

PERANCANGAN AWAL STRUKTUR KONVERTER ENERGI GELOMBANG TIPE *POINT* *ABSORBER* GERAK *PITCHING*

TUGAS AKHIR

Karya tulis sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

Penyusun:

Muhammad Rizki Ziarieputra 15516030

Dosen Pembimbing:

Krisnaldi Idris, Ph.D.

NIP. 19581220 198601 1 001



**PROGRAM STUDI TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN LINGKUNGAN
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG**

2020



**PROGRAM STUDI TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL & LINGKUNGAN
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG**

Lembar Pengesahan

Tugas Akhir Sarjana

**PERANCANGAN AWAL STRUKTUR KONVERTER ENERGI
GELOMBANG TIPE POINT ABSORBER GERAK PITCHING**

Adalah benar dibuat oleh saya sendiri dan belum pernah dibuat dan diserahkan sebelumnya baik sebagian atau pun seluruhnya, baik oleh saya mau pun orang lain, baik di ITB maupun institusi pendidikan lainnya.

Jakarta, 29 September 2020

Penulis

Muhammad Rizki Ziarieputra

NIM 15516030



Bandung, 29 September 2020

Pembimbing

Krisnaldi Idris, Ph.D.

NIP 19581220 198601 1 001

Mengetahui:

Program Studi Teknik Kelautan
Ketua,

Andojo Wurjanto, Ph.D.

NIP 1960330 198503 1 007

PERANCANGAN AWAL STRUKTUR KONVERTER ENERGI GELOMBANG TIPE *POINT ABSORBER* GERAK *PITCHING*

Initial Design of The Structure of Pitching Motion Point Absorber Type Wave Energy Converter

Muhammad Rizki Ziarieputra¹ dan Krisnaldi Idris²

Program Studi Teknik Kelautan
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung
Jln. Ganeca 10 Bandung 40132

¹rizkizrp@gmail.com dan ²krisnaldi@gmail.com

Abstrak: Kebutuhan energi terus meningkat. Untuk memenuhi kebutuhan itu, pemanfaatan sumber daya konvensional seperti minyak dan batu bara masih menjadi usaha utama. Sumber daya konvensional tersebut tetapi memiliki masalah yaitu cadangannya yang semakin menipis serta dampak lingkungannya yang merugikan. Untuk itu pemanfaatan energi terbarukan diperlukan untuk menanggulangi masalah yang dihadapi. Pada Tugas Akhir ini, dilakukan perancangan awal struktur konverter energi gelombang tipe *point absorber* untuk gerak *pitching* sebagai usaha pemanfaatan energi terbarukan. Lingkup pembahasan dalam Tugas Akhir ini mencakup perhitungan kinerja serta penentuan nilai *hydrodynamic efficiency* dari tiga bentuk struktur yang berbeda. Perhitungan kinerja dilakukan melalui tahapan analisis statik serta analisis dinamik pada struktur. Didapatkan kinerja ketiga struktur baik pada area sekitar kombinasi gelombang tinggi 2.5 m dan periode 3.5 detik dan kurang baik pada area sekitar kombinasi gelombang tinggi 0.5 m dan periode 10 detik. Tiap struktur kemudian dihitung daya teknis yang dapat dihasilkan pada empat lokasi tinjauan dengan tinggi (m) dan periode (detik) signifikan masing-masing lokasi yaitu Hs1Ts4, Hs1.5Ts6, Hs2Ts8, dan Hs2Ts5 untuk kemudian dihitung nilai *Capture Width Ratio* (CWR) tiap struktur sebagai parameter *hydrodynamic efficiency*.

Kata Kunci: Energi, Kinerja, CWR.

Abstract: Energy demands keep on rising. To comply, the use of conventional resources of energy such as oil and coal is still the main preference. Yet, the use of these conventional resources had it problems such as a decline in resource quantity and negative environmental effect. The use of alternative renewable energy then is needed to cope with this problem. This Final Project contains the initial design of the structure of pitching motion point absorber type wave energy converter as an effort to exploit renewable energy. The scope of the study consist of calculation of performance and hydrodynamic efficiency parameter of 3 designed structure. Calculation of structure performance started with static analysis on the structure to determine its stability and continued with dynamic analysis to obtain structure response due to wave force. Structure response was then used to compose the structure performance matrix. It is obtained that all three structures have good performance at an area around the wave combination wave height of 2.5 m and a period of 3.5 seconds. Each structure performance matrix was then used to calculate the technical energy at 4 different locations with the value of significant wave height (m) and significant wave period (s) of Hs1Ts4, Hs1.5Ts6, Hs2Ts8, and Hs2Ts5 which is used to calculate the hydrodynamic efficiency parameter which is the *Capture Width Ratio* (CWR).

Keywords: Energy, Performance, CWR

PENDAHULUAN

Konsumsi energi listrik tumbuh secara eksponensial. Sebagian besar pembangkit listrik yang ada untuk memenuhi kebutuhan sekarang berasal dari sumber konvensional yaitu sumber daya alam yang tidak dapat diperbaharui/tidak terbarukan seperti minyak, batubara, dan gas alam. Sumber energi konvensional tersebut akan habis seiring berjalannya waktu. Selain itu, dampak dari pemanfaatan energi konvensional saat ini semakin merusak lingkungan. Oleh karena itu, energi laut sebagai salah satu energi baru terbarukan dinilai semakin dibutuhkan

Pada Tugas Akhir ini akan dibahas perancangan awal untuk struktur konverter energi gelombang. Perancangan awal mencakup perhitungan kinerja dari struktur serta perhitungan efisiensi struktur dalam menangkap energi gelombang.

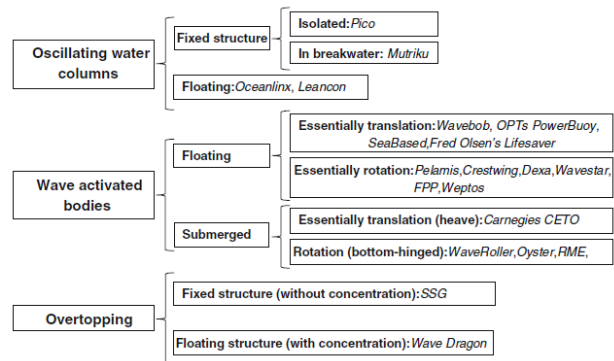
TEORI DAN METODOLOGI

Perancangan struktur dimulai dengan menentukan desain konverter energi gelombang. Klasifikasi konverter energi gelombang yang paling dasar dan umum digunakan adalah berdasarkan bentuk konverter. Klasifikasi tersebut dibagi menjadi:

1. *Terminator*, memiliki rentang horisontal yang besar dan tegak lurus dengan arah rambat gelombang
2. *Attenuator*, memiliki rentang horisontal yang besar dan sejajar arah rambat gelombang
3. *Point Absorber*, memiliki ukuran relatif kecil dibandingkan dengan panjang gelombang

Klasifikasi berdasarkan prinsip kerja konverter menurut *European Marine Energy Center*

dibagi menjadi 8 tipe utama dan 1 tipe tambahan dan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Klasifikasi WEC

Sumber: Handbook of Ocean Wave Energy, A. Pecher & J. P. Kofoed

Kemudian dilakukan kajian dan analisis respon struktur dengan melakukan validasi data pemodelan struktur. Dilakukan analisis statik pada struktur untuk menguji kestabilan struktur. Pada kondisi statik, struktur terapung mengalami dua gaya dalam arah vertikal, yaitu gaya berat dari struktur tersebut serta gaya apung. Gaya apung berdasarkan Hukum *Archimedes* mengikuti Pers. (1)

$$F_b = \rho_f \times g \times \nabla \quad (1)$$

Keterangan:

- F_b = gaya apung [N]
 ρ_f = massa jenis fluida [kg/m³]
 g = percepatan gravitasi [m/s²]
 ∇ = volume benda tercelup [m³]

Kestabilan struktur terapung terbagi dalam tiga kondisi yakni:

1. Kondisi stabil, merupakan kondisi pada saat titik metasentris (M) berada diatas titik pusat gravitasi benda (GM positif).
2. Kondisi netral, merupakan kondisi pada saat titik metasentris (M)

berada tepat pada titik pusat gravitasi benda ($GM=0$).

3. Kondisi tidak stabil, merupakan kondisi pada saat titik metasentris (M) berada dibawah titik pusat gravitasi benda (GM negatif).

Kondisi-kondisi tersebut dapat dituliskan dalam Pers. (2).

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG} \quad (2)$$

Nilai $\overline{BM}$ dapat dihitung dengan Pers. (3)

$$\overline{BM} = \frac{I}{\nabla} \quad (3)$$

dimana:

$\overline{GM}$ = jarak titik pusat gaya gravitasi ke titik metasentris [m]

$\overline{KB}$ = jarak dasar struktur (*keel*) ke titik pusat gaya apung [m]

$\overline{BM}$ = jarak titik pusat gaya apung ke titik metasentris [m]

$\overline{KG}$ = jarak dasar struktur (*keel*) ke titik pusat gaya gravitasi [m]

I = momen inersia dari bidang air [m⁴]

∇ = volume benda tercelup [m³]

Setelah mengecek kestabilan struktur, dilakukan analisis dinamik pada struktur untuk 2 kondisi yaitu kondisi *free vibraion* dan kondisi *forced vibration* dengan adanya gaya gelombang.

Analisis dilakukan dengan metode analitik dan pemodelan untuk struktur sederhana atau disebut struktur awal. Dengan metode analitik, disusun persamaan gerak struktur tergantung dengan gaya-gaya yang bekerja pada struktur.

Persamaan gerak respon struktur untuk gerakan translasional dituliskan pada Pers. (4)

$$\sum F = m\ddot{x} \quad (4)$$

Persamaan gerak respon struktur untuk gerakan rotasional dituliskan pada Pers. (5)

$$\sum M = I\ddot{\theta} \quad (5)$$

Solusi dari persamaan gerak respon struktur rotasional yang termasuk dalam kategori *free vibration* dapat menggunakan Pers. (6)

$$\begin{aligned} I\ddot{\theta} + K\theta &= 0 \\ \theta &= A \sin \omega_n t + B \cos \omega_n t \\ \dot{\theta} &= A\omega_n \cos \omega_n t - B\omega_n \sin \omega_n t \end{aligned} \quad (6)$$

Solusi dari persamaan gerak respon struktur rotasional yang termasuk dalam kategori *damped free vibration* dapat menggunakan Pers. (7)

$$\begin{aligned} I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta &= 0 \\ \theta &= e^{-\xi\omega_n t} (A \cos(\omega_D t) + B \sin(\omega_D t)) \\ A &= \theta_{(0)} \\ B &= \frac{\dot{\theta}_{(0)} + \xi\omega_n \theta_{(0)}}{\omega_D} \end{aligned} \quad (7)$$

Solusi dari persamaan gerak respon struktur rotasional yang termasuk dalam kategori *damped forced vibration* dapat menggunakan Pers. (8)

$$\begin{aligned} I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta &= F_m \sin(\omega t) \\ \theta &= \theta_m \sin(-\omega t) \\ \theta_m &= \frac{F_m}{\sqrt{(K - I \times \omega_n^2)^2 + (C \times \omega_n)^2}} \end{aligned} \quad (8)$$

dimana:

θ = respon struktur [°]

θ_m = amplitudo respon struktur [°]

F_m = amplitudo momen eksitasi [N.m]

I = mass moment of inertia [kg.m²/rad]

C = damping [Nm.s/rad]

K = stiffness [Nm/rad]
 ω_n = frekuensi gerak respon struktur [rad/s]
 A, B = konstanta
 Ξ = damping ratio

Perhitungan gaya gelombang menggunakan persamaan morison Persamaan Morison dapat dinyatakan dengan Pers. (9)

$$\begin{aligned}
 F_{gelombang} &= F_{drag} + F_{inertia} \\
 dF_{gelombang} &= \frac{1}{2} \rho C_d D |u| u dz \\
 &\quad + \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \dot{u} dz \\
 F_{gelombang} &= \int \frac{1}{2} \rho C_d D |u| u dz \\
 &\quad + \int \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \dot{u} dz
 \end{aligned} \tag{9}$$

dimana:

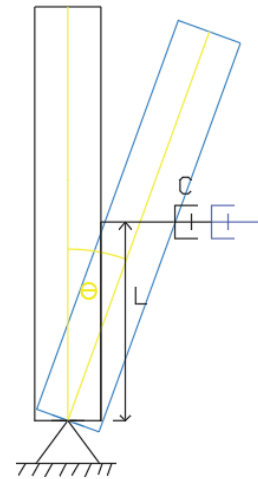
$F_{gelombang}$ = gaya gelombang [N]
 F_{drag} = gaya seret [N]
 $F_{inertia}$ = gaya inersia [N]
 ρ = massa jenis air [kg/m³]
 C_d = koefisien *drag*
 A = luas proyeksi penampang [m²]
 u = kecepatan partikel air [m/s]
 C_M = koefisien *inertia*
 $\forall$ = volume benda tercelup [m³]
 $\dot{u}$ = percepatan partikel air [m/s²]

Untuk analisis dinamik, digunakan bantuan program pemodelan respon struktur. Struktur didesain menggunakan *object* 6D Buoy. Kondisi lingkungan dimodelkan dengan menentukan kedalaman perairan dan tipe gelombang yang digunakan adalah gelombang Airy. Struktur pendukung dimodelkan dengan *object line* yang biasa digunakan untuk memodelkan tali mooring.

Analisis pada program pemodelan respon struktur dilakukan pada domain waktu dengan menggunakan integrasi numerik dengan

persamaan Euler dengan *time-step* konstan. Gaya pada struktur dihitung menggunakan persamaan morison sehingga memerlukan input nilai koefisien *drag* (C_d) dan koefisien inersia (C_I).

Lalu dilakukan validasi data hasil pemodelan dengan hasil analitik. Setelah dilakukan validasi hasil respon struktur, dilakukan difersifikasi data struktur awal menjadi 3 bentuk struktur yang selanjutnya disebut struktur tinjauan. Struktur tinjauan dicek kestabilannya kemudian dimodelkan dengan program pemodelan respon struktur. Hasil pemodelan digunakan untuk menghitung daya rata-rata yang dihasilkan struktur. Ilustrasi struktur ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Struktur Konverter Energi Gelombang *Bottom-Hinged*

Perhitungan daya rata-rata yang dihasilkan mengikuti Pers. (10).

$$\begin{aligned}
 P_n &= T_{C_n} \times \dot{\theta} \\
 P_n &= C \times \dot{\theta} L \times L \times \dot{\theta} \\
 \bar{P} &= \frac{1}{T} \int_t^{t+T} C \times (\dot{\theta} L)^2 dt
 \end{aligned} \tag{10}$$

dimana:

P_n = daya seketika [W]
 T_{C_n} = torsi akibat *damping* [Nm]

$\dot{\theta}$ = kecepatan sudut [rad/s]
 $\bar{P}$ = daya rata-rata [W]
 T = durasi pemodelan [s]
 t = waktu [s]
 C = koefisien redaman [kg/s]
 L = jarak antara posisi generator dan titik putar struktur [m]

Dilakukan pemodelan struktur tinjauan untuk beberapa kombinasi gelombang untuk menyusun tabel kinerja struktur. Kemudian ditentukan 3 lokasi tinjauan untuk melakukan perhitungan daya rata-rata teoritis serta daya rata-rata teknis yang dihasilkan pada 3 lokasi dalam 1 tahun. Data lokasi disusun menggunakan persamaan PDF gelombang Longuet-Higgins sebagai Pers. (11).

$$\begin{aligned}
 p(H, T) &= \frac{1}{8\sqrt{2\pi}v} \left(1 + \frac{v^2}{4} \right) \frac{H_*^2}{T_*^2} \exp \left[- \left(\frac{H_*}{\sqrt{8}} \right)^2 \left\{ 1 + \left(1 - \frac{1}{T_*} \right)^2 \frac{1}{v^2} \right\} \right] \quad (11)
 \end{aligned}$$

dimana:

$p(H, T)$ = fungsi kerapatan probabilitas
 H_* = dimension-less wave height
 T_* = dimension-less wave period
 v = parameter lebar spektrum
 H = tinggi gelombang [m]
 T = periode gelombang [s]

Daya teoritis gelombang dihitung menggunakan Pers. (12).

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H^2 T \quad (12)$$

dimana:

P = daya teoritis [W/m]
 ρ = massa jenis air [kg/m³]
 g = percepatan gravitasi [m/s²]

H = tinggi gelombang [m]
 T = periode gelombang [s]

Perhitungan daya rata-rata baik untuk teoritis maupun teknis dilakukan dengan menghitung energi pada tiap lokasi dalam 1 tahun kemudian dirata-ratakan. Daya rata-rata teoritis dan teknis digunakan untuk menghitung parameter *hydrodynamic efficiency* dari tiap struktur tinjauan untuk menentukan struktur mana yang paling optimum dalam menangkap energi gelombang laut.

Parameter pertama yang dihitung adalah *Capture Width* (CW). CW dapat diartikan sebagai lebar puncak gelombang yang telah sepenuhnya ditangkap dan diserap oleh konverter energi gelombang. Perhitungan CW ditunjukkan dengan Pers. (13).

$$CW = \frac{P}{J} \quad (13)$$

dimana:

P = daya rata-rata teknis [KW]
 J = daya rata-rata teoritis [KW/m]

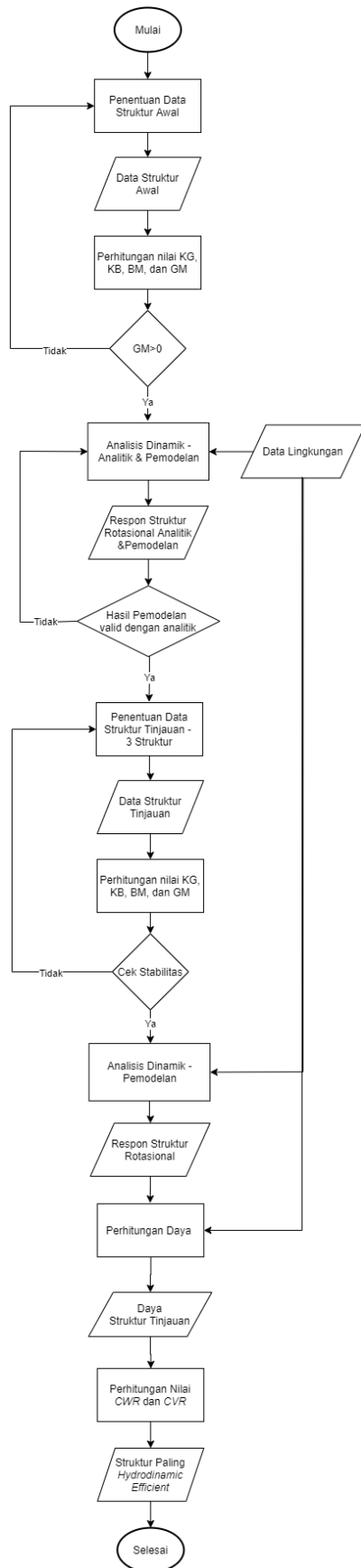
Parameter efisiensi hidrodinamik adalah *captured width ratio* (CWR), yang diperoleh dengan membagi nilai *captured width* dengan dimensi (B) yang seringkali adalah lebar struktur konverter. Perhitungan CWR ditunjukkan dengan Pers. (14).

$$CWR = \frac{CW}{B} = \frac{P}{J \cdot B} \quad (14)$$

dimana:

P = daya teknis [KW]
 J = daya teoritis [KW/m]
 B = lebar struktur [m]

Diagram alir pengerjaan Tugas Akhir ditunjukkan pada Gambar 3.

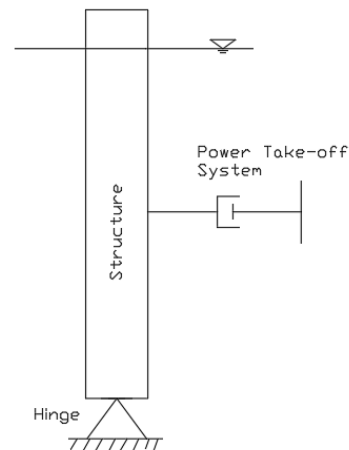


Gambar 3 Metodologi Pengerjaan Tugas Akhir

HASIL DAN ANALISIS

A. KAJIAN DAN ANALISIS RESPON STRUKTUR

Struktur konverter energi gelombang yang didesain adalah jenis *point absorber* dan memiliki prinsip kerja struktur konverter energi gelombang tipe *submerged-wave activated bodies* yang memanfaatkan gerakan *rotational (bottom-hinged)*. Struktur didesain untuk kondisi kedalaman perairan minimal 50 m. Jarak keel ke PTO adalah 6 m dan damping dari PTO adalah 6000 kg/s. Ilustrasi struktur konverter energi gelombang yang akan didesain ditunjukkan pada Gambar 4.

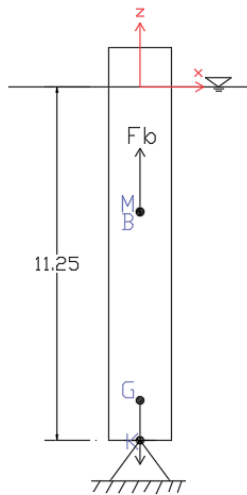


Gambar 4 Desain Konverter Energi Gelombang

Data struktur awal ditunjukkan pada Tabel 1 dan ilustrasi struktur awal ditunjukkan pada Gambar 5

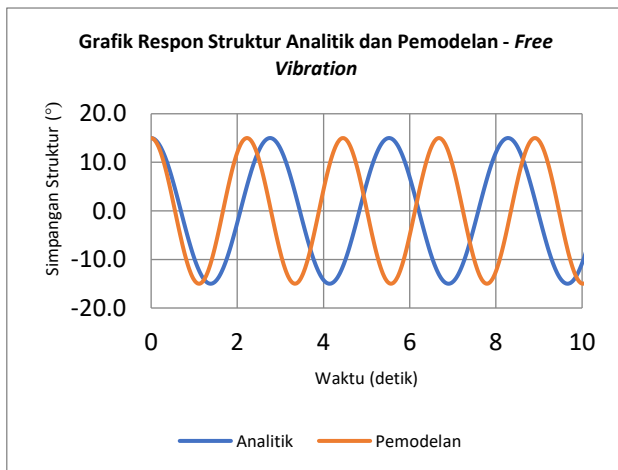
Tabel 1 Titik Stabilitas Struktur Awal Modifikasi

Nilai KG	Nilai KB	Nilai BM	Nilai GM	Kestabilan
1.058	5.625	0.022	4.589	Stabil



Gambar 5 Ilustrasi Struktur Awal

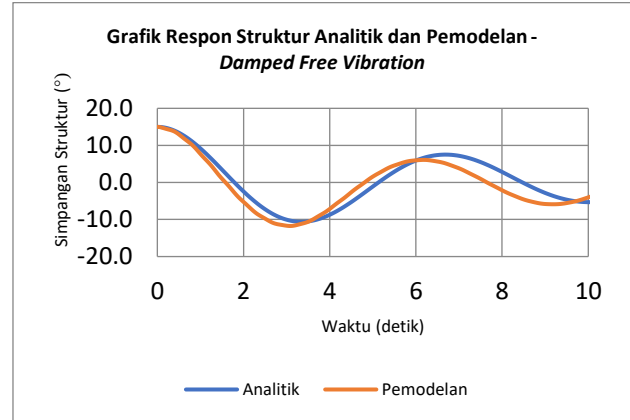
Perbandingan hasil analisis dinamik struktur dengan perhitungan analitik dan pemodelan kondisi *free vibration* ditunjukkan pada Gambar 6, Gambar 7, Tabel 3, dan Tabel 2.



Gambar 6 Perbandingan Hasil *free vibration*

Tabel 2 Perbandingan Hasil *free vibration*

Pemodelan		Analitik	
Fn (Hz)	Tn (Detik)	Fn (Hz)	Tn (Detik)
0.433	2.309	0.362	2.759



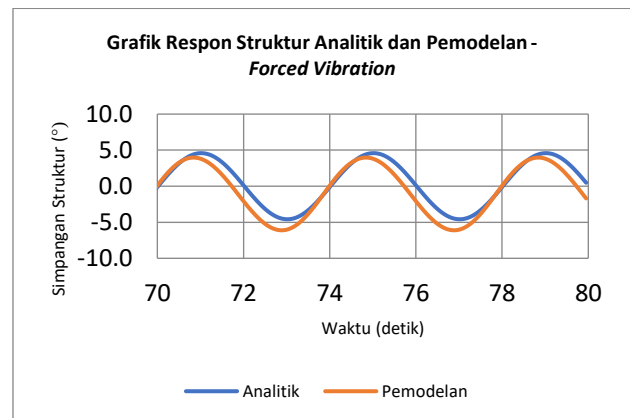
Gambar 7 Perbandingan Hasil *damped free vibration*

Tabel 3 Perbandingan Hasil *damped free vibration*

Pemodelan		Analitik	
Fn (Hz)	Tn (Detik)	Fn (Hz)	Tn (Detik)
0.167	5.98	0.1506	6.639

Tidak ada perbedaan signifikan dari hasil pemodelan dengan perhitungan analitis. Perbedaan yang sedikit ini dikarenakan pada perhitungan analitis, perhitungan dilakukan dengan pendekatan sudut kecil.

Perbandingan hasil analisis dinamik struktur dengan perhitungan analitik dan pemodelan kondisi *forced vibration* ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Perbandingan Hasil Forced Vibration

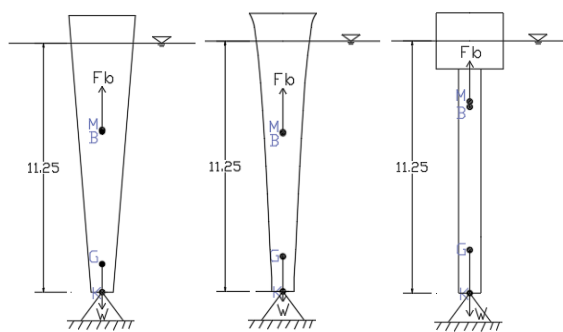
Ada perbedaan titik osilasi dan besar respon struktur. Perbedaan ini dikarenakan pada pemodelan, perhitungan dilakukan secara non-linear sedangkan pada perhitungan analitis yang menggunakan perhitungan secara linear serta penggunaan penyederhanaan sudut kecil pada perhitungan analitis.

B. KINERJA STRUKTUR

Data struktur tinjauan ditunjukkan pada **Tabel** dan ilustrasi struktur awal ditunjukkan pada **Gambar**

Tabel 4 Data Struktur Tinjauan

Struktur	Nilai KG (m)	Nilai KB (m)	Nilai BM (m)	Nilai GM (m)	Kestabilan
1	1.273	7.259	0.076	6.062	Stabil
2	1.574	7.107	0.053	5.585	Stabil
3	1.926	8.309	0.238	6.621	Stabil



Gambar 9 Ilustrasi Struktur Tinjauan

Nilai frekuensi natural dan periode natural tiap struktur tinjauan hasil pemodelan ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5 Data Frekuensi Natural dan Periode Natural

Struktur	Frekuensi Natural (Hz)	Periode Natural (detik)
1	0.16	6.25
2	0.1533	6.52
3	0.1467	6.81

Terdapat 3 jenis hasil pemodelan respon struktur akibat gaya gelombang. Jenis pertama

yaitu gerak resonansi gelombang terdiri dari 1 frekuensi yang nilainya sama dengan frekuensi gelombang. Jenis yang kedua beresilasi dengan terdiri dari 2 frekuensi dengan nilai frekuensi pertama sama dengan frekuensi gelombang dan yang kedua dekat dengan frekuensi natural struktur. Jenis ketiga juga terdiri dari 2 frekuensi dengan frekuensi pertama sama dengan frekuensi gelombang dan frekuensi kedua yaitu kelipatan bilangan bulat dari frekuensi gelombang.

Untuk jenis kedua, penyebabnya dianalisis adalah akibat gelombang yang bekerja pada struktur curam sehingga menyebabkan pergerakan translasional yang besar pada dasar struktur. Untuk jenis ketiga, penyebabnya dianalisis karena periode gelombang yang besar sehingga pengaruh terhadap strukturnya menjadi lebih besar untuk bagian bawah struktur di sekitar *hinge*. Nilai kecuraman gelombang ditunjukkan pada Tabel 6 dengan hasil respon struktur yang terdiri dari 2 frekuensi ditandai jingga dan gelombang pecah ditandai warna merah

Tabel 6 Data Kecuraman Gelombang

T\H	H/L					
	0.5	1	1.5	2	2.5	3
1.5	0.142	0.285	0.427	0.569	0.712	0.854
2	0.080	0.160	0.240	0.320	0.400	0.480
2.5	0.051	0.102	0.154	0.205	0.256	0.307
3	0.036	0.071	0.107	0.142	0.178	0.213
3.5	0.026	0.052	0.078	0.105	0.131	0.157
4	0.020	0.040	0.060	0.080	0.100	0.120
4.5	0.016	0.032	0.047	0.063	0.079	0.095
5	0.013	0.026	0.038	0.051	0.064	0.077
5.5	0.011	0.021	0.032	0.042	0.053	0.064
6	0.009	0.018	0.027	0.036	0.044	0.053
6.5	0.008	0.015	0.023	0.030	0.038	0.045
7	0.007	0.013	0.020	0.026	0.033	0.039
7.5	0.006	0.011	0.017	0.023	0.028	0.034
8	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030
8.5	0.004	0.009	0.013	0.018	0.022	0.027
9	0.004	0.008	0.012	0.016	0.020	0.024
9.5	0.004	0.007	0.011	0.014	0.018	0.021
10	0.003	0.006	0.010	0.013	0.016	0.019

Analisis lainnya adalah nilai KC (Keulegan-Carpenter). Untuk kondisi 2 frekuensi pada

gelombang curam, nilai KC kecil sehingga gaya gelombang menjadi *inertia dominated* dan pada kondisi gelombang periode 10 detik nilai KC besar sehingga gaya gelombang menjadi *drag dominated*.

Dengan menggunakan nilai respon hasil pemodelan maka dihitung daya rata-rata yang dihasilkan struktur dan disusun tabel kinerja struktur yang ditampilkan pada Tabel 7, Tabel 8, dan Tabel 9.

Tabel 7 Kinerja Struktur 1

Daya Rata-rata (KW) Struktur 1						
T\H	0.5	1	1.5	2	2.5	3
1.5	x	x	x	x	x	x
2	0.155	x	x	x	x	x
2.5	0.250	0.971	x	x	x	x
3	0.345	6.427	11.964	x	x	x
3.5	0.454	5.900	12.566	17.591	21.306	x
4	0.596	2.233	7.220	12.157	16.120	19.476
4.5	0.812	2.931	5.742	9.579	13.694	17.235
5	1.161	3.876	7.133	10.506	13.877	17.221
5.5	1.726	5.010	8.575	12.192	15.799	19.324
6	2.194	5.561	9.068	12.623	16.169	19.671
6.5	1.889	4.792	7.859	10.968	14.061	17.137
7	1.128	3.319	5.798	8.380	10.951	13.511
7.5	0.550	1.894	3.611	5.529	7.527	9.550
8	0.283	1.069	2.183	3.513	4.986	6.532
8.5	0.160	0.630	1.345	2.246	3.291	4.436
9	0.095	0.383	0.839	1.438	2.159	2.984
9.5	0.061	0.250	0.558	0.971	1.480	2.077
10	0.042	0.170	0.385	0.676	1.038	1.469

Tabel 8 Kinerja Struktur 2

Daya Rata-rata (KW) Struktur 2						
T\H	0.5	1	1.5	2	2.5	3
1.5	x	x	x	x	x	x
2	0.156	x	x	x	x	x
2.5	0.241	0.965	x	x	x	x
3	0.324	3.305	8.585	x	x	x
3.5	0.413	3.390	9.503	14.557	18.500	x
4	0.522	1.974	5.857	10.564	14.442	17.705
4.5	0.672	2.467	4.904	8.054	11.906	15.222
5	0.888	3.063	5.784	8.682	11.631	14.540
5.5	1.186	3.696	6.585	9.598	12.649	15.671
6	1.410	3.954	6.739	12.623	12.542	15.453
6.5	1.288	3.512	5.939	8.457	10.997	13.543
7	0.901	2.663	4.661	6.767	8.896	11.033
7.5	0.506	1.700	3.178	4.814	6.522	8.262
8	0.280	1.036	2.063	3.260	4.567	5.937
8.5	0.164	0.640	1.338	2.192	3.165	4.216
9	0.099	0.396	0.858	1.448	2.149	2.938
9.5	0.064	0.261	0.576	0.992	1.496	2.079
10	0.044	0.179	0.400	0.696	1.061	1.490

Tabel 9 Kinerja Struktur 3

Daya Rata-rata (KW) Struktur 3						
T\H	0.5	1	1.5	2	2.5	3
1.5	x	x	x	x	x	x
2	0.385	x	x	x	x	x
2.5	0.476	1.739	x	x	x	x
3	0.521	4.676	9.775	x	x	x
3.5	0.553	5.927	12.528	17.791	21.383	x
4	0.600	2.686	8.558	13.383	17.059	19.901
4.5	0.681	2.471	4.845	9.144	12.721	15.721
5	0.798	2.789	5.292	7.868	10.275	12.880
5.5	0.976	3.189	5.773	8.326	10.632	12.903
6	1.166	3.470	5.976	8.386	10.506	12.618
6.5	1.226	3.393	5.680	7.878	9.812	11.697
7	1.017	2.845	4.817	6.767	8.547	10.240
7.5	0.652	1.997	3.533	5.135	6.690	8.208
8	0.378	1.295	2.445	3.720	5.051	6.420
8.5	0.217	0.810	1.625	2.587	3.666	4.847
9	0.128	0.500	1.045	1.721	2.525	3.467
9.5	0.080	0.321	0.693	1.175	1.777	2.526
10	0.053	0.214	0.469	0.809	1.244	1.812

C. HYDODYNAMIC EFFICIENCY

Lokasi yang digunakan sebagai lokasi tinjauan merupakan lokasi yang memiliki Hs 1 meter dengan Ts 4 detik, Hs 1.5 meter dengan Ts 6 detik, Hs 2 meter dengan Ts 8 detik, dan Hs 2 meter dengan Ts 5 detik.. Tabel PDF lokasi ditunjukkan pada Tabel 10, Tabel 11, Tabel 12, dan Tabel 13.

Tabel 10 PDF Lokasi 1

PDF Lokasi 1 - Hs1Ts4								
T\H	H	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
T	T*\H*	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12
0	0.0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.15	0	0	0	0	0	0	0
1	0.30	0	0	0	0	0	0	0
1.5	0.45	0	0.019	0	0	0	0	0
2	0.60	0	0.235	0.004	0	0	0	0
2.5	0.75	0	0.396	0.137	0.005	0	0	0
3	0.90	0	0.364	0.293	0.046	0.002	0	0
3.5	1.06	0	0.273	0.234	0.040	0.002	0	0
4	1.21	0	0.193	0.129	0.015	0	0	0
4.5	1.36	0	0.135	0.062	0.004	0	0	0
5	1.51	0	0.095	0.029	0.001	0	0	0
5.5	1.66	0	0.069	0.014	0	0	0	0
6	1.81	0	0.051	0.007	0	0	0	0
6.5	1.96	0	0.038	0.004	0	0	0	0
7	2.12	0	0.030	0.002	0	0	0	0
7.5	2.27	0	0.023	0.001	0	0	0	0
8	2.42	0	0.019	0.001	0	0	0	0
8.5	2.57	0	0.015	0	0	0	0	0
9	2.72	0	0.012	0	0	0	0	0
9.5	2.87	0	0.010	0	0	0	0	0
10	3.02	0	0.009	0	0	0	0	0

Tabel 11 PDF Lokasi 2

PDF Lokasi 2 - Hs1.5Ts6								
T\H	H	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
T	T*\H*	0.0	1.3	2.6	3.9	5.3	6.6	7.9
0	0.0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.10	0	0	0	0	0	0	0
1	0.20	0	0	0	0	0	0	0
1.5	0.30	0	0.002	0	0	0	0	0
2	0.40	0	0.067	0	0	0	0	0
2.5	0.49	0	0.202	0.010	0	0	0	0
3	0.59	0	0.280	0.110	0.005	0	0	0
3.5	0.69	0	0.284	0.295	0.070	0.005	0	0
4	0.79	0	0.253	0.412	0.207	0.045	0.005	0
4.5	0.89	0	0.213	0.418	0.287	0.097	0.018	0.002
5	0.99	0	0.175	0.360	0.268	0.101	0.021	0.003
5.5	1.09	0	0.143	0.286	0.202	0.071	0.014	0.002
6	1.19	0	0.118	0.219	0.137	0.041	0.006	0.001
6.5	1.29	0	0.097	0.164	0.088	0.021	0.002	0
7	1.39	0	0.081	0.123	0.055	0.010	0.001	0
7.5	1.49	0	0.068	0.093	0.035	0.005	0	0
8	1.59	0	0.058	0.070	0.022	0.002	0	0
8.5	1.69	0	0.049	0.054	0.014	0.001	0	0
9	1.79	0	0.042	0.042	0.009	0.001	0	0
9.5	1.89	0	0.037	0.033	0.006	0	0	0
10	1.99	0	0.032	0.026	0.004	0	0	0

Tabel 12 PDF Lokasi 3

PDF Lokasi 3 -Hs2Ts8								
T\H	H	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
T	T*\H*	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
0	0.00	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.07	0	0	0	0	0	0	0
1	0.15	0	0	0	0	0	0	0
1.5	0.22	0	0.001	0	0	0	0	0
2	0.29	0	0.030	0	0	0	0	0
2.5	0.37	0	0.116	0.001	0	0	0	0
3	0.44	0	0.192	0.025	0	0	0	0
3.5	0.52	0	0.223	0.116	0.009	0	0	0
4	0.59	0	0.220	0.244	0.065	0.006	0	0
4.5	0.67	0	0.201	0.344	0.188	0.046	0.006	0
5	0.74	0	0.177	0.387	0.318	0.138	0.035	0.006
5.5	0.82	0	0.153	0.383	0.394	0.235	0.090	0.023
6	0.89	0	0.131	0.352	0.406	0.283	0.133	0.044
6.5	0.97	0	0.113	0.310	0.372	0.275	0.139	0.050
7	1.04	0	0.097	0.266	0.318	0.234	0.117	0.042
7.5	1.12	0	0.084	0.226	0.261	0.183	0.087	0.029
8	1.19	0	0.073	0.191	0.210	0.137	0.059	0.018
8.5	1.27	0	0.064	0.161	0.166	0.099	0.038	0.010
9	1.34	0	0.056	0.136	0.131	0.071	0.024	0.005
9.5	1.42	0	0.050	0.115	0.103	0.050	0.015	0.003
10	1.49	0	0.044	0.098	0.081	0.036	0.009	0.002

Tabel 13 PDF Lokasi 4

PDF Lokasi 4 -Hs2Ts5								
T\H	H	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
T	T*\H*	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
0	0.0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0.12	0	0	0	0	0	0	0
1	0.24	0	0	0	0	0	0	0
1.5	0.36	0	0.090	0	0	0	0	0
2	0.48	0	0.207	0	0	0	0	0
2.5	0.60	0	0.222	0.237	0	0	0	0
3	0.72	0	0.189	0.378	0	0	0	0
3.5	0.84	0	0.151	0.384	0.407	0	0	0
4	0.96	0	0.118	0.324	0.388	0.285	0	0
4.5	1.08	0	0.093	0.254	0.300	0.216	0.106	0
5	1.20	0	0.074	0.193	0.211	0.136	0.058	0.017
5.5	1.32	0	0.060	0.146	0.143	0.079	0.028	0.006
6	1.44	0	0.049	0.111	0.096	0.045	0.013	0.002
6.5	1.56	0	0.041	0.086	0.065	0.026	0.006	0.001
7	1.68	0	0.034	0.067	0.045	0.015	0.003	0.000
7.5	1.80	0	0.029	0.053	0.032	0.009	0.001	0.000
8	1.92	0	0.025	0.043	0.023	0.005	0.001	0.000
8.5	2.04	0	0.022	0.035	0.017	0.003	0.000	0.000
9	2.16	0	0.019	0.028	0.012	0.002	0.000	0.000
9.5	2.28	0	0.017	0.024	0.009	0.001	0.000	0.000
10	2.40	0	0.015	0.020	0.007	0.001	0.000	0.000

Jumlah kejadian didapatkan dengan mengalikan probabilitas dengan jumlah jam dalam 1 tahun. Nilai daya teoritis untuk tiap kombinasi ditunjukkan pada Tabel 14

Tabel 14 Daya Teoritis

Daya (W/m)						
T\H	0.5	1	1.5	2	2.5	3
1.5	x	x	x	x	x	x
2	245.3	x	x	x	x	x
2.5	306.6	1226.5	x	x	x	x
3	367.9	1471.8	3311.5	x	x	x
3.5	429.2	1717.1	3863.5	6868.4	10731.9	x
4	490.6	1962.4	4415.4	7849.6	12265.1	17661.7
4.5	551.9	2207.7	4967.3	8830.8	13798.2	19869.5
5	613.2	2453.0	5519.3	9812.1	15331.4	22077.2
5.5	674.5	2698.3	6071.2	10793.3	16864.5	24284.9
6	735.9	2943.6	6623.1	11774.5	18397.6	26492.6
6.5	797.2	3188.9	7175.1	12755.7	19930.8	28700.4
7	858.5	3434.2	7727.0	13736.9	21463.9	30908.1
7.5	919.8	3679.5	8278.9	14718.1	22997.1	33115.8
8	981.2	3924.8	8830.8	15699.3	24530.2	35323.5
8.5	1042.5	4170.1	9382.8	16680.5	26063.3	37531.2
9	1103.8	4415.4	9934.7	17661.7	27596.5	39739.0
9.5	1165.1	4660.7	10486.6	18642.9	29129.6	41946.7
10	1226.5	4906.0	11038.6	19624.2	30662.8	44154.4

Dengan menggunakan daya teoritis dan jumlah kejadian gelombang maka didapat daya rata-rata teoritis 1 tahun untuk tiap lokasi ditunjukkan pada Tabel 15.

Tabel 15 Daya Teoritis Rata-rata 1 Tahun

Daya Teoritis 1 Tahun				
Lokasi Tinjauan	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4
Energi teoritis (KWh/m)	7707.1	25215.77	52440.6	37103.25
Daya rata-rata (KW/m)	0.958	3.18	7.12	4.543

Dengan menggunakan data kinerja struktur dan jumlah kejadian gelombang maka didapat daya rata-rata teknis 1 tahun untuk tiap lokasi ditunjukkan pada Tabel 16.

Tabel 16 Daya Teknis Rata-rata 1 Tahun

Daya Teknis Struktur 1 – 1 Tahun				
Lokasi Tinjauan	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4
Energi Teknis (KWh)	17126.729	32035.518	37547.008	53152.17
Daya rata-rata (KW)	2.128	4.04	5.098	6.507
Daya Teknis Struktur 2 – 1 Tahun				
Lokasi Tinjauan	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4
Energi Teknis (KWh)	11469.141	25013.625	30306.253	42157.29
Daya rata-rata (KW)	1.425	3.154	4.115	5.161
Daya Teknis Struktur 3 – 1 Tahun				
Lokasi Tinjauan	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4
Energi Teknis (KWh)	15845.26	26480.596	28648.336	48812.71
Daya rata-rata (KW)	1.969	3.339	3.890	5.976

Dengan menggunakan nilai daya rata-rata teoritis dan daya rata-rata teknis 1 tahun maka dapat dihitung nilai CW tiap struktur ditunjukkan pada Tabel 17.

Tabel 17 Nilai CW Struktur

Struktur 1				
Lokasi Tinjauan	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4
Daya Teoritis (KW/m)	0.958	3.18	7.12	4.54
Daya Teknis (KW)	2.128	4.04	5.098	6.507
CW (m)	2.221	1.270	0.716	1.432
Struktur 2				
Lokasi Tinjauan	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4
Daya Teoritis (KW/m)	0.958	3.18	7.12	4.54
Daya Teknis (KW)	1.425	3.154	4.115	5.161
CW (m)	1.487	0.992	0.578	1.136
Struktur 3				
Lokasi Tinjauan	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4
Daya Teoritis (KW/m)	0.958	3.18	7.12	4.54
Daya Teknis (KW)	1.969	3.339	3.890	5.976
CW (m)	2.055	1.050	0.546	1.315

Dari nilai CW, dapat dilihat struktur 1 memiliki nilai CW paling besar dibandingkan dengan struktur lainnya untuk ketiga lokasi dengan nilai CW maksimum 2.221 m di lokasi 1 dan nilai CW minimum 0.716 m di lokasi 3. Tiap struktur tinjauan dapat menangkap lebar gelombang paling baik pada lokasi dengan gelombang kecil yaitu pada lokasi 1.

Nilai CWR kemudian dihitung dengan menggunakan nilai lebar struktur pada lokasi waterline seperti ditunjukkan pada Tabel 18.

Tabel 18 Nilai CWR Struktur

Struktur 1 (B = 2.7 m)				
Lokasi Tinjauan	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4
CW (m)	2.221	1.270	0.716	1.432
CWR (%)	82.27	47.05	26.52	53.05
Struktur 2 (B = 2.23 m)				
Lokasi Tinjauan	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4
CW (m)	1.487	0.992	0.578	1.136
CWR (%)	66.70	44.48	25.92	50.95
Struktur 3 (B = 3 m)				
Lokasi Tinjauan	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4
CW (m)	2.055	1.050	0.546	1.315
CWR (%)	68.51	35.00	18.21	43.85

Dapat dilihat dari nilai CWR yang telah didapatkan, tiap struktur tinjauan memiliki nilai CWR yang berbeda. Nilai CWR sebagai parameter efisiensi hidrodinamik menggambarkan seberapa efisien struktur dalam menangkap gaya hidrodinamik untuk dikonversi menjadi energi. Nilai CWR yang besar terjadi karena bentuk struktur yang baik dalam menangkap gaya sehingga gerak respon yang dihasilkan juga lebih besar dibanding struktur yang lain. Gerak respon yang besar ini dapat dikonversi juga menjadi daya yang besar. Hal ini menunjukkan bahwa ketiga struktur paling baik dalam menangkap gaya untuk gelombang kecil dimana lokasi 1 memiliki nilai H_s 1 m dan T_s 4 detik. Perlu diperhatikan bahwa nilai CWR relatif terhadap lokasi sehingga dalam menentukan efisiensi struktur harus dengan memperhatikan lokasi tinjauan. Dapat dilihat untuk struktur dengan CWR yang besar tidak selalu terjadi ketika puncak dari tabel kinerja struktur dekat dengan lokasi puncak dari tabel PDF lokasi tinjauan. Ketiga struktur memiliki kinerja puncak pada H2.5T3.5 sehingga akan menghasilkan CWR yang baik pada lokasi 1 dengan puncak PDF pada H0.5T2.5 dan kurang baik pada lokasi 2 dan lokasi 3. Tetapi nilai CWR pada lokasi 4

dengan puncak PDF pada H1.5T3.5 yang lebih dekat dengan puncak kinerja ketiga struktur tidak berarti nilai CWR pada lokasi tersebut menjadi lebih baik. Hanya nilai daya teknis rata-rata yang dihasilkan yang semakin besar ketika puncak PDF dan puncak kinerja berdekatan.

Struktur 1 memiliki efisiensi hidrodinamik yang paling baik diantara ketiga struktur tinjauan karena memiliki nilai CWR yang lebih besar dibanding struktur lain untuk semua lokasi tinjauan. Struktur 2 memiliki nilai CWR terbesar kedua untuk lokasi 2, 3, dan 4 tetapi lebih kecil dari struktur 3 di lokasi 1. Hal ini dapat disebabkan karena kinerja struktur 2 lebih baik di area sekitar puncak PDF lokasi 2 dan 3.

KESIMPULAN

1. Didapatka nilai respon dari tiap struktur tinjauan struktur. Ditemukan ada 3 tipe dari respon struktur tinjauan yang didapatkan yaitu struktur yang beresilasi dengan 1 frekuensi yaitu frekuensi gelombang yang bekerja, struktur yang beresilasi dengan 2 frekuensi yaitu frekuensi gelombang dan frekuensi alamiah struktur, dan struktur yang beresilasi dengan 2 frekuensi yang terdiri dari frekuensi gelombang dan kelipatannya. Kondisi dimana ada 2 frekuensi terjadi dengan frekuensi gelombang dan frekuensi alamiah terjadi pada kondisi gelombang yang bekerja adalah gelombang curam. Hal ini ditunjukkan dari nilai kecuraman gelombang pada Tabel 6. Dianalisis pada kondisi gelombang yang bekerja gelombang curam, terjadi pergerakan translasional (*heave*) yang lebih besar dari pada dasar struktur dibandingkan pada gelombang yang tidak curam. Untuk kondisi dimana terdapat 2 frekuensi dengan frekuensi gelombang dan kelipatannya terjadi pada kondisi yang

bekerja adalah gelombang panjang. Penyebab terjadinya kondisi 2 frekuensi ini juga dianalisis dari nilai Keulegan-Carpenter (KC) dimana pada gelombang curam, nilai KC kecil sehingga gaya gelombang yang bekerja menjadi *Inertia Dominated* sedangkan pada gelombang panjang, nilai KC besar sehingga gaya gelombang yang bekerja menjadi *Drag Dominated*.

2. Didapatkan kinerja dari tiga struktur yang ditinjau dimana bentuk struktur ditampilkan pada Gambar 9 dan kinerja dari masing-masing struktur tinjauan ditampilkan pada Tabel 7, Tabel 8, dan Tabel 9.

Ketiga struktur memiliki kinerja yang baik untuk daerah sekitar karakteristik gelombang periode 3.5 detik dan tinggi 2.5 m. Ketiga struktur memiliki kinerja yang kurang baik untuk daerah sekitar karakteristik gelombang periode 10 detik dan tinggi 0.5 m. Struktur 1 adalah struktur yang memiliki kinerja paling baik diantara ketiga struktur tinjauan dimana memiliki daerah kinerja dengan daya 15-25 kW yang paling luas yaitu untuk tinggi gelombang 2-3 meter dan periode 3-6.5 detik.

3. Dengan perhitungan nilai CWR menggunakan diameter struktur dapat disimpulkan bahwa struktur 1 adalah struktur yang paling optimum diantara ketiga struktur ditinjau dari efisiensi hidrodinamik. Efisiensi hidrodinamik ini dinilai dari parameter *captured width ratio* (CWR) dimana untuk 4 lokasi tinjauan yang telah ditentukan (Hs1Ts4, Hs1.5Ts6, Hs2Ts4, dan Hs3Ts5). Dari ketiga struktur tinjauan, semua struktur memiliki nilai CWR yang besar untuk lokasi 1 dan nilai CWR yang kecil untuk lokasi 3. Hal ini menunjukkan bahwa ketiga struktur optimum pada lokasi dengan gelombang kecil. Struktur 1 dibandingkan dengan struktur

lainnya memiliki nilai CWR yang paling besar dengan maksimum di lokasi 1 sebesar 82.27% dan paling kecil di lokasi 3 sebesar 26.52%. CWR yang besar tidak dapat dilihat dengan puncak dari tabel kinerja struktur dekat dengan lokasi puncak dari tabel PDF lokasi tinjauan. Kedekatan puncak PDF lokasi tinjauan dengan puncak kinerja akan menghasilkan daya teknis yang besar dan belum tentu menghasilkan CWR yang besar pula.

SARAN

1. Meninjau prosedur desain agar puncak kinerja bisa diatur dekat dengan kondisi gelombang di satu lokasi tinjauan.
2. Melakukan pemodelan struktur dengan menggunakan gelombang acak sehingga didapatkan hasil yang lebih mendekati kondisi lapangan. Untuk pemodelan dengan gelombang reguler, pemodelan dapat dilakukan dengan menggunakan teori gelombang *Stokes* untuk menyesuaikan kecuraman gelombang.
3. Meninjau bentuk struktur lain dan meninjau gerak respon lain seperti *heaving*.
4. Membuat model uji coba berskala untuk mendapatkan respon struktur sebagai pembandingan dengan hasil perhitungan dan pemodelan dengan perangkat lunak.

DAFTAR PUSTAKA

- Babarit, A. (2015). A database of capture width ratio of wave energy converters. *Renewable Energy*, 80, 610-628. doi:10.1016/j.renene.2015.02.049
- Barltrop, N. D., & Adams, A. J. (1991). *Dynamics of fixed marine structures*. Oxford: Butterworth Heinemann.
- Caska, A., & Finnigan, T. (2008). Hydrodynamic characteristics of a cylindrical bottom-pivoted wave energy

absorber. *Ocean Engineering*, 35(1), 6-16. doi:10.1016/j.oceaneng.2007.06.006

Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (2007). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Singapore: World Scientific.

Faltinsen, O. M. (1999). *Sea loads on ships and offshore structures*. Cambridge: Cambridge University Press.

Hoerner, S. F. (1992). *Fluid-dynamic drag: Practical information on aerodynamic drag and hydrodynamic resistance*. London: S.n.

Longuet-Higgins, M. S. (1983). On the Joint Distribution of Wave Periods and Amplitudes in a Random Wave Field. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 389(1797), 241-258. doi:10.1098/rspa.1983.0107

Mukhtasor. (2014). *Potensi energi laut Indonesia*. Jakarta, Indonesia: Badan Litbang ESDM.

Newman, J. N. (1977). *Marine hydrodynamics*. Cambridge, MA: MIT Press.

Pecher, A., & Kofoed, J. P. (2017). *Handbook of Ocean Wave Energy*. Cham: Springer International Publishing.

Wilkinson, L., Whittaker, T., Thies, P., Day, S., & Ingram, D. (2017). The power-capture of a nearshore, modular, flap-type wave energy converter in regular waves. *Ocean Engineering*, 137, 394-403. doi:10.1016/j.oceaneng.2017.04.016

Zhang, D., & Paterson, E. G. (2015). A study of wave forces on an offshore platform by direct CFD and Morison equation. *E3S Web of Conferences*, 5, 04002. doi:10.1051/e3sconf/20150504002