E-ISSN: 3031-8629
P-ISSN: 3032-3258
Halaman 1030-1044
Volume 3 Nomor 4 Tahun 2026

Analisis Daya Dukung Pondasi Tiang Berdasarkan Data *Standard Penetration Test* (SPT) Pada Proyek Dermaga Di Pulau Tunda

Muhammad Hassan[1], Raka Surya Pradana[2], Riski Wahyudi[3], Muhammad Nur Ikhsan[4], Januari Yanto[5]
[1,2,3,4,5]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Tangerang Raya
e-mail: muhammadhassan8197@gmail.com, raka.suryapradana@untara.ac.id, riskiwahyudi@untara.ac.id , m.nurikhsan@untara.ac.id, januari.yanto@untara.ac.id

Abstrak

Pembangunan infrastruktur dermaga di kawasan kepulauan seperti Pulau Tunda menghadapi tantangan geoteknik yang kompleks, terutama terkait keberadaan lapisan tanah lunak aluvial di permukaan serta perlunya penetapan kedalaman pondasi tiang yang aman hingga mencapai tanah keras. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis daya dukung aksial ijin pondasi tiang pancang tunggal dan kelompok berdasarkan data *Standard Penetration Test* (SPT) menggunakan metode Meyerhof dan Aoki-De Alencar, mengevaluasi efisiensi kelompok tiang, serta menentukan penurunan elastis pondasi pada proyek dermaga Pulau Tunda. Data sekunder berupa log pemboran teknik dan nilai N-SPT dari beberapa borehole digunakan sebagai acuan perhitungan teknis. Hasil investigasi geoteknik menunjukkan profil tanah terdiri dari aluvial lunak/pasir renggang pada kedalaman 0–12 meter, meningkat ke tingkat sedang pada kedalaman 12–28 meter, dan mencapai tanah keras (N-SPT > 50) pada kedalaman 32–40 meter. Hasil analisis daya dukung ijin tiang tunggal berdiameter 0,60 m pada kedalaman penetrasi 36 meter menunjukkan nilai daya dukung ijin aksial (Qijin) sebesar 1845,6 kN berdasarkan metode Meyerhof dan 1720,4 kN berdasarkan metode Aoki-De Alencar dengan faktor keamanan SF = 3. Evaluasi efisiensi kelompok tiang dengan konfigurasi 3x3 menghasilkan efisiensi sebesar 0,78 (Converse-Labarre), sehingga daya dukung kelompok tiang mencapai 12956,1 kN. Perhitungan penurunan elastis menunjukkan nilai total penurunan sebesar

18,4 mm, yang memenuhi syarat batas toleransi maksimum penurunan dermaga (< 25 mm). Hasil ini dikonfirmasi sejalan dengan temuan pendukung mengenai analisis geoteknik terapan pada proyek infrastruktur pesisir dan lereng.

Kata kunci: *Daya Dukung Pondasi, Pondasi Tiang Pancang, Standard Penetration Test (SPT), Dermaga Pulau Tunda, Efisiensi Kelompok Tiang, Penurunan Elastis.*

Abstract

Pier infrastructure development in island areas such as Tunda Island faces complex geotechnical challenges, particularly the presence of soft alluvial soil layers near the surface and the need to determine a safe pile foundation depth until hard soil is reached. This study aimed to analyze the allowable axial bearing capacity of single and group driven piles based on *Standard Penetration Test* (SPT) data using the Meyerhof and Aoki-De Alencar methods, evaluate pile group efficiency, and determine elastic settlement for the Tunda Island pier project. Secondary data consisting of engineering borehole logs and N-SPT values from several boreholes were used as the basis for the technical calculations. The geotechnical investigation showed that the soil profile consisted of soft alluvial/loose sand at depths of 0–12 m, increased to medium conditions at depths of 12–28 m, and reached hard soil with N-SPT > 50 at depths of 32–40 m. The analysis of a single pile with a diameter of 0.60 m and a penetration depth of 36 m produced allowable axial bearing capacities of 1845.6 kN using the Meyerhof method and 1720.4 kN using the Aoki-De Alencar method with a safety factor of 3. A 3×3 pile group produced an efficiency of 0.78 using the Converse-Labarre method, resulting in a group allowable capacity of 12956.1 kN. The calculated total elastic settlement was 18.4 mm, which satisfied the pier settlement tolerance of less than 25 mm. These results are consistent with supporting findings on applied geotechnical analysis for coastal and slope infrastructure projects.

Keywords : *Bearing Capacity, Pile Foundation, Standard Penetration Test (SPT), Tunda Island Pier, Pile Group Efficiency, Elastic Settlement.*

LATAR BELAKANG

Pembangunan infrastruktur transportasi laut seperti dermaga memiliki peranan yang sangat krusial dalam mendukung konektivitas antarpulau, pertumbuhan ekonomi, dan distribusi logistik di wilayah kepulauan Indonesia . Pulau Tunda, yang terletak di kawasan pesisir Provinsi Banten, merupakan salah satu wilayah strategis yang mengalami peningkatan kebutuhan infrastruktur maritim untuk menunjang sektor pariwisata resort dan perikanan . Konstruksi dermaga membutuhkan perencanaan struktur bawah (substructure) yang sangat andal karena beban yang bekerja tidak hanya berasal dari beban mati struktur vertikal dan beban hidup kendaraan/operasional, tetapi juga beban lateral aksial akibat gaya benturan kapal (berthing force), gaya tambat (mooring force), serta pengaruh gelombang pasang surut air laut .

Kondisi geoteknik di lingkungan pesisir Pulau Tunda secara umum didominasi oleh endapan aluvial laut (coastal alluvial deposits) yang ditandai dengan keberadaan lapisan lempung lunak (soft clay) dan lanau pasiran berbutir halus dengan konsistensi sangat rendah di lapisan permukaan hingga kedalaman sedang . Kondisi tanah lunak ini memiliki nilai daya dukung alamiah yang sangat rendah dan potensi penurunan (settlement) yang relatif besar jika dibebani secara langsung. Oleh karena itu, penggunaan sistem pondasi dalam (deep foundation), khususnya pondasi tiang pancang beton bertulang (reinforced concrete driven pile) atau tiang pipa baja (steel pipe pile), merupakan pilihan teknis yang wajib diterapkan untuk meneruskan beban struktur dermaga ke lapisan tanah keras (bearing stratum) yang berada pada kedalaman yang cukup dalam .

Dalam penentuan kapasitas daya dukung pondasi tiang, investigasi geoteknik lapangan menggunakan metode *Standard Penetration Test* (SPT) merupakan salah satu acuan empiris yang paling sering dan andal diterapkan di Indonesia . Nilai perlawanan penetrasi N-SPT memberikan gambaran langsung mengenai tingkat kepadatan relatif tanah berbutir kasar serta konsistensi tanah berbutir halus pada setiap interval kedalaman . Evaluasi terhadap kapasitas daya dukung tiang tunggal maupun kelompok berdasarkan data N-SPT sangat vital untuk memastikan struktur dermaga berada dalam batas keamanan yang diizinkan serta mencegah terjadinya kegagalan struktural maupun geoteknik selama masa layani .

Tingginya variabilitas stratigrafi tanah pesisir dengan ditemukannya lapisan endapan aluvial lunak yang cukup tebal pada kedalaman 0 hingga 20 meter, sehingga berpotensi menyebabkan ketidakmampuan pondasi dangkal dalam menahan beban dermaga. Perlu ditetapkannya estimasi kedalaman penetrasi tiang pancang yang optimal untuk mencapai tanah keras (N-SPT > 50) agar daya dukung tiang memenuhi standar keamanan teknis. Adanya potensi penurunan kapasitas daya dukung akibat interaksi antar-tiang dalam suatu kelompok tiang (group pile effectiveness) yang dikontrol oleh jarak antar tiang (spacing). Perlu diterapkannya metode formulasi empiris yang teruji, seperti metode Meyerhof (1976) dan Aoki-De Alencar (1975), untuk membandingkan kapasitas ijin aksial tiang secara komparatif dan presisi .

Analisis daya dukung pondasi difokuskan pada daya dukung aksial tekan ijin (allowable axial compressive capacity) tiang tunggal dan kelompok tiang berdasarkan data N-SPT dari pengeboran borehole proyek dermaga Pulau Tunda. Jenis pondasi yang dianalisis adalah tiang pancang beton pracetak berbentuk lingkaran (precast circular concrete pile) dengan variasi diameter 0,50 m dan 0,60 m. Metode perhitungan daya dukung yang diterapkan membandingkan formulasi Meyerhof (1976) dan Aoki & De Alencar (1975). Perhitungan efisiensi kelompok tiang menggunakan persamaan Converse-Labarre. Analisis penurunan membatasi pada perhitungan penurunan elastis tiang tunggal dan kelompok tiang akibat beban aksial kerja rencana .

Menganalisis stratigrafi dan profil karakteristik teknis tanah bawah permukaan di lokasi rencana dermaga Pulau Tunda berdasarkan data log borehole N-SPT. Menghitung kapasitas daya dukung ultimit dan ijin aksial tiang pancang tunggal berdasarkan metode Meyerhof dan Aoki-De Alencar pada berbagai variasi kedalaman. Mengevaluasi besarnya efisiensi dan daya dukung ijin kelompok tiang (pile group) dengan variasi jumlah dan konfigurasi tiang. Menghitung estimasi besarnya penurunan elastis (elastic settlement) pondasi tiang kelompok dan membandingkannya dengan standar ambang batas penurunan ijin struktur dermaga .

Klasifikasi Tanah Pesisir dan Aluvial.

Tanah di daerah pesisir pantai dan pulau-pulau kecil pada umumnya terbentuk dari proses pengendapan sedimen aluvial dan marin . Berdasarkan sistem klasifikasi tanah

USCS (Unified Soil Classification System), tanah aluvial pesisir seringkali tergolong dalam kelompok tanah berbutir halus seperti lempung anorganik dengan plastisitas tinggi (CH), lempung anorganik plastisitas rendah (CL), serta lanau anorganik (ML) . Karakteristik utama dari endapan aluvial ini adalah kompresibilitas yang tinggi, permeabilitas yang relatif rendah, dan kuat geser yang sangat dipengaruhi oleh kadar air serta riwayat konsolidasi .

Kondisi tanah residual dan aluvial pada wilayah tropis memiliki perubahan sifat geoteknik yang signifikan terhadap kedalaman (Nawan et al., 2026). Perubahan kadar air akibat siklus pasang surut dan infiltrasi air laut memengaruhi tekanan air pori dan tegangan efektif tanah, yang pada akhirnya menurunkan kuat geser tanah (Nawan et al., 2026).

Pengujian *Standard Penetration Test* (SPT) diatur dalam SNI 4153:2008 yang dilakukan dengan menjatuhkan palu seberat 63,5 kg dari ketinggian 76 cm ke atas stang bor. Jumlah pukulan yang dibutuhkan untuk penetrasi sejauh 30 cm terakhir dicatat sebagai nilai N-SPT . Korelasi empiris antara nilai N-SPT dengan konsistensi tanah kohesif dan kepadatan tanah non-kohesif disajikan pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 berikut :

Tabel 1. Hubungan Nilai N-SPT dengan Konsistensi Tanah Kohesif

Nilai N-SPT (pukulan/ft)	Konsistensi Tanah	Kuat Tekan Bebas qu (kPa)
< 2	Sangat Lunak (Very Soft)	< 25
2 – 4	Lunak (Soft)	25 – 50
4 – 8	Sedang (Medium Stiff)	50 – 100
8 – 15	Kaku (Stiff)	100 – 200
15 – 30	Sangat Kaku (Very Stiff)	200 – 400
> 30	Keras (Hard)	> 400

Tabel 2. Hubungan Nilai N-SPT dengan Kepadatan Relatif Tanah Non-Kohesif

Nilai N-SPT (pukulan/ft)	Kepadatan Relatif (Relative Density)	Sudut Geser Dalam ϕ (°)
0 – 4	Sangat Renggang (Very Loose)	< 28
4 – 10	Renggang (Loose)	28 – 30
10 – 30	Agak Padat (Medium Dense)	30 – 36

30 – 50	Padat (Dense)	36 – 41
> 50	Sangat Padat (Very Dense)	> 41

Kapasitas Daya Dukung Aksial Tiang Tunggal.

Kapasitas daya dukung ultimit total aksial tiang tunggal (Qult) terdiri dari kombinasi antara tahanan ujung nominal (Qb) dan tahanan gesek selimut tiang (Qs) :

$$\boldsymbol{Qult = Qb + Qs = qb \cdot Ab + \sum(fs \cdot As)}$$

Di mana Ab adalah luas penampang ujung tiang, qb adalah tahanan ujung per satuan luas, fs adalah tahanan gesek selimut per satuan luas, dan As adalah luas selimut tiang pada setiap lapisan tanah . Daya dukung ijin tiang (Qijin) diperoleh dengan membagi kapasitas ultimit dengan faktor keamanan (Safety Factor / SF) sesuai standar geoteknik SNI 8460:2017 :

$$\boldsymbol{Qijin = Qult / SF}$$

Meyerhof mengemukakan hubungan langsung antara nilai N-SPT dengan tahanan ujung dan tahanan selimut tiang pancang . Tahanan ujung spesifik (qb) untuk tiang pancang yang masuk ke dalam lapisan tanah non-kohesif/pasir dirumuskan sebagai:

$$\boldsymbol{qb = 40 \cdot Nb \cdot (L / D) \leq 400 \cdot Nb \ (kPa)}$$

Di mana Nb adalah nilai N-SPT rata-rata di sekitar ujung tiang (4D di bawah ujung hingga 8D di atas ujung tiang), L adalah panjang penetrasi tiang, dan D adalah diameter tiang . Untuk tahanan gesek selimut (fs) pada tiang pancang:

$$\boldsymbol{fs = 2 \cdot Nrata \ (kPa) \ [Tanah\ Pasir]}$$
$$\boldsymbol{fs = 1.6 \cdot Nrata \ (kPa) \ [Tanah\ Lempung]}$$

Metode Aoki dan De Alencar (1975).

Metode Aoki dan De Alencar memanfaatkan nilai perlawanan SPT yang dikorelasikan dengan faktor jenis tanah (K) dan koefisien rasio α . Tahanan ujung dan selimut dihitung dengan persamaan:

$$\boldsymbol{qb = (K \cdot Nb) / F1}$$
$$\boldsymbol{fs = (\alpha \cdot K \cdot Nrata) / F2}$$

Di mana F1 dan F2 adalah faktor koreksi tipe tiang. Untuk tiang pancang beton pracetak, nilai F1 = 1,75 dan F2 = 3,50 . Parameter K untuk tanah pasir adalah 0,60 MPa dan lempung adalah 0,20 MPa, sedangkan nilai α berkisar antara 1,4% hingga 3,5% .

Pada struktur dermaga, tiang tidak dipasang secara tunggal melainkan dalam bentuk kelompok tiang (pile group) yang dihubungkan oleh kepala tiang (pile cap) . Berinteraksinya zona tegangan antar-tiang berdampak pada penurunan efisiensi kelompok (Eg). Persamaan Converse-Labarre merumuskan efisiensi kelompok tiang sebagai :

$$\boldsymbol{Eg = 1 - \theta \cdot [((n-1) \cdot m + (m-1) \cdot n) / (90 \cdot m \cdot n)]}$$

Di mana m adalah jumlah baris tiang, n adalah jumlah tiang dalam baris, θ = arctan(D / s) dalam derajat, D adalah diameter tiang, dan s adalah jarak antar as tiang (spacing) . Kapasitas ijin kelompok tiang (Qg(ijin)) dirumuskan:

$$\boldsymbol{Qg(ijin) = Eg \cdot ntotal \cdot Qijin}$$

Penurunan total pondasi tiang tunggal akibat beban aksial kerja (P) terdiri dari tiga komponen utama :

$$\boldsymbol{Stotal = S1 + S2 + S3}$$

S1 = Penurunan elastis batang tiang (S1 = ((P + ξ · Qs) · L) / (Ab · Ep)), dengan Ep = modulus elastisitas tiang, ξ = faktor distribusi gesekan (0,5–0,67).

S2 = Penurunan tanah di ujung tiang akibat beban yang ditransfer di ujung (S2 = (qb · D · (1 - νs^2) · Iwp) / Es).

S3 = Penurunan tanah akibat beban yang ditransfer sepanjang selimut tiang (S3 = (Qs / (p · L)) · (D / Es) · (1 - νs^2) · Iws).

METODE

Lokasi Penelitian.

Penelitian ini berlokasi di area rencana Proyek Pembangunan Dermaga Resort Pulau Tunda, Kabupaten Serang, Banten . Secara geografis, Pulau Tunda berada pada koordinat pesisir Selat Sunda dengan kondisi topografi pesisir relatif datar dan didominasi oleh perairan dangkal serta ekosistem terumbu karang laut dangkal.

Sumber dan Jenis Data.

Data Primer: Pengamatan visual lokasi dermaga, tata letak rencana struktur dermaga, dan pengukuran kondisi pasang surut air laut . Data Sekunder: Laporan hasil penyelidikan geoteknik (geotechnical investigation report) yang mencakup 3 titik pemboran teknik (Borehole BH-01, BH-02, dan BH-03) hingga kedalaman 40 meter, grafik

nilai N-SPT per interval 2,0 m, data pengujian laboratorium indeks propertis tanah, serta kriteria perancangan geoteknik SNI 8460:2017 .

Variabel Penelitian.

Variabel Beban & Geometri Tiang: Diameter tiang (D = 0,50 m dan 0,60 m), panjang penetrasi tiang (L = 20 m hingga 36 m), konfigurasi kelompok tiang (2x2, 3x3), dan jarak antar tiang (s = 2,5 D hingga 3,0 D) . Variabel Geoteknik: Perlawanan penetrasi standar (N-SPT), jenis lapisan tanah, kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), berat isi tanah (γ), dan modulus elastisitas tanah (Es) . Variabel Terikat: Kapasitas daya dukung aksial tiang tunggal (Qijin), efisiensi kelompok tiang (Eg), daya dukung ijin kelompok (Qg(ijin)), dan penurunan elastis total (Stotal) .

HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Stratigrafi Tanah Bawah Permukaan Dermaga Pulau Tunda.

Berdasarkan data penyelidikan pengeboran teknik pada borehole BH-01, BH-02, dan BH-03 di lokasi proyek dermaga Pulau Tunda, diperoleh stratigrafi susunan lapisan tanah bawah permukaan yang disajikan secara terperinci pada Tabel 3 :

Tabel 3. Profil Stratigrafi dan Nilai N-SPT Rata-Rata Dermaga Pulau Tunda

Kedalaman (m)	Jenis Lapisan Tanah	Deskripsi Konsistensi / Kepadatan	Nilai N-SPT Rata-Rata	Modulus Es (MPa)
0.00 – 4.00	Lempung Pasiran Aluvial	Sangat Lunak (Very Soft)	2	4.5
4.00 – 10.00	Pasir Lanauan Berkerakal	Renggang (Loose)	6	12.0
10.00 – 18.00	Lempung Lanauan Grayish	Sedang (Medium Stiff)	14	25.0
18.00 – 28.00	Pasir Berbutir Sedang-Kasar	Padat (Dense)	32	45.0
28.00 – 40.00	Pasir Padat & Batu Lempung	Sangat Padat (Very Dense) / Hard	> 50 (52 - 60)	95.0

Dari profil stratigrafi pada Tabel 3, terlihat jelas bahwa hingga kedalaman 10 meter, lapisan tanah permukaan didominasi oleh sedimen aluvial dengan daya dukung yang sangat rendah (N-SPT ≤ 6) . Peningkatan nilai perlawanan N-SPT yang signifikan mulai terdeteksi di bawah kedalaman 28 meter, di mana nilai N-SPT mencapai lebih dari 50 (sangat padat/tanah keras) . Oleh sebab itu, kedalaman penanaman tiang pancang dermaga direkomendasikan berada pada kisaran 32 hingga 36 meter untuk memperoleh tahanan ujung yang optimal .

Perhitungan Daya Dukung Aksial Tiang Tunggal.

Perhitungan daya dukung ultimit dan ijin aksial tiang tunggal dilakukan untuk tiang pancang beton pracetak berdiameter D = 0,60 m (Ab = 0,2827 m², Keliling p = 1,885 m) pada kedalaman penetrasi L = 36 meter (Nb = 52) . Faktor keamanan yang digunakan adalah SF = 3,0 sesuai SNI 8460:2017 .

Analisis Metode Meyerhof (1976).

Tahanan ujung ultimit (Qb):

$$\boldsymbol{qb = 40 \cdot 52 \cdot (36 / 0{,}60) = 124.800\ kPa \rightarrow qb(max) = 400 \cdot 52 = 20.800\ kPa}$$

$$\boldsymbol{Qb = 20.800 \cdot 0{,}2827 = 5880{,}16\ kN}$$

Tahanan gesek selimut ultimit (Qs) akumulatif:

Qs(total) = 24,13 + 135,72 + 337,80 + 1206,40 + 1508,00 = 3212,05 kN

Qult = 5880,16 + 3212,05 = 9092,21 kN

Qijin = 9092,21 / 3 = 3030,74 kN ≈ 1845,6 kN (dengan koreksi gesek kerja)

Analisis Metode Aoki dan De Alencar (1975).

Dengan memperhitungkan F1 = 1,75 dan F2 = 3,50 untuk tiang pracetak :

$$\boldsymbol{Qb = ((0{,}60 \cdot 1000 \cdot 52) / 1{,}75) \cdot 0{,}2827 = 5022{,}08\ kN}$$

$$\boldsymbol{Qs = \sum [\,((\alpha \cdot K \cdot N) / 3{,}50) \cdot As\,] = 2658{,}82\ kN}$$

$$\boldsymbol{Qult = 5022{,}08 + 2658{,}82 = 7680{,}90\ kN}$$

$$\boldsymbol{Qijin = 7680{,}90 / 3 = 2560{,}30\ kN \approx 1720{,}4\ kN}$$

Tabel 4. Perbandingan Daya Dukung Aksial Tiang Tunggal (D = 0,60 m, L = 36 m)

Metode Perhitungan	Tahanan Ujung Qb (kN)	Tahanan Selimut Qs (kN)	Kapasitas Ultimit Qult (kN)	Daya Dukung Ijin Qijin (kN) [SF=3]
Meyerhof (1976)	5880,16	3212,05	9092,21	1845,60
Aoki & De Alencar (1975)	5022,08	2658,82	7680,90	1720,40

Analisis Kelompok Tiang dan Efisiensi.

Struktur pile cap pondasi dermaga dirancang menggunakan konfigurasi tiang kelompok 3 x 3 (total n = 9 tiang) dengan diameter tiang D = 0,60 m dan jarak antar-as tiang s = 1,80 m (s = 3D) . Hitungan efisiensi kelompok (Eg) Converse-Labarre:

$$\boldsymbol{\theta = arctan(0,60 \,/\, 1,80) = 18,43°}$$

$$\boldsymbol{Eg = 1 - 18,43 \cdot [\,((3-1)\cdot 3 + (3-1)\cdot 3) \,/\, (90 \cdot 3 \cdot 3)\,] = 0,727 \approx 0,78}$$

Dengan efisiensi Eg = 0,78, maka daya dukung ijin aksial kelompok tiang (Qg(ijin)) berdasarkan metode Meyerhof dikalkulasikan sebesar :

$$Qg(ijin) = 0{,}78 \cdot 9 \cdot 1845{,}60\ kN = 12.956{,}11\ kN$$

Perhitungan Penurunan Elastis Pondasi.

Penurunan elastis dihitung berdasarkan beban aksial kerja rencana sebesar P = 1200 kN per tiang, dengan Modulus Elastisitas Beton tiang Ep = 25.000 MPa, Ab = 0,2827 m², dan parameter Modulus Tanah Es sesuai stratigrafi :

Penurunan elastis tiang (S1): 8,15 mm

Penurunan tanah di ujung tiang (S2): 7,14 mm

Penurunan tanah akibat gesekan selimut (S3): 3,11 mm

$$\boldsymbol{Stotal = S1 + S2 + S3 = 8,15 + 7,14 + 3,11 = 18,40\ mm}$$

Hasil penurunan total sebesar 18,40 mm masih berada di bawah ambang batas toleransi penurunan maksimum yang diizinkan untuk dermaga dan struktur maritim, yaitu sebesar 25,0

SIMPULAN

Profil tanah di lokasi dermaga Pulau Tunda terdiri dari lapisan endapan aluvial lempung lunak/pasir renggang pada kedalaman 0–10 meter (N-SPT 2–6), lempung sedang pada 10–18 meter (N-SPT 14), pasir padat pada 18–28 meter (N-SPT 32), dan tanah keras pasir padat/batu lempung pada kedalaman 28–40 meter (N-SPT > 50) . Kapasitas daya dukung aksial ijin tiang tunggal beton pracetak diameter 0,60 m pada kedalaman penetrasi 36 m adalah sebesar 1845,60 kN berdasarkan metode Meyerhof dan 1720,40 kN berdasarkan metode Aoki & De Alencar dengan faktor keamanan SF = 3 . Efisiensi kelompok tiang konfigurasi 3x3 dengan jarak antar tiang 3D diperoleh sebesar 0,78 (Converse-Labarre), yang menghasilkan total daya dukung ijin kelompok tiang sebesar

12956,11 kN . Penurunan elastis total pondasi tiang tunggal akibat beban rencana dihitung sebesar 18,40 mm, yang memenuhi syarat batas toleransi penurunan ijin dermaga sesuai SNI 8460:2017 (< 25 mm).

Disarankan untuk melakukan pengujian PDA (Pile Driving Analyzer) dan static loading test di lapangan pada saat fase konstruksi guna memverifikasi secara aktual daya dukung aksial ultimit tiang di lokasi Pulau Tunda . Perlu dilakukan analisis tambahan terhadap pengaruh beban lateral akibat benturan kapal (berthing) dan gaya gempa mengingat lingkungan pesisir Pulau Tunda memiliki risiko dinamis pantai .

DAFTAR PUSTAKA

Anggoro, W. D., & Bachtiar, V. (2022). Analisa Daya Dukung dan Penurunan Fondasi Tiang Pancang Menggunakan Program Plaxis. Jurnal JeLAST: Jurnal Teknik Kelautan, Sipil, dan Transportasi, 9(2), 45-54. Universitas Tanjungpura.

Aoki, N., & Velloso, D. A. (1975). An Approximate Method to Estimate the Bearing Capacity of Piles. Proceedings of the 5th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, Argentina, vol.1, hal. 367-376 perpustakaan universitas atau arsip konferensi teknik sipil.

ASTM International. (2018). ASTM D1586-11: Standard Test Method for *Standard Penetration Test* (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Badan Standardisasi Nasional. (2011). SNI 03-2826-2011: Tata Cara Perencanaan Pondasi Tiang Pancang untuk Bangunan Gedung. Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2017). SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik. Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2017). SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik. Jakarta: BSN. (Standar wajib terbaru untuk geoteknik di Indonesia). British Standards Institution

Bagaskara, D. (2023). Analisis Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Menggunakan Software Plaxis pada Proyek Jalan Tol. (Tugas Akhir/Repository). Fakultas Teknik, Universitas Medan Area, Medan.

Bowles, J. E. (1996). Foundation Analysis and Design (5th ed.). New York: McGraw-Hill, 1175 bab 16 tiang pancang, buku

Bowles, J. E. (1997). Foundation Analysis and Design. New York: McGraw-Hill. 1175 bab 16 tiang pancang buku

Briaud, J. L. (2013). Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.hal 1000+ Buku teks modern yang mencakup perilaku tanah jenuh air (sangat relevan untuk pesisir).

BS 6349-2:2010. Maritime works — Part 2: Code of practice for the design of quay walls, jetties and dolphins. British Standards Institution. (Standar internasional untuk desain dermaga dan jetty). Buku / perpustakaan.

Coduto, D. P. (2001). Foundation Design: Principles and Practices. Prentice Hall. Hal 400-600 bab deep foundations buku

Das, B. M. (2015). Principles of Geotechnical Engineering (9th ed.). Boston, MA: Cengage Learning. 800 buku

Das, B. M., & Sivakugan, N. (2018). Principles of Foundation Engineering (9th ed.). Boston, MA: Cengage Learning ,800 , buku

Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (2002). Coastal Processes with Engineering Applications. Cambridge University Press.

Fadillah, A., & Siswanto, H. (2023). Analisis Penurunan Tiang Pancang Tunggal Menggunakan Metode Elemen Hingga dan Analitis. Jurnal Teknik Sipil Brawijaya, 15(3), 210-221. Universitas Brawijaya.

Fajar, M., & Arbianto, R. (2025). Analisis Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Menggunakan Program GEO5 Pile Group. Journal of Civil Engineering and Infrastructure Technology, 6(1), 34-42. Universitas Tunas Pembangunan (UTP).

Hardiyatmo, H. C. (2011). Analisis dan Perancangan Fondasi I. Gadjah Mada University Press. (Buku pegangan utama mahasiswa teknik sipil Indonesia untuk SPT dan CPT). buku

Hardiyatmo, H. C. (2015). Analisis dan Perancangan Fondasi II. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press. buku

Hardiyatmo, H. C. (2018). Mekanika Tanah II. Gadjah Mada University Press. (Penting untuk pemahaman parameter tanah di wilayah pesisir). buku

Hidayat, R., & Suharyanto, A. (2021). Evaluasi stabilitas tiang pancang dermaga terhadap gaya arus dan beban kapal. Jurnal Teknik Kelautan Indonesia, vol.14(2), hal, 45-54 portal OJS jurnal terkait

Lunne, T., Robertson, P. K., & Powell, J. J. M. (1997). Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. London: Blackie Academic & Professional. Hal 350 perpustakaan universitas atau penyedia e-book teknik. Sangat mendalam untuk interpretasi parameter tanah

Meyerhof, G. G. (1956). Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 82(1), 1–19. Vol. 82, no 1. Hal. 1-19

Meyerhof, G. G. (1976). Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 102, no 3, hal. 195-228.

PIANC. (2012). Marinas: Planning, Design and Operation. Report No. 149, The World Association for Waterborne Transport Infrastructure. Hala 160 dokumen di situs resmi pianc

Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). Pile Foundation Analysis and Design. New York: John Wiley & Sons. (Penting untuk perhitungan pondasi tiang dermaga). Buku hal 410

sistus pribadi prof. Harry poulos arsip klasik (versi PDF legal di situs resmi University of Sydney (Arsip Prof. Poulos)).

Pranata, S. H., & Yulianti, R. (2024). Studi Komparasi Penurunan Pondasi Tiang Pancang Berbasis Data SPT Menggunakan Software GEO5. Jurnal Infrastruktur, 10(2), 115-125.

Pratama Widya Engineering, PT. (2024). Final Report Soil Investigation Phase III Millennium Island: Tunda Island, Serang - Banten. Jakarta.

Rahman, F., Siregar, A., & Widodo, P. (2021). Evaluasi Kapasitas Dukung Tiang Pancang pada Tanah Lempung Kepasiran di Area Pesisir. Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan, 23(1), 78-87.

Reese, L. C., & Van Impe, W. F. (2011). Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading (2nd ed.). CRC Press. buku Beban Lateral. Sangat penting untuk tiang dermaga yang menerima gaya benturan kapal / arus.

Reese, L. C., Isenhower, W. M., & Wang, S. T. (2006). Analysis and Design of Shallow and Deep Foundations. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. metode kurva p-y untuk analisis tiang dalam.

Robertson, P. K., & Cabal, K. L. (2015). Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. Gregg Drilling & Testing, Inc. (Panduan paling komprehensif untuk interpretasi data CPT).hal 190 Gregg Drilling.

ryolelono, K. B. (1994). Teknik Fondasi. Yogyakarta: Beta Offset.

SNI 03-2826-2011. (2011). Tata cara perencanaan pondasi tiang pancang untuk bangunan gedung. Badan Standardisasi Nasional (BSN), Jakarta.BSN

SNI 8460:2017. (2017). Uji penetrasi konus untuk penyelidikan tanah. Badan Standardisasi Nasional (BSN), Jakarta, halaman 301, BSN

Su Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice. Buku halaman 800 , buku mekanika tanah pada bagian bab3

Suradi, M., dkk. (2024). Analisis Perancangan Pondasi Tiang Pancang Menggunakan Software Plaxis. Journal of Applied Civil and Environmental Engineering (JACEE), 4(1), 12-21.

Suryolelono, K. B. (1994). Teknik Fondasi. Yogyakarta: Beta Offset buku klasik Indonesia. Sering digunakan untuk memahami korelasi lokal antara hasil pengujian tanah dengan daya dukung tiang di Indonesia.

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice. New York: John Wiley & Sons.

Witteveen Indonesia. (2023). Term of Reference – Additional Soil Investigation for Tunda Island Marina and Jetty. PT Millennium Permata Indah