

EVALUASI TAHANAN LATERAL *PILE GUIDE* DERMAGA MARINA TERHADAP BEBAN GELOMBANG

Anafi Minmahddun¹⁾

¹⁾Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo

email: anafi.minmahddun@uho.ac.id

Abstrak

Marina adalah fasilitas khusus yang melayani kapal rekreasi seperti *yacht* dan perahu nelayan, dengan elemen struktural utama berupa *pile guide* untuk mendukung stabilitas dermaga terapung. Artikel ini menganalisis kapasitas tahanan lateral *pile guide* dengan mempertimbangkan beban akibat gelombang, angin, dan arus di lingkungan laut. Penelitian ini menggunakan metode analisis struktur untuk menentukan *fixity point* dan metode Brooms untuk mengevaluasi defleksi tiang. Data angin dan gelombang dianalisis menggunakan metode Fisher-Tippet tipe I untuk menentukan tinggi gelombang maksimum dengan kala ulang 50 tahun, yaitu 2,75 meter. Hasil analisis menunjukkan nilai *unity check* sebesar $< 0,5$, menandakan tegangan izin dua kali lebih besar dari tegangan aktual sehingga struktur dinilai aman. Defleksi yang terjadi pada kedalaman penanaman tiang sebesar 15 meter adalah 1,93 cm, yang berada di bawah batas defleksi maksimum 2,54 cm. Sebagian besar gaya lateral ditanggung oleh sistem apung dermaga, sehingga kedalaman tiang yang diperlukan tidak sebesar pada dermaga umum. Namun, untuk tanah yang berpotensi likuefaksi, kedalaman tiang harus ditingkatkan untuk menjaga stabilitas struktur. Penelitian ini menyimpulkan bahwa desain *pile guide* pada dermaga marina telah memenuhi kriteria keamanan dan stabilitas yang diharapkan. Kajian ini memberikan panduan penting bagi desain infrastruktur marina yang berkelanjutan, khususnya di wilayah pesisir dengan karakteristik lingkungan dinamis.

Kata kunci: Marina, *pile guide*, beban lateral, defleksi

Abstract

A marina is a specialized facility that serves recreational vessels such as yachts and fishing boats, with *pile guides* as a critical structural component to support the stability of floating docks. This study analyzes the lateral load capacity of *pile guides* considering waves, wind, and current forces in a marine environment. Structural analysis was conducted to determine the fixity point, and the Brooms method was applied to evaluate pile deflection. Wind and wave data were analyzed using the Fisher-Tippet Type I method to estimate the maximum wave height for a 50-year return period, which is 2.75 meters. The analysis results show a unity check value of < 0.5 , indicating that the allowable stress is twice the actual stress, ensuring structural safety. The deflection at a pile embedment depth of 15 meters was 1.93 cm, below the maximum permissible deflection of 2.54 cm. Most lateral forces are absorbed by the dock's floating system, reducing the required pile depth compared to conventional docks. However, in areas with liquefaction potential, deeper piles are necessary to ensure structural stability. This study concludes that the *pile guide* design for marina docks meets the expected safety and stability criteria. The findings provide valuable insights for sustainable marina infrastructure design, particularly in coastal areas with dynamic environmental conditions.

Keywords: Marina, *Pile guide*, Lateral Load, Deflection

I. PENDAHULUAN

Pelabuhan marina merupakan fasilitas khusus yang dirancang untuk melayani kapal rekreasi seperti yacht, perahu layar, dan perahu nelayan. Marina berbeda dari pelabuhan pengiriman komersial yang berfokus pada kargo, karena lebih berorientasi pada kebutuhan rekreasi dan pariwisata. Dengan meningkatnya popularitas aktivitas berperahu rekreasi, pembangunan marina telah berkembang secara global, mendukung pertumbuhan pariwisata dan ekonomi di wilayah pesisir. Fungsi utama marina mencakup penyediaan tempat penyimpanan dan perawatan kapal, layanan pengisian bahan bakar, fasilitas rekreasi, serta kontribusi terhadap pembangunan ekonomi lokal.

Dalam konteks infrastruktur marina, *pile guide* adalah elemen struktural penting yang mendukung stabilitas dermaga terapung dan sistem tambatan. Tiang-tiang ini, yang dipancang secara vertikal ke dasar laut, berfungsi untuk menahan gaya lateral akibat gelombang, arus, dan pergerakan kapal, serta menjaga posisi dermaga terapung. Desain *pile guide* harus memperhitungkan pengaruh gaya struktural, lingkungan, dan dinamis yang bekerja pada infrastruktur laut. Iklim gelombang, gelombang badai, dan beban operasional merupakan hal penting dalam merancang *pile guide*, terutama di wilayah yang rawan bencana seperti topan atau di fasilitas lepas pantai [1], [2].

Stabilitas fondasi tiang terhadap gaya dinamis, terutama gelombang laut, merupakan salah satu tantangan utama dalam desain *pile guide*. Gelombang adalah gaya dominan yang bekerja pada fondasi, sehingga analisis mendalam diperlukan untuk menjamin keamanan struktur. Faktor-faktor seperti beban ujung tiang, kedalaman pemancangan, dan karakteristik tanah dasar laut sangat memengaruhi stabilitas tiang [3]. Selain itu model numerik menunjukkan pentingnya penilaian distribusi tekanan untuk memastikan stabilitas tiang terhadap aksi gelombang [4].

Artikel ini bertujuan untuk menganalisis kapasitas tahanan lateral *pile guide* dermaga marina dengan mempertimbangkan pengaruh gelombang, karakteristik tanah, dan kondisi lingkungan laut. Kajian ini diharapkan dapat memberikan panduan desain yang lebih baik untuk mendukung keamanan dan keberlanjutan infrastruktur marina.

II. METODE

Analisis tahanan lateral *pile guide* dilakukan menggunakan metode Brooms [5]. Namun sebelum itu dilakukan analisa struktur menggunakan untuk mengetahui besarnya gaya horizontal maksimum yang akan diterima oleh *pile guide*. Tahap awal proses analisa struktur adalah menentukan titik jepit tiang di dalam tanah (*fixity point*). Tiang pancang tidak dimodelkan pada keseluruhan panjangnya, namun hanya sampai titik dimana tiang dianggap sudah berperilaku sebagai jepit (*fixity point*). *Fixity point* dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Z_f = \frac{1}{\beta} \quad (1)$$

$$\beta = \left(\frac{k_h \times d}{4EI} \right)^{0.25} \quad (2)$$

dimana,

- Z_f : *fixity point* (m)
- β : Koefisien defleksi tiang
- k_h : Modulus subgrade horizontal (kN/m³)
- d : Diameter tiang (m)
- E : Modulus elastisitas tiang (kPa)
- I : Momen inersia penampang tiang (m⁴)

Struktur tiang pancang dan struktur dermaga tidak tersambung secara monolit, sehingga tiang pancang tidak menerima transfer beban vertikal tetapi hanya menerima beban horizontal yang berasal dari gelombang, arus dan kecepatan angin. Adapun, beban vertikal akan langsung dipikul oleh ponton dermaga dengan memanfaatkan gaya apung dari *floating* ponton.

Data utama yang digunakan untuk menghitung beban horizontal adalah data angin yang diperoleh dari stasiun pengukuran Betoambari. Data angin kemudian dianalisis lebih lanjut untuk menentukan tinggi gelombang maksimum menggunakan metode Fisher-Tippet tipe 1 [6]. Beban horizontal yang bekerja pada *pile guide* dihitung menggunakan Persamaan 3 dan Persamaan 6.

$$F_x = F_{d\max} |\cos \omega t| \cdot \cos \omega t - F_{i\max} \sin \omega t \quad (3)$$

$$F_{d\max} = \frac{1/16 \cdot \rho \cdot g \cdot c_m \cdot d \cdot H^2 \cdot (\sinh(2kh) + 2kh)}{\sinh(2kh)} \quad (4)$$

$$F_{i\max} = \pi / 8 \cdot c_m \cdot d^2 \cdot H \cdot \tanh(kh) \quad (5)$$

$$R_w = 1,1 \cdot P \cdot A \quad (6)$$

$$P = 0,063V^2 \quad (7)$$

dimana,

F_x : Gaya gelombang pada tiang (kN)

$F_{d\max}$: Gaya drag maksimum (kN)

$F_{i\max}$: Gaya inersia maksimum (kN)

H : Tinggi gelombang (m)

h : Tinggi muka air (m)

t : Waktu gelombang signifikan (detik)

v : Kecepatan gelombang signifikan (m/detik)

L : Panjang gelombang (m)

T : Periode gelombang (detik)

ω : Frekuensi gelombang (Hz)

k : Bilangan gelombang

D : Diameter tiang (m)

C_d : Koefisien drag [6]

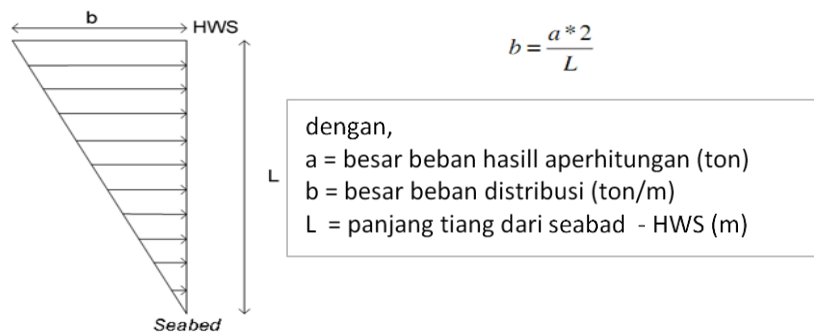
C_m : Koefisien inersia [6]

R_w : Gaya akibat angin (kN)

P : Tekanan angin (kPa)

V : Kecepatan angin (m/detik)

Analisa struktur *pile guide* dilakukan dengan kombinasi pembebanan 1,5 wave load + 1,5 wind load sesuai AS 3962-2001 Guidelines for design marinas [7]. Beban-bekan horizontal akan didistribusikan dari *seabed* sampai HWS dengan model segitiga seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Distribusi beban horizontal

Defleksi ujung tiang (y_0) dihitung menggunakan metode Brooms yang bergantung pada tipe jepitan tiang sebagai berikut:

- a. Tiang ujung bebas berkelakuan seperti tiang pendek, bila $\beta L < 1,5$, defleksi tiang di permukaan tanah:

$$y_0 = \frac{4H(1 + 1,5e/L)}{k_h \cdot d \cdot L} \quad (8)$$

- b. Tiang ujung jepit dianggap berkelakuan seperti tiang pendek bila $\beta L < 0,5$, defleksi tiang di permukaan tanah:

$$y_0 = \frac{H}{k_h \cdot d \cdot L} \quad (9)$$

- c. Tiang ujung bebas dianggap seperti tiang panjang (tidak kaku), bila $\beta L > 2,5$, defleksi tiang di permukaan tanah:

$$y_0 = \frac{2 \cdot H \cdot \beta (e \cdot \beta + 1)}{k_h \cdot d} \quad (10)$$

- d. Tiang ujung jepit dianggap sebagai tiang panjang (tidak kaku) bila $\beta L > 1,5$, defleksi tiang di permukaan tanah:

$$y_0 = \frac{H \cdot \beta}{k_h \cdot d} \quad (11)$$

dimana,

H : Gaya horizontal maksimum tiang (kN)

e : Panjang tiang di atas permukaan tanah (m)

L : Panjang tiang tertanam (m)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Gelombang

Perubahan musiman dari arah dan kecepatan angin dipengaruhi oleh perubahan musim. Pada musim kemarau angin dengan kecepatan tinggi bertiup dari selatan sampai tenggara. Mendekati musim hujan, angin menjadi lebih lemah dan bertiup dari barat daya sampai barat laut. Distribusi tahunan angin di lokasi rencana ditunjukkan dalam Gambar 2.

Gelombang merupakan faktor utama dalam penentuan tata letak perencanaan pelabuhan. Ombak yang sering terjadi di laut dan cukup penting adalah ombak yang dibangkitkan oleh angin. Proses pembangkitan ombak terjadi akibat adanya pengalihan energi dari angin ke permukaan laut akibat fluktuasi tekanan udara pada permukaan air laut. Proses ini berlangsung pada daerah yang disebut daerah pembangkitan ombak (*wind wave generating area*). Tekanan angin menimbulkan tegangan pada permukaan laut, sehingga riak kecil muncul. Jika kecepatan angin bertambah kuat, riak tersebut semakin besar dan akhirnya membentuk ombak.

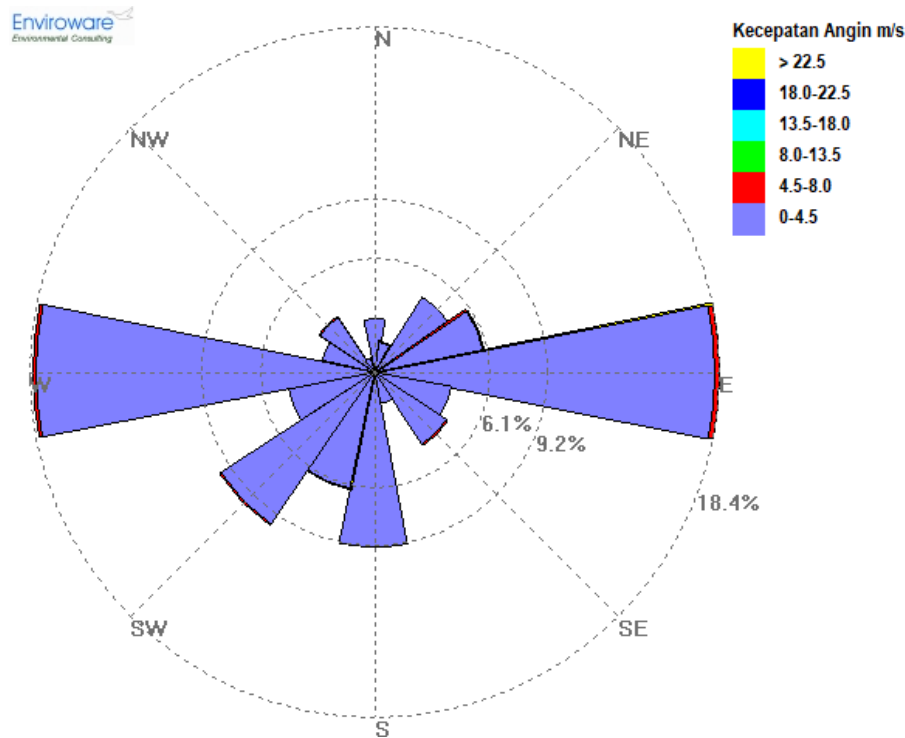
Tinggi dan periode ombak yang terbentuk bergantung pada kecepatan angin, durasi hembusan angin, dan jarak pembangkitan ombak (*fetch*). Hasil analisis tinggi gelombang dan periode gelombang rencana untuk kala ulang 50 tahun menggunakan metode Fisher-Tippet tipe I menunjukkan tinggi gelombang sebesar 2,75 m.

B. Analisis Tahanan Lateral Tiang

Analisis tahanan lateral tiang dilakukan pada daerah dengan kedalaman maksimum. Pemodelan struktur tiang menggunakan program SAP 2000 dilakukan dengan menghitung *fixity point* terlebih dahulu. Jenis tiang pancang yang digunakan adalah tiang pancang baja dengan diameter 0,609 m dan panjang keseluruhan 39 m (15 m tertanam dan 24 m di atas dasar laut). Nilai modulus subgrade horizontal lokasi dermaga adalah 7.390 kN/m³. Dengan menggunakan Persamaan 1, letak *fixity point* lokasi studi adalah sebagai berikut:

$$Z_f = 1 \div \left(\frac{7390 \times 0.609}{4 \times 2.1 \times 10^8 \times 6.75^{-3}} \right)^{0.25} = 5.9 \text{ m} \approx 6 \text{ m}, \text{ sehingga panjang tiang yang akan dimodelkan adalah:}$$

Berdasarkan analisis, panjang tiang yang dimodelkan adalah $= L_{\text{fixity point} - \text{Seabed}} + L_{\text{seabed} - \text{HWS}} = 6 \text{ m} + 24 \text{ m} = 30 \text{ m}$.



Gambar 2. Data distribusi angin di Kabupaten Buton Pasar Wajo (Sta. Betoambari)

Perhitungan pembebanan yang bekerja pada tiang menggunakan Persamaan 3 sampai Persamaan 7 dengan uraian sebagai berikut:

$$F_{d \max} = \frac{1/16 \cdot \rho \cdot g \cdot c_m \cdot d \cdot H^2 \cdot (\sinh(2kh) + 2kh)}{\sinh(2kh)}$$

$$F_{d \max} = \frac{1/16 \times 1030 \times 9.81 \times 1.70 \times 0.609 \times 2.75^2 \cdot (\sinh(2 \times 0.133 \times 24) + (2 \times 0.133 \times 24))}{\sinh(2 \times 0.133 \times 24)} = 2906.756 \text{ N}$$

$$F_{i \max} = \pi / 8 \cdot c_d \cdot d^2 \cdot H \cdot \tanh(kh)$$

$$F_{i \max} = \pi / 8 \times 1 \times 0.609^2 \times 2.75 \times \tanh(0.133 \times 24) = 6610.59 \text{ N}$$

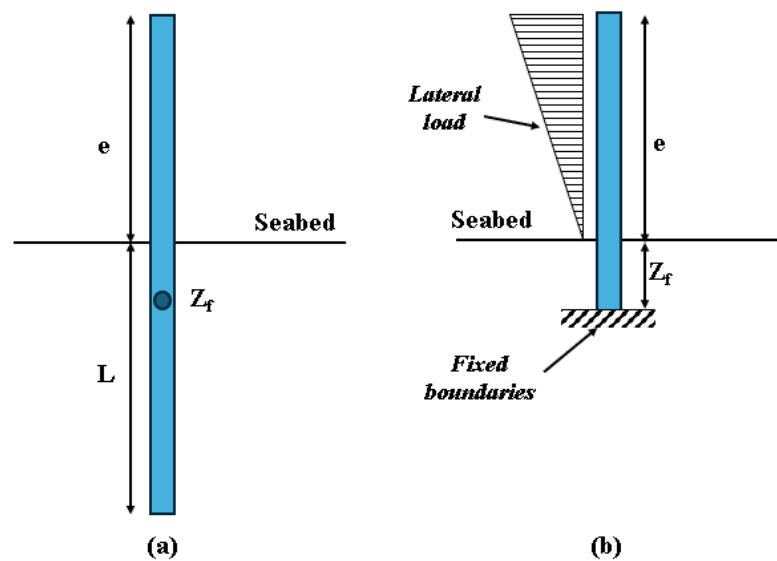
$$F_x = F_{d \max} |\cos \omega t| \cdot \cos \omega t - F_{i \max} \sin \omega t$$

$$F_x = 2906.76 |\cos(1.001 \times 6.280)| \times \cos(1.001 \times 6.280) - 6610.59 \times \sin(1.001 \times 6.280) = 21,485 \text{ kN}$$

$$R_w = 1.1 \times 0.063 \times V^2 \times A$$

$$R_w = 1.1 \times 0.063 \times 4.5^2 \times \pi \times 0.609 = 0.265 \text{ kN}$$

Beban horizontal akan bekerja disepanjang tiang yang terkena air laut dengan menggunakan perletakan jepit pada titik *fixity point* seperti ilustrasi yang terlihat pada Gambar 3. Kombinasi pembebanan 1,5 wave load + 1,5 wind load sesuai dengan distribusi beban horizontal yang terdapat pada Gambar 1.



Gambar 3. (a) Kondisi aktual *pile guide*; (b) Pemodelan *pile guide* dalam analisis

Analisis yang pertama dilakukan adalah menghitung rasio tegangan antara tegangan aktual dan tegangan izin atau yang biasa disebut dengan *unity check*. Struktur yang aman memiliki nilai *unity check* < 1 [8]. Hasil analisis menunjukkan nilai *unity check pile guide* $< 0,5$ yang menunjukkan tegangan izin 2 kali lebih besari dari tegangan aktual sehingga struktur masih dalam kategori aman.

Hasil analisis struktur diperoleh gaya horizontal maksimum yang akan diterima tiang sebesar 51.51 kN. Nilai ini kemudian digunakan untuk menganalisis defleksi tiang dengan metode Brooms menggunakan salah satu dari Persamaan 8 sampai Persamaan 11 sesuai dengan jenis jepitan tiang. Hasil analisis defleksi tiang diuraikan sebagai berikut:

Nilai β pada perhitungan *fixity point* adalah 0,1678, sehingga jenis jepitan tiang pada lokasi penelitian adalah:

$\beta L = 0,1678 \times 15 = 2,52 > 2,5$, maka tiang berperilaku sebagai tiang panjang ujung bebas, sehingga:

$$y_0 = \frac{2.H.\beta(e.\beta + 1)}{k_h.d}$$

$$y_0 = \frac{2 \times 51,51 \times 0,1678 (24 \times 0,1678 + 1)}{7390 \times 0,609} = 1,93 \text{ cm}$$

Hasil analisis menunjukkan dengan kedalaman tiang sebesar 15 m, defleksi yang terjadi sebesar 1,93 cm dan masih memenuhi kriteria defleksi ijin sebesar 2,54 cm [9]. Idealnya panjang tiang tertanam harus $> 1,5$ panjang tiang yang muncul di permukaan untuk mencegah terjadinya defleksi berlebihan pada struktur [10]. Namun, pada kasus yang terjadi pada penelitian ini, struktur marina menerima gaya lateral yang jauh lebih kecil dibandingkan bangunan dermaga pada umumnya. Sebagian beban akan langsung diterima oleh struktur marina yang menggunakan gaya apung untuk menjaga stabilitas. Oleh karena itu kedalaman tiang yang diperlukan tidak perlu seperti hasil penelitian sebelumnya. Namun demikian perlu adanya pertimbangan terhadap potensi likuefaksi yang mungkin terjadi, mengingat pada tanah yang berpotensi likuefaksi kedalaman tiang yang dibutuhkan jauh lebih dalam untuk menjaga stabilitas struktur [11].

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, kapasitas tahanan lateral *pile guide* pada dermaga marina menunjukkan hasil yang memadai untuk memastikan stabilitas struktur terhadap beban horizontal akibat gelombang dan angin. Dengan menggunakan pendekatan analitis dan pemodelan numerik, ditemukan bahwa nilai *unity check* berada di bawah 0,5, menandakan struktur masih dalam kategori aman. Defleksi yang terjadi pada tiang sebesar 1,93 cm juga memenuhi kriteria defleksi yang diizinkan sebesar 2,54 cm. Hal ini menunjukkan bahwa kedalaman penanaman tiang 15 meter cukup untuk menjaga kestabilan, terutama karena sebagian besar beban lateral diserap oleh sistem apung dermaga. Namun, untuk kondisi tanah yang berpotensi likuefaksi, kedalaman tiang yang lebih besar perlu dipertimbangkan guna menjamin stabilitas jangka panjang. Studi ini memberikan panduan penting bagi desain marina yang aman dan berkelanjutan, dengan memperhatikan karakteristik lingkungan laut dan sifat dinamis struktur dermaga.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. R. Dita, E. Cruz, and J. C. E. Santos, "COASTAL ENGINEERING ANALYSIS AND DESIGN OF A FETCH-LIMITED STORM-TRACKED LACUSTRINE MARINA," *Coast. Eng. Proc.*, no. 36v, p. 18, Dec. 2020, doi: 10.9753/icce.v36v.papers.18.
- [2] S. Lee and D. Chang, "Design of Pile-Guide Mooring System for Offshore LNG Bunkering Terminal: A Case Study for Singapore Port," *J. Ocean Eng. Technol.*, vol. 31, no. 6, pp. 379–387, Dec. 2017, doi: 10.26748/KSOE.2017.12.31.6.379.
- [3] X. Xu, Z. Zhang, W. Yao, and Z. Zhao, "Dynamic Stability Analysis of Pile Foundation under Wave Load," *Int. J. Geomech.*, vol. 21, no. 4, Apr. 2021, doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001968.
- [4] T. Sui, C. Liu, J. Zhang, C. Zhang, and J. Zheng, "3D numerical modeling of wave–monopile–seabed interaction in the presence of a scour hole," *Ocean Eng.*, vol. 298, p. 117254, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.117254.
- [5] H. C. Hardiyatmo, *Analisis dan Perancangan Fondasi II*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2015.
- [6] B. Triatmodjo, *Perencanaan Pelabuhan*. Yogyakarta: Beta Offset, 2016.
- [7] Australian Standard, *AS3962-2001 - Guidelines for design of marinas*, no. March. 2001.
- [8] American Petroleum Institute, *API RP-2A-WSD, 21st: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design*. Washington, D.C.: American Petroleum Institute, 2000.
- [9] Badan Standarisasi Nasional, *SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2017.
- [10] S. ASHOUR and Y. S. ÜNSEVER, "Kum Zemindeki Bir Derin Kazının Komşu Kazının Davranışı Üzerindeki Etkisinin Statik Analizi," *Uludağ Univ. J. Fac. Eng.*, pp. 627–646, Aug. 2022, doi: 10.17482/uumfd.971609.
- [11] A. Minmahddun and U. Mangidi, "Evaluasi Dimensi Tiang Pancang Dermaga di Daerah Pesisir Kabupaten Kolaka dengan Mempertimbangkan Pengaruh Likuefaksi," *REKONSTRUKSI TADULAKO Civ. Eng. J. Res. Dev.*, Aug. 2024, doi: 10.22487/renstra.v5i2.686.