vol. 7, no. 2, pp. 82–87, 2021.
- [18] A. Y. Al Harits, “PERBANDINGAN METODE PRELOADING DENGAN VAKUM KONSOLIDASI TANAH PADA PEMODELAN DI LABORATORIUM,” *Prokons*, vol. 15, no. 1, pp. 57–66, 2021.
- [19] M. K. Alhamdi and B. S. Albusoda, “A Review on Deep mixing method for soil improvement,” in *The Fifth Scientific Conference for Engineering and Postgraduate Research (PEC 2020)*, 2020, pp. 1–27. doi: 10.1088/1757-899X/1105/1/012110.
- [20] A. S. A. Al-gharbawi, A. M. Najemalden, and M. Y. Fattah, “Expansive Soil Stabilization with Lime , Cement , and Silica Fume,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–15, 2023.