

Analisis Dinamik Struktur Kolom Kantilever dan Portal di Ponton sebagai Simulasi Turbin Angin Terapung dan Rumah Terapung terhadap Gelombang

***Patria Kusumaningrum, Anggito Tri Agastya,**

Olivia Debora Papuani Tambunan, Yusuf Farhan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Kota Bandung

***patria.k@itb.ac.id**

Received: 8 April 2025 Revised: 4 Juli 2025 Accepted: 14 Agustus 2025

Abstract

Floating wind turbines and floating houses are innovative solutions to global challenges such as land scarcity and rising sea levels. This study investigates the dynamic responses of both structures under wave excitation. The floating wind turbine is modeled as a cantilever column with a lumped mass at the top, while the floating house is idealized as a single-story portal frame. Both structures are supported by pontoons, which are represented as beams on elastic foundations using the Winkler foundation theory. Wave loads are modeled based on linear wave theory and Froude-Krylov forces. The analysis is conducted in the time domain using the Finite Element Method and Newmark-Beta integration scheme. The results show that the floating wind turbine experiences a maximum drift of 61.986 mm, heave of 104.310 mm, and pitch of 0.141°, whereas the floating house experiences a maximum drift of 35.587 mm, heave of 60.621 mm, and pitch of 0.408°. The highest internal forces occur in the pontoon section of both structures, indicating that the pontoon plays a significant role in resisting wave loads. This study contributes to a better understanding of the dynamic behavior of floating structures and demonstrates that a simplified 2D modeling approach can be effectively used as an initial step in designing stable and efficient floating systems.

Keywords: *Floating structure, numerical calculation, structural dynamics, finite element method, beam on elastic foundation*

Abstrak

Turbin angin terapung dan rumah terapung merupakan solusi inovatif dalam menghadapi tantangan global seperti keterbatasan lahan dan kenaikan muka air laut. Penelitian ini mengkaji respons dinamik dari kedua struktur terhadap eksitasi gelombang. Struktur turbin angin dimodelkan sebagai kolom kantilever dengan massa terkonsentrasi di puncak, sementara rumah terapung dimodelkan sebagai portal satu lantai. Struktur tersebut bertumpu pada ponton yang diidealisasikan sebagai balok di atas fondasi elastis dengan pendekatan teori Winkler. Beban gelombang dimodelkan menggunakan teori gelombang linear dan gaya Froude-Krylov. Analisis dilakukan dalam domain waktu menggunakan Metode Elemen Hingga dan integrasi Newmark-Beta. Hasil analisis menunjukkan bahwa turbin angin terapung mengalami drift maksimum sebesar 61,986 mm, heave 104,310 mm, dan pitch 0,141°, sedangkan rumah terapung mengalami drift 35,587 mm, heave 60,621 mm, dan pitch 0,408°. Gaya dalam terbesar terjadi di bagian ponton pada kedua struktur, menunjukkan bahwa ponton berkontribusi besar dalam menahan beban gelombang. Penelitian ini memberikan pemahaman tentang perilaku dinamik struktur terapung serta menunjukkan bahwa pendekatan pemodelan 2D yang disederhanakan dapat digunakan sebagai langkah awal dalam desain struktur terapung yang stabil dan efisien.

Kata kunci: *Struktur terapung, perhitungan numerik, dinamika struktur, metode elemen hingga, balok di atas fondasi elastis*

Pendahuluan

Inovasi pengembangan struktur terapung yang terus berkembang seiring dengan perubahan kebutuhan manusia dalam menghadapi tantangan global, seperti perubahan iklim, kenaikan permukaan air laut, dan kebutuhan terhadap sumber energi terbarukan. Struktur terapung merupakan solusi dalam menjawab permasalahan terhadap kondisi lingkungan yang berubah dan membuka opsi untuk menciptakan teknologi yang ramah lingkungan. Perkembangan teknologi material, metode desain, dan sistem kontrol juga berperan besar dalam meningkatkan stabilitas, keamanan, dan efisiensi struktur terapung modern (Wang et al., 2020).

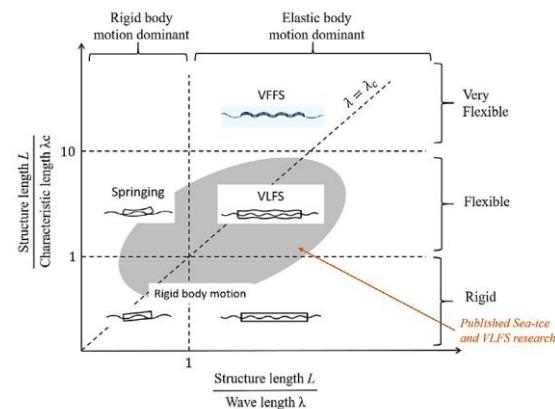
Turbin angin terapung merupakan salah satu inovasi di bidang energi terbarukan dengan memanfaatkan potensi angin di lepas pantai. Inovasi ini memungkinkan pembangkit listrik tenaga angin dibangun di perairan yang lebih dalam, di mana turbin angin terapung memiliki keunggulan yaitu kecepatan angin yang lebih tinggi dibandingkan di daratan, pengurangan dampak visual, dan gangguan yang minimal terhadap jalur pelayaran. Selain itu, struktur rumah terapung dirancang untuk menjawab kebutuhan hunian yang lebih fleksibel dan adaptif. Rumah terapung ini memiliki keunggulan selain sebagai solusi terhadap keterbatasan lahan, tetapi juga memberikan keamanan pada daerah rawan banjir ataupun pesisir dikarenakan rumah terapung yang dirancang untuk tetap stabil dalam kondisi muka air yang dinamis. Konsep rumah terapung juga mulai dipadukan dengan prinsip *sustainable design*, seperti penggunaan energi surya, sistem pengolahan air hujan, dan material ramah lingkungan untuk mengurangi jejak karbon (Perkins & Murthy, 2021).

Studi terbaru dalam 10 tahun terakhir menunjukkan bahwa respons dinamik akibat gelombang, interaksi fluida-struktur, dan sistem tambatan menjadi aspek penting dalam analisis desain (Lamas-Pardo et al., 2022). Pengembangan struktur terapung memiliki berbagai tantangan dalam hal kestabilan struktur maupun ketahanan struktur terhadap beban dinamis yang terjadi diakibatkan oleh gelombang air. Bagaskoro (2022) melakukan studi respons dinamik interaksi air-struktur terapung dengan eksitasi beban gempa sebagai sistem isolasi dasar. Struktur terapung dimodelkan dalam dua dimensi dengan struktur terapung dimodelkan sebagai balok di atas fondasi elastis di mana model ini dapat menangkap karakteristik esensial dari respons sistem terapung terhadap beban harmonik.

Untuk efisiensi di dalam komputasi, banyak studi mengasumsikan struktur kaku dan menggunakan model numerik ideal sebagai dasar evaluasi perilaku

dinamis. Zhang & Schreier (2022) melakukan pengumpulan penelitian secara numerik dan eksperimen terdahulu yang telah dilakukan pada struktur terapung dan melakukan pemetaan karakteristik respons struktur (lihat Gambar 1) yang menunjukkan respons struktur terhadap parameter struktur dan parameter panjang karakteristik, λ_c sebagai Persamaan 1 (Suzuki et al., 2007).

$$\lambda_c = 2\pi \left(\frac{EI}{\rho g} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$



Gambar 1. Grafik respons struktur terapung (Zhang & Schreier, 2022)

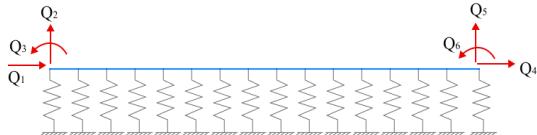
Dengan EI merupakan kekakuan lentur dari balok per satuan panjang dan ρg merupakan kekakuan hidrostatik per satuan panjang. Dalam penelitian ini, studi respons dinamik struktur terapung berupa struktur turbin angin terapung dan rumah terapung akibat gelombang air dilakukan dengan mengidealisasi struktur kantilever dengan *lumped mass* untuk struktur turbin angin terapung dan portal satu lantai untuk rumah terapung yang ditinjau dalam dua dimensi. Struktur menumpu pada balok di atas fondasi elastis sebagai idealisasi ponton yang memiliki gaya apung sesuai dengan Hukum Archimedes dan dikenai beban harmonik gelombang air. Struktur ditinjau dianalisis dengan pendekatan Metode Elemen Hingga (MEH) dan diselesaikan dengan metode numerik. Tujuan dari studi ini dilakukan untuk mengembangkan pemahaman komprehensif mengenai perilaku struktur terapung dan menyempurnakan pendekatan pemodelan untuk mendukung desain struktur terapung yang aman dan efisien.

Metode

Balok di atas fondasi elastis

Respons dinamik dari struktur terapung dapat dimodelkan struktur yang terletak di atas fondasi elastis Fondasi elastis yang dimodelkan (Gambar 2) pada permasalahan ini merupakan efek dari gaya

apung yang diberikan oleh air pada struktur (Jamshed, 2017). Fondasi elastis akan menambah kekakuan total dari balok di atas fondasi elastis sehingga kekakuan balok akan dipengaruhi oleh kekakuan balok itu sendiri (K_B) dan kekakuan dari fondasi elastis atau *bouyancy spring stiffness* (K_{BS}).



Gambar 2. Balok di atas fondasi elastis

Salah satu parameter yang memengaruhi matriks kekakuan K_{BS} yaitu nilai konstanta *spring*. Konstanta *spring* dipengaruhi oleh gaya apung yang diberikan oleh zat cair. Persamaan 2 berikut merupakan formulasi matriks kekakuan fondasi elastis (Wang, 1985; Lehman & Castaings, 2013; Zhu & Dhanak, 2015).

$$k_{BS} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +T3 & -T5 & 0 & +T4 & +T6 \\ 0 & -T5 & +T1 & 0 & -T6 & -T2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +T4 & -T6 & 0 & +T3 & +T5 \\ 0 & +T6 & -T2 & 0 & +T5 & +T5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dimana

$$T1 = + \frac{2\phi(s'c' - sc)}{s'^2 - s^2} \frac{EI}{L} \quad (3)$$

$$T2 = + \frac{2\phi(sc' - cs')}{s'^2 - s^2} \frac{EI}{L} \quad (4)$$

$$T3 = + \frac{4\phi^3(sc + s'c')}{s'^2 - s^2} \frac{EI}{L^3} \quad (5)$$

$$T4 = + \frac{4\phi^3(sc' + cs')}{s'^2 - s^2} \frac{EI}{L^3} \quad (6)$$

$$T5 = + \frac{2\phi^2(s'^2 + s^2)}{s'^2 - s^2} \frac{EI}{L^2} \quad (7)$$

$$T6 = + \frac{4\phi^2 ss'}{s'^2 - s^2} \frac{EI}{L^2} \quad (8)$$

$$\phi = L \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \quad (9)$$

$$k = k_o b = \rho_w g b \quad (10)$$

s , s' , c , c' , ρ_w , g , dan b merupakan $\sin \phi$, $\sinh \phi$, $\cos \phi$, $\cosh \phi$, massa jenis air, percepatan gravitasi, dan lebar balok.

Gelombang air

Teori gelombang linear yang dikembangkan oleh Airy merupakan salah satu teori yang dapat digunakan dalam menentukan persamaan gelombang air dengan kedalaman yang konstan (Mei, Stiassnie, & Yue, 2018). Teori gelombang ini identik dengan karakteristik perairan dengan

kecuraman gelombang yang rendah ($H/gT^2 < 0.001$) dan kedalaman gelombang yang relatif tinggi ($d/gT^2 > 0.001$) dengan H , T , dan d merupakan tinggi gelombang, periode gelombang, dan kedalaman air. Kedalaman air adalah suatu besaran yang diukur dari dasar laut ke permukaan air tenang (*still water level*).

Kedalaman air laut dapat ditentukan berdasarkan lokasi tinjauan. Kedalaman air menjadi indikator untuk menentukan tipe perairan laut. Agar memenuhi persyaratan gelombang linear, tipe perairan harus berada dalam rentang perairan sedang. Adapun perairan sedang memiliki rasio kedalaman terhadap panjang gelombang $\frac{1}{20} < h/\lambda \leq 1/2$ dan untuk perairan dalam di rentang $h/\lambda > 1/2$. Penelitian ini akan meninjau struktur terapung dengan pergerakan dominan berupa *rigid motion* untuk tipe beban rigid dan fleksibel sebagaimana pada Gambar 1 harus memenuhi syarat sebagai Persamaan 11 – 13

Respons *rigid motion*

$$\frac{L}{\lambda} < 1 \quad (11)$$

Tipe struktur rigid

$$\frac{L}{\lambda_c} \leq 1 \quad (12)$$

Tipe struktur fleksibel

$$1 < \frac{L}{\lambda_c} < 10 \quad (13)$$

L merupakan panjang elemen. Nilai panjang gelombang yang diperoleh kemudian diiterasi kembali berdasarkan rumusan teori dispersi gelombang sesuai dengan teori gelombang pendek dengan rumus sebagai berikut (McCormick, 2010).

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \quad (14)$$

Froude-Krylov merupakan sebuah teori yang ditemukan oleh William Froude dan Alexei Krylov sekitar tahun 1870. Persamaan Froude-Krylov digunakan untuk memperkirakan gaya akibat gelombang pada struktur terapung dengan mempertimbangkan distribusi tekanan dari medan gelombang yang tidak terganggu (*undisturbed incident wave*) di sepanjang permukaan struktur yang terkena air, dengan persamaan dasar sebagai Persamaan 15 -17 (Dean & Dalrymple, 2015).

$$F_x = C_H \rho V \frac{\sinh\left(\frac{kl_3}{2}\right)}{\left(\frac{kl_3}{2}\right)} \frac{\sin\left(\frac{kl_1}{2}\right)}{\left(\frac{kl_1}{2}\right)} u_o \quad (15)$$

$$F_y = C_V \rho V \frac{\sinh\left(\frac{kl_3}{2}\right)}{\left(\frac{kl_3}{2}\right)} \frac{\sin\left(\frac{kl_1}{2}\right)}{\left(\frac{kl_1}{2}\right)} v_o \quad (16)$$

Dimana

$$V = l_1 l_2 l_3, \quad (17)$$

l_1 , l_2 , dan l_3 merupakan dimensi struktur ponton, serta k merupakan bilangan gelombang. Untuk bentuk struktur *rectangular block* berlaku nilai koefisien gaya Froude-Krylov horizontal (C_H) sebesar 1,5 dan koefisien gaya Froude-Krylov vertikal (C_V) sebesar 6. Dengan asumsi bahwa rentang nilai ka (parameter difraksi) sebesar 0 – 5,0. Berdasarkan teori gelombang linear, berlaku rumusan percepatan horizontal dan percepatan vertikal dari partikel gelombang sebagai ditunjukkan oleh Persamaan 18 dan 19.

$$\dot{u}_0 = \frac{du}{dt} = \frac{2\pi^2 H \cosh(ks)}{T^2 \sinh(kh)} \sin \theta \quad (18)$$

$$\dot{v}_0 = \frac{dw}{dt} = -\frac{2\pi^2 H \sinh(ks)}{T^2 \sinh(kh)} \cos \theta \quad (19)$$

Dinamika struktur dan metode elemen hingga

Secara umum, persamaan gerak struktur MDOF dapat diformulasikan dalam bentuk matriks sebagai Persamaan 20. Struktur diasumsikan tidak memiliki redaman sehingga interaksi air-struktur tidak diperhitungkan. Kekakuan struktur didapatkan dari kontribusi struktur yang ditinjau dan kontribusi kekakuan balok di atas fondasi. Untuk studi kasus struktur turbin angin terapung, terdapat tambahan massa yang terkonsentrasi pada ujung kolom kantilever (*lumped mass*). Sehingga, persamaan menjadi Persamaan 21 – 23

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{p\} \quad (20)$$

[M], [C], dan [K] merupakan matriks massa, redaman, dan kekakuan, $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, dan $\{u\}$ merupakan vektor percepatan, kecepatan, dan perpindahan, serta $\{p\}$ merupakan vektor gaya.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K + K_{bs}]\{u\} = \{P(x, t)\} \quad (21)$$

$$[M]_{\text{turbin terapung}} = [M + M_{\text{lumped}}] \quad (22)$$

$$[M]_{\text{rumah terapung}} = [M] \quad (23)$$

di mana $[M]$ merupakan matriks massa konsisten struktur, $[M_{\text{lumped}}]$ merupakan matriks massa terkonsentrasi pada ujung atas kolom kantilever, $[K]$ merupakan matriks kekakuan struktur, $[K_{bs}]$ matriks kekakuan struktur terapung (balok di atas fondasi elastis), $\{P(x, t)\}$ merupakan fungsi beban harmonik gelombang yang diaplikasikan pada struktur ponton, $\{\ddot{u}\}$ adalah vektor percepatan struktur, dan $\{u\}$ vektor perpindahan struktur.

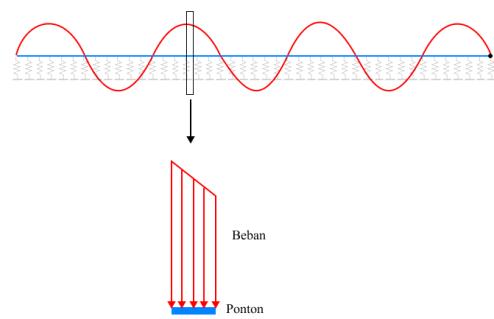
Penyelesaian persamaan dinamika struktur diselesaikan dengan metode numerik dengan metode yang digunakan merupakan metode Newmark-Beta. Metode Newmark merupakan metode yang umum digunakan dalam penyelesaian dinamika struktur karena memiliki kelebihan dalam menyelesaikan masalah persamaan diferensial orde

dua dapat diselesaikan dengan lebih cepat, sehingga *computational cost* menjadi lebih rendah (Chopra, 2017). Metode ini dipengaruhi oleh dua parameter yaitu β dan γ yang merupakan konstanta yang menunjukkan variasi percepatan yang terjadi pada setiap perubahan waktu. Dua tipe variasi pada metode Newmark adalah *constant average acceleration method* ($\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{4}$) dan *linear acceleration method* ($\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{6}$). Perhitungan numerik dapat dikatakan stabil jika kesalahan yang mungkin terjadi pada awal integrasi tidak teramplifikasi atau bertambah besar pada akhir integrasi numerik. Perhitungan numerik yang stabil disebut sebagai *conditionally stable*, sedangkan *unconditionally stable* terjadi apabila persyaratan tidak terpenuhi. Perhitungan numerik metode linear Newmark akan stabil jika memenuhi Persamaan 24

$$\frac{\Delta t}{T_n} \leq \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \times \frac{1}{\sqrt{\gamma-2\beta}} \quad (24)$$

dengan T_n merupakan periode natural struktur.

Metode elemen hingga (MEH) digunakan untuk mendiskritisasi struktur terapung menjadi elemen-elemen kecil agar analisis dapat dilakukan secara lokal dan menghasilkan hasil yang lebih akurat. Ilustrasi deskritisasi ditunjukkan pada Gambar 3. Pada struktur terapung yang ditinjau, beban yang bekerja berupa beban harmonik yang terdistribusi di sepanjang ponton. Dengan MEH, beban dapat direpresentasikan secara detail pada setiap elemen sehingga distribusi gaya dan respons struktur terhadap beban tersebut dapat dihitung dengan akurat. Dengan adanya diskritisasi elemen, beban harmonik yang terdistribusi di sepanjang ponton dapat diidealisasikan sebagai beban terdistribusi linear di setiap diskritisasi elemen sehingga menghasilkan perhitungan yang lebih akurat.



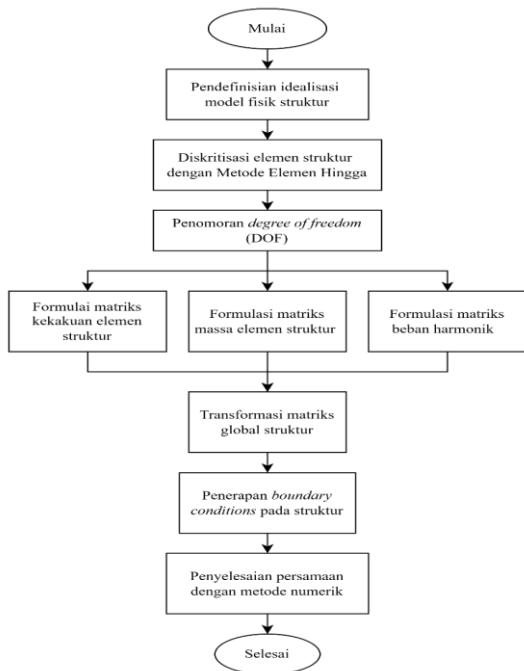
Gambar 3. Ilustrasi diskritisasi elemen pada ponton

Alur pemrograman

Simulasi respons dinamik struktur dibantu dengan menggunakan program komputer dengan bahasa pemrograman Julia. Penyelesaian permasalahan dalam bentuk diagram alir dapat dilihat pada

Gambar 4. Proses dimulai dengan pendefinisian dan idealisasi model fisik struktur yang akan dianalisis. Selanjutnya, dilakukan diskritisasi elemen struktur menggunakan Metode Elemen Hingga, di mana struktur dibagi menjadi elemen-elemen kecil agar dapat dianalisis secara numerik. Setelah itu, dilakukan penomoran derajat kebebasan (degree of freedom atau DOF) yang menentukan jumlah variabel independen dalam sistem.

Langkah berikutnya adalah formulasi matriks yang mencakup matriks kekakuan, matriks massa, dan matriks beban harmonik untuk merepresentasikan karakteristik dinamis struktur. Matriks-matriks elemen ini kemudian ditransformasikan menjadi matriks global struktur agar dapat dianalisis secara keseluruhan. Setelah itu, diterapkan kondisi batas (boundary conditions) yang sesuai dengan karakteristik struktur untuk memastikan keakuratan analisis.



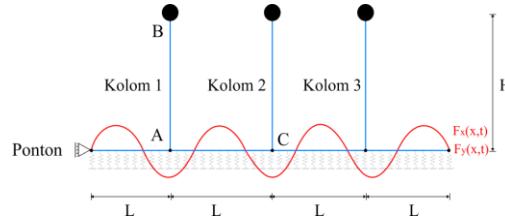
Gambar 4. Alur pemrograman

Tahap akhir dari simulasi ini adalah penyelesaian sistem persamaan menggunakan metode numerik, yakni metode Newmark-Beta, yang memungkinkan perhitungan respons dinamik struktur terhadap beban eksternal. Keseluruhan proses ini dibantu dengan program komputer menggunakan bahasa pemrograman Julia, yang meningkatkan efisiensi dalam pemodelan dan simulasi respon dinamik struktur terapung.

Parameter struktur

Struktur pertama yang ditinjau adalah struktur turbin angin terapung yang bertumpu pada platform

apung berupa ponton. Struktur turbin angin diidealisasikan sebagai struktur kolom kantilever dengan massa terkonsentrasi di bagian atasnya. Massa terkonsentrasi ini merupakan simplifikasi dari struktur baling-baling. Adapun struktur apung berupa ponton diidealisasikan pada ruang dua dimensi sebagai balok di atas fondasi elastis yang dapat ditinjau pada Gambar 5.



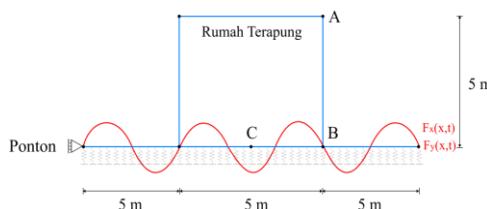
Gambar 5. Struktur turbin angin terapung

Hubungan antara ponton dan struktur turbin diasumsikan jepit untuk merepresentasikan sambungan yang kaku tanpa rotasi atau perpindahan relatif. Struktur dikekang secara horizontal untuk membatasi pergerakan horizontal akibat gaya lateral gelombang, serta untuk mewakili kondisi struktur terapung yang ditambat atau terikat. Kekangan horizontal diasumsikan terkekang secara penuh. Parameter dari struktur ponton yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada referensi yang terdapat pada katalog Eurocode SS-EN1992-1-1 dengan sedikit penyesuaian sehingga dapat dihasilkan tipe struktur ponton yang rigid. Sementara itu, parameter dari struktur turbin angin yang digunakan mengacu pada referensi yang terdapat pada Katalog Turbin Angin Kecil yang diterbitkan oleh *World Wind Energy Association* untuk tipe model SWP-25-14TG20 (lihat Tabel 1).

Tabel 1. Parameter struktur turbin angin terapung

Parameter	Nilai	Satuan
Struktur ponton :		
Lebar, B_p	6	m
Kedalaman, D_p	2	m
Panjang, L_p	60	N/m ²
Modulus Elastisitas, E_p	4×10^{10}	kg/m ³
Massa Jenis, ρ_p	2500	m ²
Luas Area, A_p	12	m ⁴
Momen Inersia, I_p	4	N/m ³
Kekakuan Hidrostatik, k_s	9810	m
Struktur turbin angin :		
Diameter, D	1,4	m
Tinggi, H	25	m
Modulus Elastisitas, E	$2,1 \times 10^{11}$	N/m ²
Massa Jenis, ρ	7850	kg/m ³
Luas Area, A	1,515	m ²
Momen Inersia, I	0,183	m ⁴
Massa Terkonsentrasi, JM	1929	kg

Struktur kedua merupakan struktur yang terdiri dari balok pada struktur bawah sebagai idealisasi ponton dan struktur atasnya berupa portal satu lantai (Gambar 6). Untuk penentuan nilai-nilai parameter struktur yang akan dianalisis, terdiri dari panjang balok pada bagian dasar dan tinggi kolom digunakan referensi nilai dari Bagaskoro (2022).



Gambar 6. Struktur rumah terapung

Penyesuaian dilakukan untuk menentukan properti elemen, seperti modulus elastisitas, momen inersia, massa jenis, dan luas area struktur. Adapun parameter penyesuaian yang dilakukan yaitu dimensi (lebar dan kedalaman), modulus elastisitas, massa jenis, luas area, dan momen inersia. Penentuan ini diambil dari Marina (2023) di mana struktur ponton yang ditinjau merupakan struktur ponton beton tipe SF1860 dengan dimensi $15 \times 6 \times 1,8\text{ m}$. Untuk struktur atas yang berupa kolom dan balok, parameter akan digunakan profil baja dengan ukuran $W10 \times 10 \times 68$ untuk kolom dan $W8 \times 5,25 \times 21$ untuk balok. Jumlah elemen untuk setiap balok dan kolom tinjauan diasumsikan berjumlah dua untuk setiap bagian sehingga nilai luas area dan inersia bermakna dua kali. Parameter struktur dapat dilihat pada Tabel 2. Hubungan antara ponton dan struktur rumah diasumsikan fixed untuk merepresentasikan sambungan yang kaku tanpa rotasi atau perpindahan relatif. Struktur dikekang secara horizontal pada bagian kiri.

Tabel 2. Parameter struktur rumah terapung

Parameter	Nilai	Satuan
Struktur ponton :		
Lebar, B_p	6	m
Kedalaman, D_p	1,8	m
Panjang, L_1, L_2 , dan L_3	5	N/m^2
Modulus Elastisitas, E_p	$3,52 \times 10^{10}$	kg/m^3
Massa Jenis, ρ_p	2500	m^2
Luas Area, A_p	10,8	m^4
Momen Inersia, I_p	2,916	N/m^3
Kekakuan hidrostatis, k_s	9810	m
Struktur rumah terapung:		
Lebar, L_2	5	m
Tinggi, H	5	m
Modulus elastisitas, E	2×10^{11}	N/m^2
Massa Jenis, ρ	7850	kg/m^3
Luas area balok, A_{balok}	0,00392722	m^2
Luas area kolom, A_{kolom}	0,01275303	m^2
Momen inersia balok, I_{balok}	0,0000556	m^4
Momen inersia kolom, I_{kolom}	0,00000407	m^4
Massa Terkonsentrasi, JM	1929	kg

Parameter pembebanan

Beban yang diaplikasikan pada struktur tinjauan adalah berupa beban gelombang laut. Nilai parameter-parameter beban gelombang yang digunakan mengacu pada referensi Wang (2022) dengan sedikit penyesuaian. Wang (2022) melakukan penelitian terhadap model analitis dari suatu struktur perkotaan terapung untuk perluasan pantai. Struktur apung yang ditinjau berupa ponton sehingga cukup relevan dengan tinjauan pada penelitian ini. Kedalaman laut yang digunakan pada penelitian ini diasumsikan sebesar 30 meter. Mengacu pada referensi Wang (2022), umumnya pada kedalaman ini suatu struktur terapung menjadi lebih ekonomis secara signifikan dibanding tanah reklamasi tradisional.

Nilai periode gelombang dan ketinggian gelombang yang mengacu pada kondisi laut operasional untuk desain MFS (*Modular Floating Structure*) yang digunakan pada penelitian Wang *et al.* (2021). Ketinggian gelombang yang digunakan pada penelitian ini disesuaikan agar memenuhi persyaratan teori gelombang linear. Periode gelombang yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada salah satu nilai yang digunakan Wang *et al.* (2021) dengan tetap menyesuaikan agar memenuhi persyaratan teori gelombang linear, yaitu 3,85 detik. Dengan Teori Froude-Krylov, dapat dihitung besar gaya yang dihasilkan oleh suatu gelombang. Tabel 3 merupakan hasil perhitungan beban gelombang pada arah horizontal dan vertikal yang diaplikasikan pada ponton. Agar beban yang terjadi tidak menyebabkan adanya efek impuls (beban impak), maka akan digunakan $t = 10$ detik untuk beban berosilasi hingga mencapai amplitudo maksimumnya.

Tabel 3. Parameter pembebanan

Parameter	Persamaan (kN)
Struktur turbin angin terapung:	
Gaya horizontal, F_x	$7,592 \sin(0,271x - 1,632t)$
Gaya vertikal, F_y	$-30,367 \sin(0,271x - 1,632t)$
Struktur rumah terapung:	
Gaya Horizontal, F_x	$-4,415 \sin(0,699x - 2,618t)$
Gaya Vertikal, F_y	$17,662 \cos(0,699x - 2,618t)$

Hasil dan Pembahasan

Struktur turbin angin terapung

Berdasarkan grafik respons perpindahan dan percepatan struktur (Gambar 7), dapat diketahui kecenderungan perpindahan dan percepatan struktur di titik A, B, dan C untuk sepanjang interval waktu yang ditinjau. Pada respons perpindahan dan percepatan horizontal, di titik B terjadi variasi nilai terhadap waktu, sedangkan pada titik A dan C

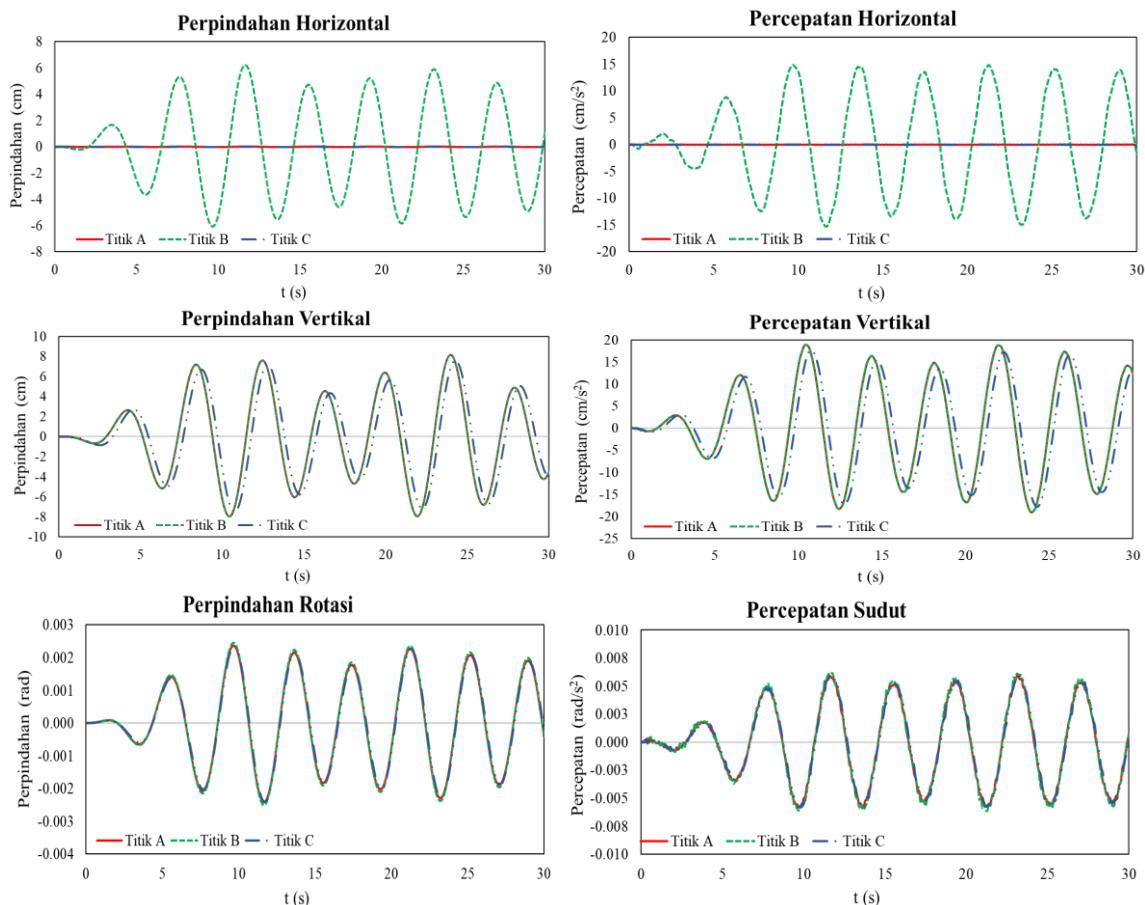
cenderung konstan dengan nilai yang sangat kecil. Ini berarti bahwa pada kondisi struktur yang rigid dan beban gelombang yang rigid, respons perpindahan dan percepatan horizontal lebih dominan terjadi pada ujung atas kolom dibandingkan pada ponton (struktur bawah).

Pada respons perpindahan dan percepatan vertikal, di titik A dan B cenderung berfluktuasi dengan kurva yang saling berhimpit. Hal ini menandakan bahwa titik ujung atas dan ujung bawah kolom 1 mengalami respons vertikal yang bersamaan dengan besar yang sama. Ini sesuai dengan kondisi struktur bahwa pada titik tersebut saling terhubung secara vertikal dan struktur yang didesain bersifat rigid. Selain itu, dapat dilihat pula bahwa kurva perpindahan dan percepatan vertikal di titik C cenderung mendahului titik A dan B. Ini dikarenakan adanya pengaruh osilasi gelombang air di mana respons struktur menyerupai sifat gelombang, yaitu bersifat transien.

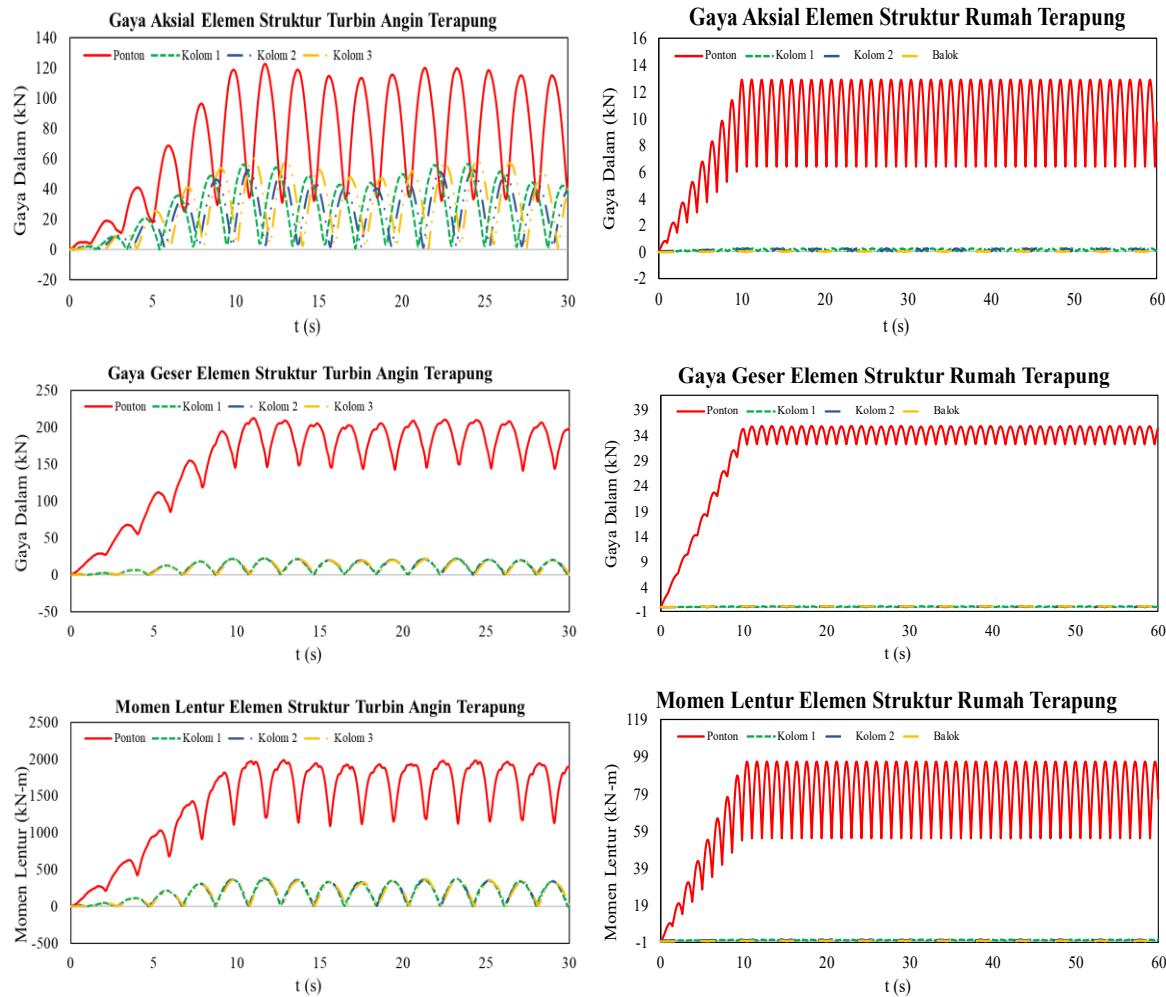
Pada respons rotasi dan percepatan sudut, pada titik A, B, dan C cenderung memiliki respons yang sama dan berfluktuasi secara harmonik terhadap waktu. Hal ini menunjukkan bahwa respons yang

dihasilkan struktur terhadap beban harmonik yang diberikan merupakan respons rigid, baik respons pada struktur bawah maupun struktur atas, dan membuktikan ada kesesuaian antara hasil dan asumsi yang digunakan. Kemudian, dilakukan pengambilan data untuk perpindahan maksimum, berupa perpindahan maksimum *drift column* horizontal, perpindahan vertikal maksimum (*heave*), serta maksimum rotasi (*pitch*) yang terjadi pada struktur bawah.

Penentuan *maximum drift column* horizontal ditinjau dari perpindahan pada titik kolom bagian atas dikurangi dengan perpindahan pada titik kolom bagian bawah dan dicari nilai maksimum dalam rentang waktu yang ditinjau. *Heave* maksimum ditinjau dari nilai perpindahan vertikal maksimum yang terjadi di sepanjang elemen balok struktur bawah. Nilai maksimum rotasi (*pitch*) pada balok struktur bawah ditinjau dari nilai kemiringan balok struktur bawah maksimum yang terjadi. *Heave* dan *pitch* sendiri merupakan parameter gerakan utama yang umum dianalisis pada struktur terapung, karena keduanya mencerminkan respons vertikal dan rotasional platform terhadap gelombang dan beban lingkungan (Iovinelli et al., 2021).



Gambar 7. Respons perpindahan dan percepatan struktur turbin angin terapung



Gambar 8. Respons gaya dalam struktur turbin angin terapung dan rumah terapung

Respons maksimum untuk *drift* didapatkan nilai 61,968 mm, *heave* sebesar 104,31 mm, *pitch* sebesar $0,141^{\circ}$, percepatan lateral 0,15 m/s², dan percepatan vertikal 0,19 m/s. Pada Gambar 9 dapat terlihat respons struktur turbin angin terapung yang terjadi ketika *heave* maksimum yang terjadi pada bagian ujung kiri.

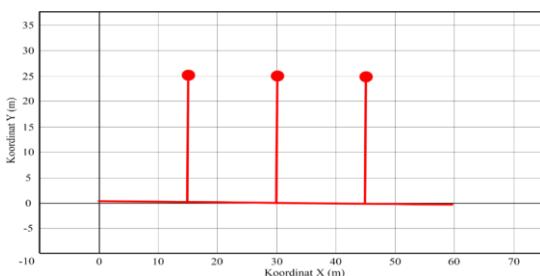
Ditinjau pula respons gaya dalam maksimum (aksial, momen, dan geser) untuk setiap waktunya. Gaya dalam yang ditinjau dibagi menjadi 4 bagian, yaitu ponton secara keseluruhan, kolom satu, kolom dua, dan kolom tiga. Gambar 8 menunjukkan respons dinamik gaya dalam (aksial maksimum, geser maksimum, dan momen maksimum) struktur yang ditinjau untuk struktur bawah (ponton) dan struktur atas (kolom) pada tiap interval waktu. Secara keseluruhan, respons gaya dalam pada struktur kolom dan ponton memiliki kecenderungan yang bervariasi terhadap waktu. Ini dikarenakan beban yang diaplikasikan pada struktur merupakan beban harmonik terdistribusi dengan peningkatan yang bertahap. Selain itu, secara keseluruhan struktur ponton memiliki nilai gaya dalam yang

jauh lebih besar daripada struktur atas. Hal ini sesuai dikarenakan beban harmonik diaplikasikan pada struktur bawah dan adanya pengaruh kekangan horizontal serta kekangan dari pegas (kekakuan hidrostatis) pada struktur bawah.

Besar gaya dalam aksial maksimum pada struktur bawah apabila diurutkan dari yang paling besar terdiri dari balok tepi kiri, balok tengah kiri, dan balok tepi kanan. Ini menandakan bahwa semakin dekat dengan kekangan horizontal, gaya dalam aksial balok yang dihasilkan akan semakin besar. Pada struktur atas, apabila dibandingkan antara kolom 1, kolom 2, dan kolom 3, nilai gaya dalam aksial pada kolom 1 dan 3 cenderung lebih besar. Ini sesuai dengan letak kolom, di mana kolom 1 dan 3 berada di tepi sedangkan kolom 2 berada di tengah. Oleh karena itu kolom 2 cenderung lebih stabil.

Nilai gaya dalam aksial maksimum pada struktur bawah sebesar 122,53 kN, sedangkan gaya aksial maksimum struktur atas sebesar 60,11 kN sehingga persen rasio gaya aksial maksimum struktur atas terhadap struktur bawah sebesar 49,06%. Gaya

dalam geser dan momen pada struktur atas cenderung memiliki nilai yang sama untuk kolom 1, kolom 2, dan kolom 3. Ini dikarenakan parameter struktur yang digunakan untuk ketiga kolom adalah sama. Gaya dalam geser dan momen pada struktur bawah didapatkan memiliki nilai yang cukup besar dengan nilai geser maksimum dengan nilai 212,84 kN dan momen maksimum 1987,24 kNm. Untuk struktur atas sendiri, nilai gaya dalam geser memiliki nilai maksimum 22,92 kN dan gaya dalam momen 380,95 kNm. Adapun persen rasio gaya geser dan momen maksimum struktur atas terhadap struktur bawah sebesar 10,77% dan 19,17%. Nilai gaya dalam geser dan momen memiliki nilai yang lebih besar dari gaya dalam aksial karena adanya tambahan kekakuan dari fondasi elastis yang merupakan idealisasi gaya apung struktur pada air.



Gambar 9. Respons struktur turbin angin terapung pada saat heave maksimum

Struktur rumah terapung

Berdasarkan grafik keluaran perpindahan dan percepatan struktur pada titik A, B, dan C (lihat Gambar 10), dapat diketahui bagaimana respons struktur yang terjadi akibat beban harmonik yang diberikan. Pada arah horizontal, nilai perpindahan dan percepatan pada titik A terlihat memiliki nilai yang berubah-ubah setiap waktunya, tetapi pada titik B dan C tidak terdapat nilai perpindahan dan percepatan. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada balok struktur bawah tidak terdapat perpindahan dalam arah horizontal dikarenakan adanya kekangan dalam arah horizontal pada ujung kiri struktur bawah.

Pada arah vertikal, nilai perpindahan dan percepatan memiliki besaran yang serupa. Nilai perpindahan dan percepatan arah vertikal pada titik A dan B memiliki respons yang sama persis, sedangkan pada titik C respons yang dihasilkan merupakan respons yang mendahului dari respons titik A dan B. Hal tersebut menunjukkan bahwa kolom struktur atas (titik A dan B) bergerak secara bersamaan sehingga dapat diketahui respons kolom struktur atas merupakan respons *rigid*. Untuk perpindahan rotasi dan percepatan sudut, nilai pada titik A, B, dan C memiliki nilai yang sama dengan respons yang sama persis. Hal ini menunjukkan

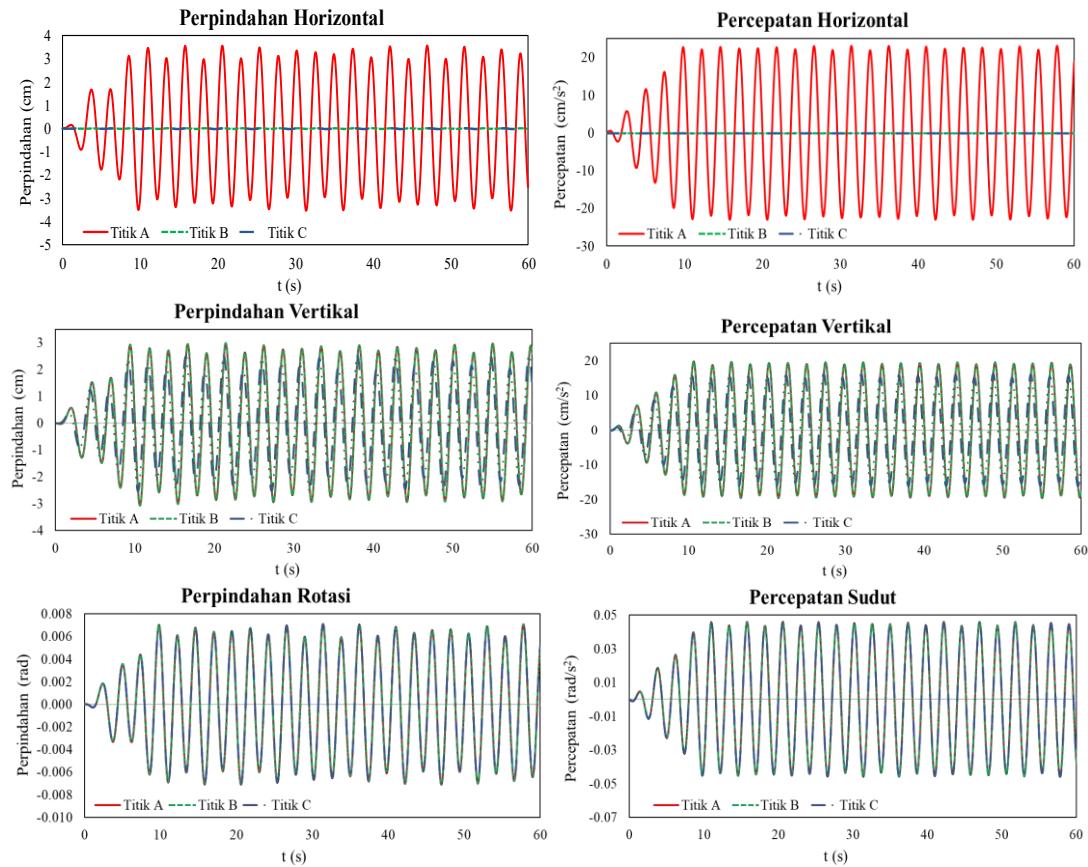
bahwa respons yang dihasilkan struktur terhadap beban harmonik yang diberikan merupakan respons rigid, baik respons pada struktur bawah maupun struktur atas.

Kemudian, dilakukan pengambilan data untuk perpindahan maksimum, berupa perpindahan *maximum drift column horizontal*, perpindahan vertikal maksimum (*heave*), serta maksimum rotasi (*pitch*) yang terjadi pada struktur bawah. Respons maksimum untuk *drift* didapatkan nilai 35,587 mm, *heave* sebesar 60,621 mm, *pitch* sebesar 0,408°, percepatan lateral 0,230 m/s², dan percepatan vertikal 0,198 m/s². Pada Gambar 11 dapat terlihat respons struktur rumah terapung yang terjadi ketika *heave* maksimum terjadi pada bagian ujung kiri.

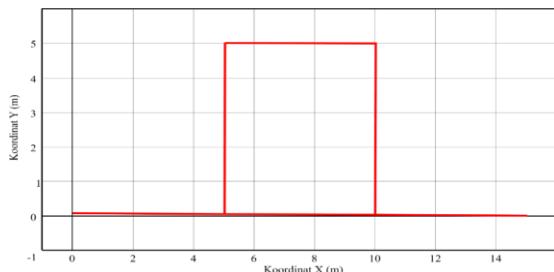
Gambar 8 menunjukkan bahwa respons dinamik gaya dalam (aksial, geser, dan momen) struktur yang ditinjau untuk struktur bawah dan struktur atas. Pada struktur bawah, balok tepi 1 merupakan balok struktur bawah pada bagian tepi yang memiliki kekangan horizontal, balok tepi 2 merupakan balok pada bagian ujung yang tidak dikekang, dan balok tengah yang terletak di bawah struktur atas. Untuk struktur atas akan ditinjau untuk kolom 1, kolom 2, dan balok atas. Gaya dalam aksial pada struktur bawah memiliki nilai yang jauh lebih besar daripada struktur atas. Hal ini sesuai dikarenakan pada balok struktur bawah terdapat beban harmonik dalam arah horizontal dan adanya kekangan horizontal yang terletak pada ujung kiri balok sehingga distribusi gaya dalam akibat beban tersebut terjadi pada balok struktur bawah dan struktur atas hanya merespons akibat adanya beban pada struktur bawah.

Pada struktur atas, nilai gaya aksial balok atas lebih kecil daripada kolom dikarenakan nilai gaya aksial kolom dipengaruhi oleh adanya beban harmonik vertikal yang bekerja pada struktur bawah. Nilai gaya aksial maksimum pada struktur bawah sebesar 12,902 kN, sedangkan gaya aksial maksimum pada struktur atas sebesar 0,242 kN sehingga persen rasio gaya aksial maksimum struktur atas terhadap struktur bawah sebesar 1,87%.

Pada gaya dalam geser dan momen struktur bawah, nilai yang didapatkan memiliki nilai yang cukup besar dengan nilai geser maksimum dengan nilai 35,958 kN dan momen maksimum 96,333 kNm. Hal ini disebabkan karena beban harmonik vertikal yang bekerja pada balok struktur bawah sehingga distribusi gaya dalam akibat beban tersebut dominan bekerja pada struktur bawah. Nilai gaya geser dan momen memiliki nilai yang lebih besar daripada gaya aksial karena adanya tambahan kekakuan dari fondasi elastis yang merupakan idealisasi gaya apung struktur pada air.



Gambar 10. Respons perpindahan dan percepatan struktur terapung



Gambar 11 Respons struktur rumah terapung saat heave maksimum

Untuk struktur atas sendiri, nilai gaya dalam geser memiliki nilai maksimum 0,151 kN dan gaya dalam momen 0,491 kNm. Adapun persen rasio gaya geser dan momen maksimum struktur atas terhadap struktur bawah sebesar 0,42% dan 0,51%. Urutan gaya dalam aksial maksimum dari paling besar diurutkan yaitu balok tepi 1, balok tepi 2, dan balok tengah. Sedangkan untuk urutan gaya dalam geser dan momen maksimum dari paling besar yaitu balok tengah, tepi 2, dan tepi 1. Nilai gaya dalam aksial maksimum pada setiap balok struktur bawah memiliki nilai yang tidak berbeda secara signifikan, dengan rentang gaya dalam aksial 12,574 kN hingga 12,902 kN. Hal ini menunjukkan pada setiap bagian balok struktur bawah terjadi gaya dalam aksial

maksimum yang cenderung sama. Sedangkan, gaya dalam geser dan momen balok memiliki nilai yang jauh lebih besar pada balok tengah terhadap balok tepi. Hal ini menunjukkan bahwa adanya tambahan kekakuan akibat struktur atas memberikan gaya dalam yang lebih besar pada balok tengah.

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat diketahui respons struktur terapung berupa turbin angin terapung dan rumah terapung akibat gelombang air adalah sebagai berikut:

Pada struktur turbin angin terapung, respons maksimum untuk *drift* didapatkan nilai 61,968 mm, *heave* sebesar 104,31 mm, *pitch* sebesar $0,141^0$, percepatan lateral $0,15 \text{ m/s}^2$, dan percepatan vertikal $0,19 \text{ m/s}$. Nilai gaya dalam aksial maksimum pada struktur bawah sebesar 122,53 kN, sedangkan gaya aksial maksimum pada struktur atas sebesar 60,11 kN. Gaya dalam geser dan momen pada struktur bawah didapatkan memiliki nilai yang cukup besar dengan nilai geser maksimum dengan nilai 212,84 kN dan momen maksimum 1987,24 kNm, sedangkan pada struktur atas, nilai gaya dalam geser memiliki nilai maksimum 22,92 kN dan gaya dalam momen 380,95 kNm.

Pada struktur rumah terapung, respons maksimum untuk *drift* didapatkan nilai 35,587 mm, *heave* sebesar 60,621 mm, *pitch* sebesar 0,408°, percepatan lateral 0,230 m/s², dan percepatan vertikal 0,198 m/s². Nilai gaya aksial maksimum pada struktur bawah sebesar 12,902 kN, sedangkan gaya aksial maksimum pada struktur atas sebesar 0,242 kN. Gaya dalam geser dan momen struktur bawah, nilai yang didapatkan memiliki nilai yang cukup besar dengan nilai geser maksimum dengan nilai 35,958 kN dan momen maksimum 96,333 kNm. Untuk struktur atas sendiri, nilai gaya dalam geser memiliki nilai maksimum 0,151 kN dan gaya dalam momen 0,491 kNm.

Apabila dibandingkan terhadap kedua struktur tersebut, rasio *drift* terhadap tinggi struktur bernilai 0,00248 pada turbin angin dan 0,00712 pada rumah terapung. Sementara itu, rasio *heave* terhadap kedalaman ponton sebesar 0,052 untuk turbin angin dan 0,0336 untuk rumah terapung. Hal tersebut menunjukkan rumah terapung memiliki deformasi lateral yang relatif lebih besar, sedangkan turbin angin menunjukkan respons vertikal yang dominan.

Hasil penelitian yang dilakukan diharapkan dapat menjadi acuan dasar dalam penelitian selanjutnya untuk desain struktur rumah terapung berupa struktur turbin angin terapung dan rumah terapung.

Daftar Pustaka

Bagaskoro, Adika. (2022). Studi Respon Interaksi Air-Struktur Terapung Sebagai Alternatif Sistem Isolasi Dasar, *Master Thesis*, Indonesia: Institut Teknologi Bandung.

Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (5th ed.). Pearson Education.

Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (2015). *Waves and wave forces on coastal and ocean structures* (2nd ed.). World Scientific Publishing Company.

Iovinelli, R., Conte, D., & Brizzolara, S. (2021). Effect of blade pitch control on dynamic characteristics of a floating offshore wind turbine under platform pitching motion. *Ocean Engineering*, 229:109109.

Jamshed, Rehan. (2017). One-Dimensional Advanced Beam Models for Marine Structural Applications.
doi: 10.6092/polito/porto/2680980.

Lehman, W., & Castaings, M. (2013). Beam on elastic foundation: analytical and FEM approaches

Marina, SF. (2023). *Concrete Pontoon Type SF1800*. 1800. Retrieved (<https://sfmarina.com/solutions/concrete-pontoons/#sfconcretepontoons>).

Mei, C. C., Stiassnie, M., & Yue, D. Y.-P. (2018). *Theory and applications of ocean surface waves: Part 1: Linear aspects* (3rd ed.). World Scientific Publishing Company.

Perkins, A., & Murthy, S. (2021). *Sustainable floating housing design: Integrating renewable energy and resilient architecture*. *Journal of Sustainable Architecture*, 15(3), 211–225. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sarch.2021.03.005>

Suzuki, H., T. A. Shugar, B. Bhattacharya, H. R. Riggs, H. Seto, D. A. Hudson, M. Fujikubo, Y. Yasuzawa, and H. Shin. (2007). Very Large Floating Structures. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE* 2(October):597–608.

doi: [10.1115/OMAE2007-29758](https://doi.org/10.1115/OMAE2007-29758).

Wang, C. K. (1985). *Intermediate Structural Analysis*.

Wang, L., Li, Y., & Chen, Z. (2020). *Advances in floating offshore structures: Materials, design methods, and control systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 110093. doi: [10.1016/j.rser.2020.110093](https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110093)

Wang, Gil, Yehiel Rosenfeld, Nitai Drimer, and Yiska Goldfeld. (2021). Occupant Comfort Analysis for Rigid Floating Structures—Methodology and Design Assessment for Offshore Dwelling Module. *Ships and Offshore Structures* 16(2):184–99.

doi: [10.1080/17445302.2020.1718267](https://doi.org/10.1080/17445302.2020.1718267).

Wang, Shengzhe. (2022). Analytical Solutions for the Dynamic Analysis of a Modular Floating Structure for Urban Expansion. *Ocean Engineering* 266(December). doi: [10.1016/j.oceaneng.2022.112878](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112878).

Zhang, Min, and Sebastian Schreier. (2022). Review of Wave Interaction with Continuous Flexible Floating Structures. *Ocean Engineering* 264:112404.

doi: [10.1016/j.oceaneng.2022.112404](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112404).

Zhu, S., & Dhanak, M. R. (2015). Numerical modeling of floating structures with beam-foundation idealization. *Coastal Engineering*, 102