

PERANCANGAN AWAL STRUKTUR KONVERTER ENERGI GELOMBANG TIPE *CYLINDRICAL*

Preliminary Design of Cylindrical Wave Energy Converter

Ronaldo Aditya Lieberth¹ dan Krisnaldi Idris²

Program Studi Teknik Kelautan

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan

Institut Teknologi Bandung

Jln. Ganeca 10 Bandung 40132

¹ronaldoliebert@gmail.com dan ²krisnaldi@ocean.itb.ac.id

Abstrak: Indonesia merupakan negara yang memiliki wilayah laut yang luas, berpotensi mengembangkan energi laut sebagai energi terbarukan untuk menjadi salah satu solusi permasalahan ketahanan energi nasional. Dengan berkelimpahan potensi energi yang berasal dari arus, pasang surut, gelombang, maupun panas, energi laut ke depan akan memiliki manfaat yang besar dan penting dalam menyokong kebutuhan energi dalam negeri. Dengan memanfaatkan potensi energi gelombang yang berlimpah di perairan Indonesia, dibutuhkan sebuah struktur/alat yang dapat mengkonversi energi gelombang menjadi energi listrik. Pada Tugas Akhir dilakukan perancangan awal struktur konverter energi gelombang dengan fokus utama untuk mendapatkan daya yang dihasilkan oleh struktur pada lokasi tertentu untuk waktu satu tahun. Dilakukan perhitungan secara analitik untuk mendapatkan dimensi serta kestabilan struktur. Perhitungan respons struktur gerak rotasional menggunakan pemodelan pada perangkat lunak analisis respons dinamik. Daya yang dihasilkan oleh struktur selama satu tahun didapatkan melalui perkalian hasil daya untuk setiap profil gelombang dengan nilai kejadian profil gelombang. Hasil dari Tugas Akhir meliputi dimensi struktur konverter energi gelombang, respons dinamik struktur konverter energi gelombang yang berupa respons gerak rotasional, dan daya yang dihasilkan oleh struktur untuk satu tahun.

Kata Kunci: Struktur Konverter Energi Gelombang, Respons Gerak Rotasional, Pemodelan, Daya

Abstract: Indonesia is a country that has a large ocean region, it has the potential to develop ocean energy as a renewable energy to solve national energy crisis. With its abundance of potential energy that can come from currents, tides, waves and thermal, ocean energy can help to create positive impacts and to fulfill Indonesia's energy need in the future. By maximizing the potential of wave energy that Indonesia have, a structure is needed to be able to convert wave energy into electrical energy. This final project will be a design of a wave energy converter in which the power that the converter can produce on a certain location in a year will be its focus. To determine the dimension of the structure and the stability of the structure, an analytical calculation is needed. The calculation of the rotational response of the structure will be calculated using a modelling in a software. The power that is produced by the structure can be calculated by multiplying the power of the structure for every wave profile with the amount of incident for every wave profile. The result of this final project is the dimension of the wave energy converter structure, dynamic response of the structure in which it is a rotational response structure and the power produced by the structure in a year.

Keywords: Wave Energy Converter Structure, Rotational Response Structure, Modelling, Power

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang memiliki wilayah laut yang luas, berpotensi mengembangkan energi laut sebagai energi terbarukan untuk menjadi salah satu solusi permasalahan ketahanan energi nasional. Dengan berkelimpahan potensi energi yang berasal dari arus, pasang surut, gelombang, maupun panas, energi laut ke depan akan memiliki manfaat yang besar dan penting dalam menyokong kebutuhan energi dalam negeri. Dengan memanfaatkan potensi energi gelombang yang berlimpah di perairan Indonesia, dibutuhkan sebuah struktur/alat yang dapat mengkonversi energi gelombang menjadi energi listrik. Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah menentukan dimensi struktur konverter energi gelombang, menentukan respons dinamik struktur konverter energi gelombang, menentukan daya yang dihasilkan oleh struktur konverter energi gelombang dan menentukan struktur yang paling optimal pada lokasi tinjauan.

TEORI DAN METODOLOGI

Metodologi Penelitian

Dalam melakukan perancangan struktur konverter gelombang, proses perancangan diawali dengan memasukkan data struktur. Data struktur yang dibutuhkan dalam perhitungan respons dinamik struktur adalah dimensi struktur dan *ballast*, massa struktur, *draft* struktur. Dilakukan proses pengecekan kestabilan struktur dengan syarat nilai KM harus bernilai lebih besar dibandingkan dengan nilai KG sehingga struktur dapat dinyatakan stabil.

Data lingkungan yang digunakan merupakan data lingkungan yang diasumsi. Pada Tugas Akhir ini, digunakan data lingkungan untuk H 1 m, 1.5m dan 2m serta periode gelombang sebesar T 4s, 6s, 8s. Dengan menggunakan data lingkungan tersebut, didapatkan respons struktur untuk gerak rotasional secara analitik. Respons yang didapatkan harus lebih besar dari 5° .

Setelah didapatkan dimensi struktur yang dapat menghasilkan respons lebih besar dari 5° , struktur dapat dimodelkan ke dalam perangkat lunak. Hasil dari pemodelan struktur harus dapat mencerminkan karakteristik struktur pada nyatanya. Karakteristik tersebut adalah sebagai berikut, respons struktur akan semakin besar jika periode gelombang yang digunakan mendekati periode natural struktur dan respons struktur akan semakin kecil ketika diberi nilai redaman.

Setelah didapatkan respons struktur yang memenuhi syarat, maka dapat ditentukan lokasi penempatan struktur. Pada Tugas Akhir ini, terdapat tiga lokasi tinjauan. Lokasi pertama adalah lokasi yang memiliki tinggi gelombang signifikan 1 m dengan periode gelombang 4 s, lokasi kedua memiliki tinggi gelombang signifikan 1.5 m dengan periode gelombang 6 s, lokasi ketiga memiliki tinggi gelombang signifikan 2 m dengan periode gelombang 8 s. Dari ketiga lokasi tinjauan tersebut, dibutuhkan sebuah fungsi kerapatan probabilitas profil gelombang untuk mendapatkan nilai kejadian profil gelombang.

Setelah didapatkan nilai kejadian suatu profil gelombang, maka daya yang dihasilkan oleh struktur yang dihitung secara analitik dengan cara menurunkan simpangan struktur menjadi kecepatan struktur lalu dikalikan dengan nilai koefisien redaman dari generator lalu, diintegrasikan menggunakan integral numerik trapesium. Daya yang dihasilkan dari perhitungan tersebut merupakan daya rata-rata. Untuk mendapatkan daya yang dihasilkan struktur selama satu tahun, daya rata-rata yang didapatkan dikalikan dengan nilai kejadian profil gelombang selama satu tahun.

Teori Gelombang Linear

Teori gelombang linear atau teori gelombang Airy adalah teori gelombang yang paling sederhana. Teori ini memiliki asumsi bahwa tinggi gelombang relatif kecil dibandingkan dengan panjang gelombang dan kedalaman

perairan. Persamaan kecepatan potensial untuk teori gelombang linear adalah

$$\phi = \frac{gH \cosh k(d+z)}{2 \cosh kd} \sin(kx - \omega t)$$

Selain persamaan kecepatan potensial, persamaan elevasi muka air dapat ditetapkan sebagai berikut

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$$

Persamaan dispersi gelombang ditunjukkan oleh persamaan

$$\omega^2 = gk \tanh kd$$

dimana

- ϕ = potensial kecepatan gelombang
- η = elevasi muka air [m]
- H = tinggi gelombang [m]
- g = percepatan gravitasi [m/s^2]
- ω = frekuensi sudut gelombang [rad/s]
- k = bilangan gelombang [1/m]
- d = kedalaman perairan [m]

Stabilitas Struktur Terapung

Kestabilan struktur terapung terbagi menjadi tiga kondisi.

1. Kondisi stabil, yaitu kondisi saat titik metasentris (M) berada di atas titik pusat gravitasi atau bisa disebut GM positif.
2. Kondisi netral, yaitu kondisi saat titik metasentris berada tepat pada titik pusat gravitasi atau bisa disebut GM=0.
3. Kondisi tidak stabil, yaitu kondisi saat titik metasentris berada dibawah titik pusat gravitasi atau bisa disebut GM negatif.

Ketiga kondisi tersebut dapat dituliskan dalam persamaan

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG}$$

dengan nilai $\overline{BM}$ dihitung dengan persamaan

$$\overline{BM} = \frac{I}{\nabla}$$

Keterangan

- $\overline{GM}$ = jarak titik pusat gaya gravitasi ke titik metasentris [m]
- $\overline{KB}$ = jarak dasar struktur ke titik pusat gaya apung [m]
- $\overline{BM}$ = jarak titik pusat gaya apung ke titik metasentris [m]

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

I = momen inersia dari waterplane area struktur terapung [m^4]

∇ = volume benda tercelup [m^3]

Gaya Gelombang

Persamaan Morison digunakan untuk struktur berukuran kecil (*small body*) dengan diameter yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan panjang gelombang. Morison menyatakan bahwa gaya gelombang yang bekerja merupakan penjumlahan dari dua gaya yakni gaya seret (*drag force*) dan gaya inersia (*inertia force*). Persamaan Morison dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$F_{gelombang} = F_{drag} + F_{inertia}$$

$$F_{gelombang} = \frac{1}{2} \rho C_d A |u|u + \rho C_M \nabla \ddot{u}$$

dimana:

- $F_{gelombang}$ = gaya gelombang [N]
- F_{drag} = gaya seret [N]
- $F_{inertia}$ = gaya inersia [N]
- ρ = massa jenis air [kg/m^3]
- C_d = koefisien *drag*
- A = luas proyeksi penampang [m^2]
- u = kecepatan partikel air [m/s]
- C_M = koefisien *inertia*
- ∇ = volume benda tercelup [m^3]
- $\ddot{u}$ = percepatan partikel air [m/s^2]

Persamaan Gerak Struktur Terapung

Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan respons dari sebuah struktur merupakan persamaan differensial non-homogen yang diturunkan melalui persamaan gerak struktur gerakan rotasional. Persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\sum M = I \ddot{\theta}$$

$$I \ddot{\theta} + (-W \overline{KG} \theta + F_b \overline{KB} \theta + \rho g I_{wl} \theta) = 0$$

Gaya yang bekerja pada struktur untuk gerakan rotasional merupakan momen, sehingga untuk menghitung gaya eksitasi yang bekerja dibutuhkan gaya gelombang yang nantinya akan dijadikan momen gelombang. Selain itu, di dalam persamaan momen gelombang terdapat

modifikasi dikarenakan adanya gerak relatif yang diakibatkan oleh struktur yang ditinjau bergerak dan juga partikel air yang tidak diam. Sehingga persamaan momen gelombang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \sum M &= I\ddot{\theta} \\ dM_{(t)} &= \frac{1}{2}\rho C_{DL}D[u - (d+z)\dot{\theta}](d+z)dz \\ &\quad + \rho A\dot{u}(d+z)dz \\ &\quad + \rho AC_A[\dot{u} - (d+z)\ddot{\theta}](d+z)dz \\ M_{(t)} &= \int_d^t \frac{1}{2}\rho C_{DL}D[u - (d+z)\dot{\theta}](d+z)dz \\ &\quad + \int_d^t \rho A\dot{u}(d+z)dz \\ &\quad + \int_d^t \rho AC_A[\dot{u} - (d+z)\ddot{\theta}](d+z)dz \\ \left[I + \int_d^t \rho AC_A(d+z)(d+z)dz + \right] \ddot{\theta} \\ &\quad + \left[\int_d^t \frac{1}{2}\rho C_{DL}D(d+z)(d+z)dz + \right] \dot{\theta} \\ &\quad + [-W\overline{KG} + F_b\overline{KB} + \rho g I_{wl}] \theta \\ &= \int_d^t \frac{1}{2}\rho C_{DL}Du(d+z)dz \\ &\quad + \int_d^t \rho A\dot{u}(d+z)dz + \int_d^t \rho AC_A\dot{u}(d+z)dz \\ I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta &= M(t) \end{aligned}$$

dimana:

- I = mass moment of inertia [kg/m²]
- A = area proyeksi bidang [m²]
- D = diameter/panjang proyeksi bidang [m]
- C_{DL} = koefisien drag yang telah dilinearisasi
- C_A = koefisien massa tambahan
- ρ = massa jenis air [kg/m³]
- g = percepatan gravitasi [m/s²]
- ∇ = volume benda tercelup [m³]
- u = kecepatan partikel air arah horizontal [m/s]
- $\dot{u}$ = percepatan partikel air arah horizontal [m/s²]
- W = berat struktur [N]
- F_b = gaya apung [N]
- $\overline{KG}$ = jarak dasar struktur (*keel*) ke titik pusat gaya gravitasi [m]
- $\overline{KB}$ = jarak dasar struktur (*keel*) ke titik pusat gaya apung [m]
- I_{wl} = inersia penampang struktur pada permukaan air laut [m⁴]

Dari persamaan tersebut, solusi untuk mengetahui respons struktur dapat dihitung.

Solusi untuk respons struktur dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \theta &= \theta_m \sin(kx - \omega t) \\ \theta_m &= \frac{F_{tot}}{\sqrt{(K - I \times \omega^2)^2 + (C \times \omega)^2}} \end{aligned}$$

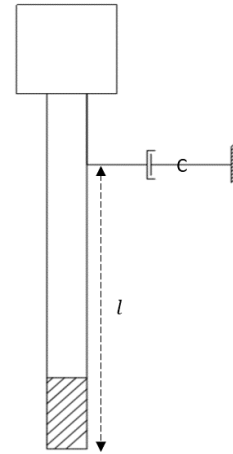
Metode Perhitungan Daya

Perhitungan daya diperhitungkan menggunakan hasil dari respons struktur. Daya sendiri merupakan jumlah energi yang dihasilkan atau dihabiskan per satuan waktu. Perhitungan daya yang akan digunakan dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$\bar{P} = \frac{1}{t} \int_0^t C \times (\dot{\theta}L)^2 dt$$

dimana:

- $\bar{P}$ = daya [W]
- t = durasi pemodelan [s]
- C = koefisien redaman generator [N.s/m]
- $\dot{\theta}$ = kecepatan sudut [1/s]
- L = jarak antara posisi generator dan titik putar struktur [m]



Gambar 1 Struktur Konverter Energi Gelombang dengan Redaman

Penentuan Dimensi Struktur

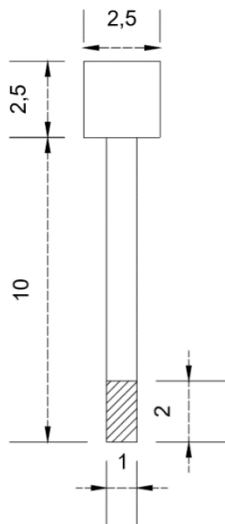
Dimensi struktur untuk perencanaan struktur konverter energi gelombang dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2 dengan gambar tampak depan dapat dilihat pada Gambar 2.

Tabel 1 Dimensi Struktur Atas

Parameter	Ukuran
Diameter Struktur Bawah (D_1)	1 m
Tinggi Struktur Bawah (H_1)	10 m
Tebal Dinding Struktur Bawah (t_1)	0.01 m
Diameter Ballast (D_b)	0.98 m
Tinggi Ballast (H_b)	2 m

Tabel 2 Dimensi Struktur Bawah

Parameter	Ukuran
Diameter Struktur Atas (D_2)	2.5 m
Tinggi Struktur Atas (H_2)	2.5 m
Tebal Dinding Struktur Atas (t_2)	0.005 m



Gambar 2 Tampak Depan Struktur Konverter Energi Gelombang

Massa Struktur dan Ballast

Massa struktur dan ballast dapat dihitung dengan mengalikan volume struktur dan ballast dengan massa jenis dari material struktur dan ballast. Sehingga massa struktur dan ballast dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$m = V \times \rho$$

dimana:

m = massa [kg]

V = volume [m^3]

ρ = massa jenis [kg/m^3]

Struktur bawah:

$$m_1 = 2441.489 \text{ kg}$$

Struktur atas:

$$m_2 = 769.131 \text{ kg}$$

Ballast:

$$m_b = 3620.623 \text{ kg}$$

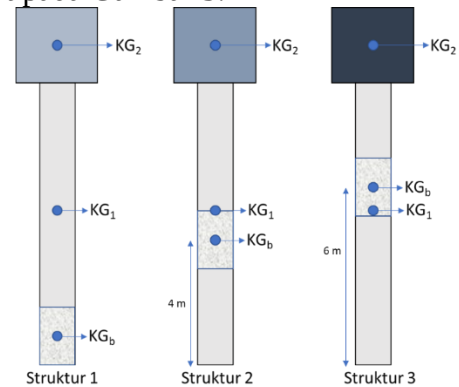
Total:

$$m_{tot} = 2441.489 + 769.131 + 3620.623$$

$$m_{tot} = 6831.242 \text{ kg}$$

Perhitungan KG Gabungan

Perbedaan titik berat untuk ketiga struktur dapat dilihat pada Gambar 3.

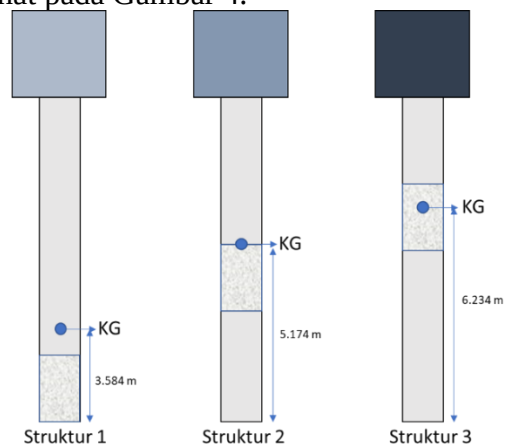


Gambar 3 Titik KG Untuk Setiap Komponen Struktur

$$KG_{gab} = \frac{2441.489 \times 5 + 769.131 \times 11.25 + 3620.623 \times 2.5}{2441.489 + 769.131 + 3620.623}$$

$$KG_{gab} = 3.584 \text{ m}$$

Nilai KG gabungan untuk ketiga struktur dapat dilihat pada Gambar 4.



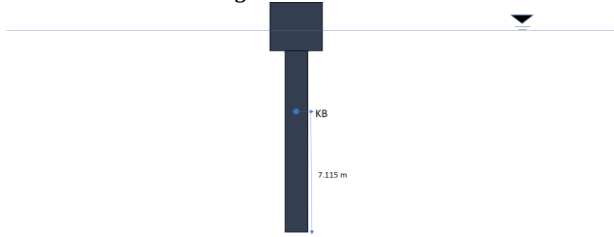
Gambar 4 Titik KG Untuk Tiap Struktur

Perhitungan KB Gabungan

Nilai titik KB dapat dicari menggunakan persamaan berikut dengan nilai yang dapat dilihat pada Gambar 5.

$$KB_{gab} = \frac{7.854 \times 5 + 4.909 \times 10.5}{7.854 + 4.909}$$

$$KB_{gab} = 7.115 \text{ m}$$



Gambar 5 Titik KB

Kestabilan Struktur

Kestabilan struktur yang telah direncanakan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Pengecekan Kestabilan Struktur

Struktur	Nilai KM (m)	Nilai KG (m)	Pengecekan Kestabilan
Struktur 1	7.165	3.584	Stabil
Struktur 2	7.165	5.174	Stabil
Struktur 3	7.165	6.234	Stabil

Persamaan Gerak Struktur Free Vibration

$$I_{mtot} \ddot{\theta} + (-WKG\theta + FBKB\theta + \rho g I_{wl}\theta) = 0$$

$$260317.289\ddot{\theta} + 676774.086\theta = 0$$

Frekuensi Natural Analitik

Frekuensi natural struktur dapat dilihat pada Tabel 4.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{I}}$$

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n}$$

Tabel 4 Frekuensi dan Periode Natural Struktur

Struktur	Frekuensi Natural (rad/s)	Periode Natural (s)
Struktur 1	2.05	3.065
Struktur 2	1.475	4.261
Struktur 3	1.188	5.288

Respons Struktur Free Vibration

$$\theta = C_1 \sin \omega_n t + C_2 \cos \omega_n t$$

$$\dot{\theta} = C_1 \omega_n \cos \omega_n t - C_2 \omega_n \sin \omega_n t$$

Jika struktur diberi simpangan sebesar $\theta = 15^\circ$ pada saat waktu $t = 0$ dan $\dot{\theta} = 0$ pada $t = 0$ maka didapatkan respons struktur pada saat kondisi *free vibration* sebagai berikut:

$$C_2 = 15^\circ$$

$$C_1 = 0$$

$$\theta = 15 \cos(2.05t)$$

Tabel 5 Respons Struktur Free Vibration

Struktur	Respons Struktur
Struktur 1	$15 \cos(2.05t)$
Struktur 2	$15 \cos(1.475t)$
Struktur 3	$15 \cos(1.188t)$

Respons Struktur dengan Gaya Eksitasi

Contoh perhitungan menggunakan tinggi gelombang sebesar 1 meter dan periode gelombang sepanjang 4 detik.

Perhitungan Mass Moment of Inertia

Mass moment of inertia untuk Kondisi H 1m T 4s dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6 Mass Moment of Inertia Struktur Kondisi H 1m T 4s

Struktur	Mass moment of inertia (kg.m ²)
Struktur 1	229739.003
Struktur 2	262324.608
Struktur 3	320254.571

Perhitungan Redaman Struktur

Redaman struktur untuk Kondisi H 1m T 4s dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7 Redaman Struktur Kondisi H 1m T 4s

Struktur	Redaman (N.s/m)
Struktur 1	340672.898
Struktur 2	340672.898
Struktur 3	340672.898

Perhitungan Gaya Eksitasi

Momen Total untuk Kondisi H 1m T 4s dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 8 Momen Total Pada Kondisi H 1m T 4s

Struktur	Momen Total
Struktur 1	$76307.253 \sin(0.112x - 1.047t + 0.11)$
Struktur 2	$76307.253 \sin(0.112x - 1.047t + 0.11)$
Struktur 3	$76307.253 \sin(0.112x - 1.047t + 0.11)$

Respons Struktur dengan Gaya Eksitasi

Persamaan gerak struktur dengan gaya eksitasi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$229739.003\ddot{\theta} + 340672.898\dot{\theta} + 692021.766\theta = 76307.253 \sin(0.112x - 1.047t)$$

Didapatkan respons struktur untuk ketiga struktur yang dapat dilihat pada Tabel 12.

$$\theta_m = \frac{M_{tot}}{\sqrt{(K - I \times \omega^2)^2 + (C \times \omega)^2}}$$

Tabel 9 Respons Struktur Pada Kondisi H 1m T 4s

Struktur	Respons Struktur
Struktur 1	$7.955 \sin(0.112x - 1.047t)$
Struktur 2	$8.116 \sin(0.112x - 1.047t)$

Struktur 3	$7.263 \sin(0.112x - 1.047t)$
------------	-------------------------------

Periode Natural Struktur Pemodelan

Periode natural struktur pemodelan dapat dilihat melalui *spectral density*-nya. Untuk kasus *free vibration*, struktur akan diberi simpangan sebesar 10° dan tidak diberikan input apapun pada bagian *drag*, *added mass*, *damping* serta tinggi gelombang dan periode gelombang.

Frekuensi pada saat nilai *spectral density* maksimum menunjukkan bahwa frekuensi tersebut merupakan frekuensi natural dari struktur. Sehingga didapatkan frekuensi dan periode natural struktur sebagai berikut:

Tabel 10 Frekuensi dan Periode Natural Struktur *Free Vibration*

Struktur	Frekuensi Natural (Hz)	Periode Natural (s)
Struktur 1	0.28	3.571
Struktur 2	0.21	4.762
Struktur 3	0.17	5.882

Jika struktur yang dimodelkan dimasukkan input *drag*, *added mass* dan *damping* maka hasil untuk periode natural struktur akan berubah sehingga menyebabkan adanya perbedaan perhitungan periode natural antara hasil analitik dan hasil pemodelan.

Tabel 11 Frekuensi dan Periode Natural Struktur Setelah Diberi Input

Struktur	Frekuensi Natural (Hz)	Periode Natural (s)
Struktur 1	0.1	10
Struktur 2	0.09	11.11
Struktur 3	0.08	12.5

Untuk frekuensi natural perhitungan analitik, perhitungan hanya menggunakan *mass moment of inertia* struktur serta kekakuan struktur berbeda dengan hasil pemodelan yang memasukan adanya pertambahan *drag* serta *added mass* ke dalam persamaannya sehingga menyebabkan perbedaan yang cukup signifikan.

Respons Struktur Menggunakan Pemodelan Perangkat Lunak

Berikut merupakan contoh hasil respons struktur yang didapatkan melalui perangkat lunak. Contoh yang digunakan merupakan kondisi H 1m dan T 4s untuk ketiga struktur.

Tabel 12 Rangkuman Respons Struktur Hasil Pemodelan

Kombinasi 1 (H 1m T 4s)			
Struktur	Struktur 1	Struktur 2	Struktur 3
Respons Max (θ)	0.997	0.903	0.829
Respons Min (θ)	-1.009	-0.910	-0.826
Kombinasi 2 (H 1.5m T 4s)			
Struktur	Struktur 1	Struktur 2	Struktur 3
Respons Max (θ)	1.551	1.431	1.348
Respons Min (θ)	-1.501	-1.335	-1.185
Kombinasi 3 (H 2m T 4s)			
Struktur	Struktur 1	Struktur 2	Struktur 3
Respons Max (θ)	2.188	2.092	2.056
Respons Min (θ)	-1.933	-1.659	-1.390
Kombinasi 4 (H 1m T 6s)			
Struktur	Struktur 1	Struktur 2	Struktur 3
Respons Max (θ)	2.713	2.276	1.983
Respons Min (θ)	-2.617	-2.236	-1.976
Kombinasi 5 (H 1.5m T 6s)			
Struktur	Struktur 1	Struktur 2	Struktur 3
Respons Max (θ)	4.091	3.425	2.982
Respons Min (θ)	-3.869	-3.329	-2.955
Kombinasi 6 (H 2m T 6s)			
Struktur	Struktur 1	Struktur 2	Struktur 3
Respons Max (θ)	5.470	4.579	3.991
Respons Min (θ)	-5.052	-4.381	-3.904
Kombinasi 7 (H 1m T 8s)			
Struktur	Struktur 1	Struktur 2	Struktur 3
Respons Max (θ)	5.556	4.264	3.472
Respons Min (θ)	-5.334	-4.115	-3.360
Kombinasi 8 (H 1.5m T 8s)			
Struktur	Struktur 1	Struktur 2	Struktur 3
Respons Max (θ)	8.238	6.436	5.254
Respons Min (θ)	-7.783	-6.130	-5.014
Kombinasi 9 (H 2m T 8s)			
Struktur	Struktur 1	Struktur 2	Struktur 3
Respons Max (θ)	10.846	8.619	7.066
Respons Min (θ)	-10.081	-8.096	-6.637

Data Lokasi Tinjauan

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

dimana:

$p(H, T)$ = fungsi kerapatan probabilitas

$$H_* = \frac{H}{\sqrt{m_0}}$$

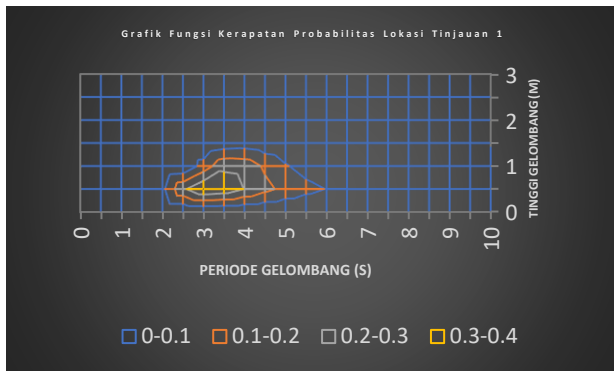
T_* = $\frac{T}{T_z}$
 $\bar{T}_z$ = rata-rata periode gelombang zero upcrossing [s]
 v = lebar parameter spektrum
 H = tinggi gelombang [m]
 T = periode gelombang [s]

Untuk parameter m_0 dan m_2 dapat dihitung dengan menggunakan spektrum gelombang Bretschneider.

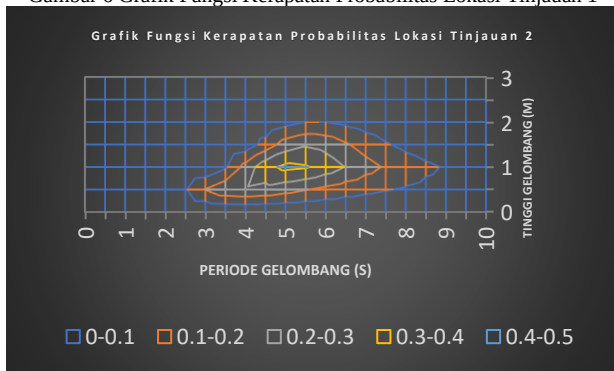
$$S(\omega) = 1.25 \frac{\omega_p^4 H_s^2}{4} \omega^{-5} e^{-1.25 \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4}$$

$$m_n = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega$$

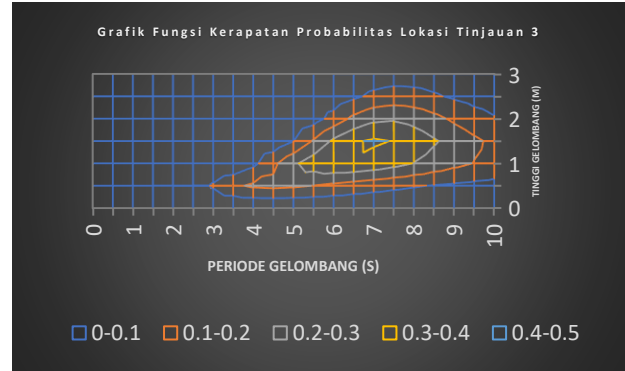
Dengan menggunakan tinggi gelombang dari 0 meter sampai dengan 3 meter dengan interval 0.5 meter dan periode gelombang dari 0 detik sampai dengan 10 detik dengan interval 0.5 detik maka didapatkan grafik fungsi kerapatan probabilitas



Gambar 6 Grafik Fungsi Kerapatan Probabilitas Lokasi Tinjauan 1



Gambar 7 Grafik Fungsi Kerapatan Probabilitas Lokasi Tinjauan 2



Gambar 8 Grafik Fungsi Kerapatan Probabilitas Lokasi Tinjauan 3

Untuk menguji keakuratan grafik fungsi kerapatan probabilitas dan untuk mencari jumlah kejadian pada setiap profil gelombang perlu dicari volume di bawah grafik fungsi kerapatan gelombang.

$$V_{utg} = \nabla T \times \nabla H \times p(H, T)$$

dimana:

V_{utg} = volume dibawah grafik

∇T = jarak antara periode gelombang

∇H = jarak antara tinggi gelombang

$p(H, T)$ = fungsi kerapatan probabilitas

Setelah didapatkan jumlah volume di bawah grafik fungsi kerapatan gelombang yang bernilai kurang lebih sama dengan satu, maka dapat ditentukan jumlah kejadian untuk setiap profil gelombang dalam satu tahun.

$$n = V_{utg} \times 365 \times 24$$

Perhitungan Daya Teoritis

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H^2 T$$

dimana:

P = daya teoritis [W]

ρ = massa jenis air [kg/m^3]

g = percepatan gravitasi [m/s^2]

H = tinggi gelombang [m]

T = periode gelombang [s]

Untuk mendapatkan daya teoritis yang dapat dihasilkan pada lokasi tinjauan dalam kurun waktu satu tahun digunakan persamaan sebagai berikut

$$P_{total} = \bar{P} \times n$$

dimana:

P_{total} = total daya yang dihasilkan [MWh]

$\bar{P}$ = rata-rata daya yang dihasilkan [MW]

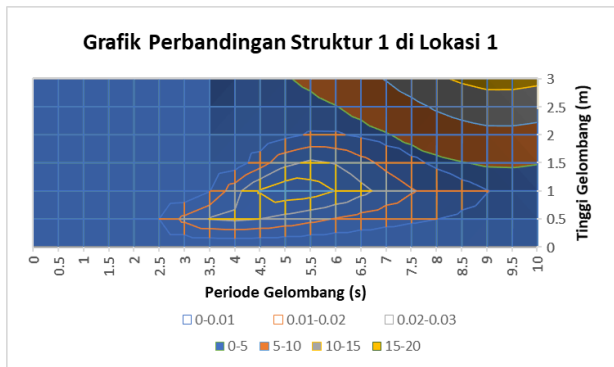
n = jumlah kejadian untuk suatu profil gelombang

Tabel 13 Daya Teoritis untuk Setiap Lokasi Tinjauan

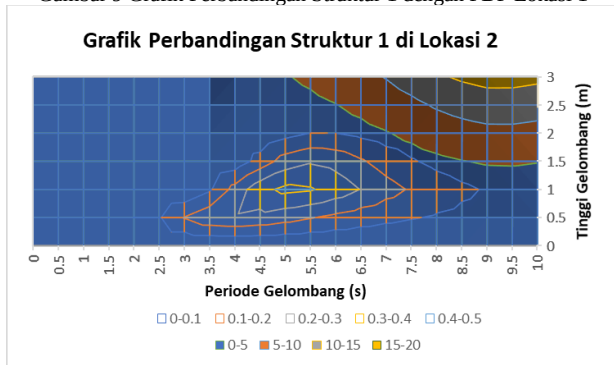
Lokasi Tinjauan	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3
Daya Teoritis (MWh)	9261.81	28641.05	54348.21
Rata-rata Daya Teoritis (MW)	1.06	3.27	6.20

Daya yang Dihasilkan Selama Satu Tahun

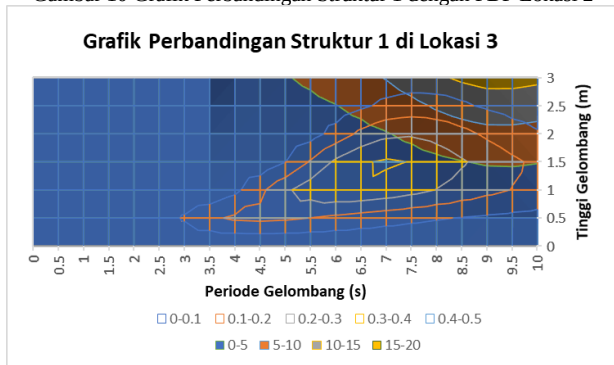
Untuk mengetahui keoptimalan struktur yang direncanakan pada lokasi tinjauan, dapat dilakukan perbandingan grafik kontur *probability density function* dan grafik kinerja struktur. Hasil daya teoritis dan daya yang dihasilkan oleh struktur dapat dilihat pada Tabel 17.



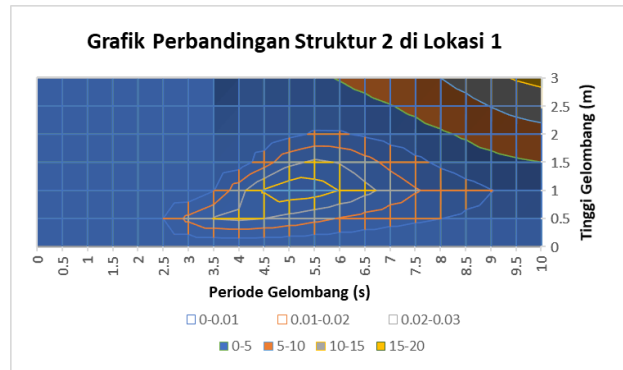
Gambar 9 Grafik Perbandingan Struktur 1 dengan PDF Lokasi 1



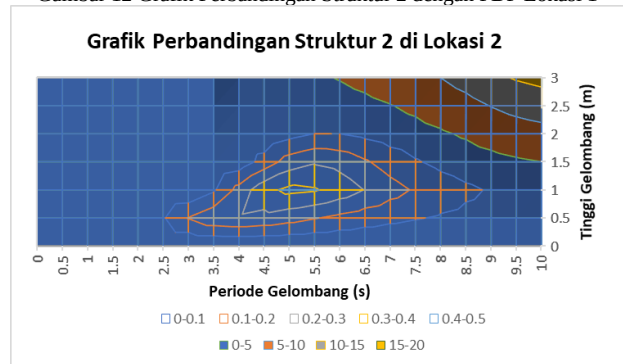
Gambar 10 Grafik Perbandingan Struktur 1 dengan PDF Lokasi 2



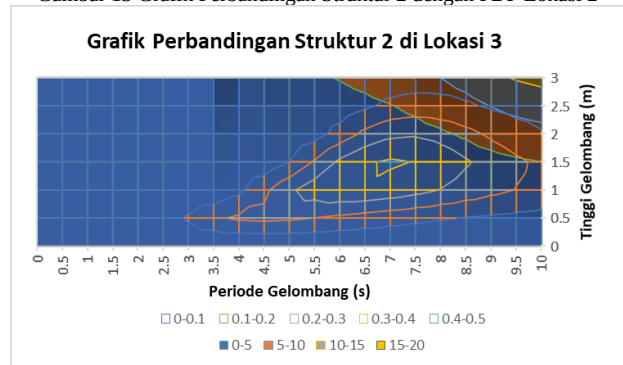
Gambar 11 Grafik Perbandingan Struktur 1 dengan PDF Lokasi 3



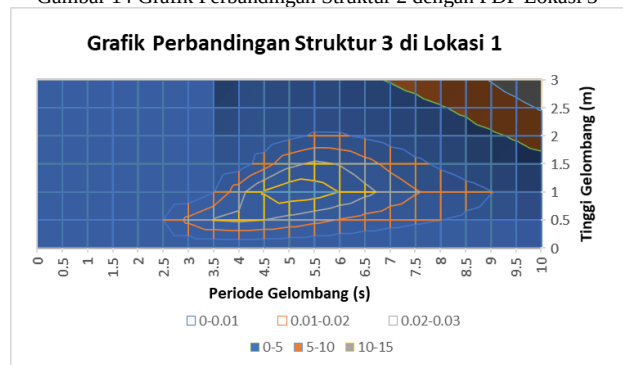
Gambar 12 Grafik Perbandingan Struktur 2 dengan PDF Lokasi 1



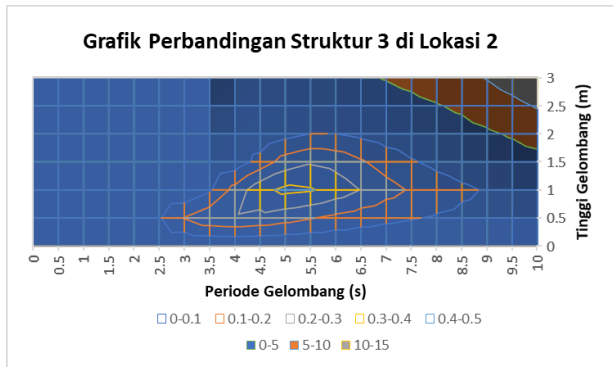
Gambar 13 Grafik Perbandingan Struktur 2 dengan PDF Lokasi 2



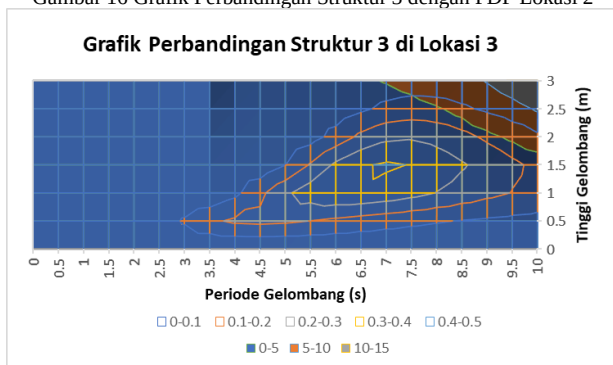
Gambar 14 Grafik Perbandingan Struktur 2 dengan PDF Lokasi 3



Gambar 15 Grafik Perbandingan Struktur 3 dengan PDF Lokasi 1



Gambar 16 Grafik Perbandingan Struktur 3 dengan PDF Lokasi 2



Gambar 17 Grafik Perbandingan Struktur 3 dengan PDF Lokasi 3

Tabel 14 Rekap Tabel Daya Teoritis dan Daya Struktur pada Lokasi Tinjauan

Daya Teoritis			
Lokasi Tinjauan	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3
Daya Teoritis (MWh)	9261.81	28641.05	54348.21
Rata-rata Daya Teoritis (MW)	1.06	3.27	6.20
Struktur 1			
Lokasi Tinjauan	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3
Daya Total (MWh)	1491.95	7422.45	20136.98
Rata-rata (MW)	0.17	0.85	2.30
Struktur 2			
Lokasi Tinjauan	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3
Daya Total (MWh)	1096.50	5207.12	14419.29
Rata-rata (MW)	0.13	0.59	1.65
Struktur 3			
Lokasi Tinjauan	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3
Daya Total (MWh)	849.56	3902.96	10158.75
Rata-rata (MW)	0.10	0.45	1.16

KESIMPULAN

Kesimpulan dari Tugas Akhir ini adalah:

1. Dimensi struktur konverter gelombang yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2. Dimensi struktur yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.
2. Respons dinamik yang dihasilkan oleh struktur dapat dilihat pada Tabel 12.
3. Daya keseluruhan yang dihasilkan oleh struktur dan rata-rata daya yang dihasilkan oleh struktur selama satu tahun dapat dilihat pada Tabel 14.
4. Struktur yang menghasilkan daya terbesar merupakan Struktur 1 yang ditempatkan pada Lokasi Tinjauan 3.

SARAN

Saran untuk mengembangkan Tugas Akhir ini adalah:

1. Melakukan pemodelan struktur menggunakan gelombang acak agar didapatkan hasil yang lebih mendekati dengan kondisi sebenarnya.
2. Melakukan perancangan struktur yang berbeda, tidak hanya merancang letak ballast pada struktur melainkan dapat merubah diameter struktur, berat ballast dan tebal struktur.
3. Melakukan perancangan struktur yang memiliki periode alamiah yang mendekati dengan periode gelombang yang akan diuji sehingga hasil yang didapatkan lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Chakrabarti, S. K. (2005). *Handbook of Offshore Engineering*. Amsterdam: Elsevier.
- Departement of The Army. (1984). *Shore Protection Manual*. Mississippi: Departement of The Army.
- Faltinsen, O. M. (1990). *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kreuzig, E. (1998). *Advanced Engineering Mathematics*. John Wiley & Sons.
- Robert G. Dean, R. A. (2000). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.