

**PEMODELAN DAN SIMULASI RESPON HIDRODINAMIK STRUKTUR
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT (PLTGL)
MENGUNAKAN ANSYS AQWA**

(Skripsi)

Oleh:

Rezza Syakhdan Syaputra

NPM 2115021087



PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2026

**PEMODELAN DAN SIMULASI RESPON HIDRODINAMIK STRUKTUR
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT (PLTGL)
MENGUNAKAN ANSYS AQWA**

Oleh :

Rezza Syakhdan Syaputra

2115021087

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK



PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2026

ABSTRAK

PEMODELAN DAN SIMULASI RESPON HIDRODINAMIK STRUKTUR PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT (PLTGL) MENGUNAKAN ANSYS AQWA

Oleh

Rezza Syakhdan Syaputra

Indonesia memiliki potensi energi gelombang laut yang besar sebagai sumber energi terbarukan. Salah satu teknologi pemanfaatannya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) dengan sistem pelampung tipe *point absorber*. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa penyerapan energi gelombang pada model pelampung PLTGL melalui analisis respons hidrodinamika dan efisiensi daya serap. Pemodelan dan simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS AQWA dengan metode *hydrodynamic diffraction* dalam domain frekuensi. Struktur yang dianalisis berupa pelampung silinder dengan panjang 500 mm dan diameter 168 mm. Simulasi menggunakan gelombang reguler dengan variasi kecepatan putar pembangkit gelombang sebesar 46, 56, dan 62 RPM. Analisis difokuskan pada respons gerak heave. Parameter hidrodinamika yang dikaji meliputi *added mass*, *radiation damping*, *excitation force*, dan *Response Amplitude Operator* (RAO). Nilai RAO digunakan untuk menghitung amplitudo gerak pelampung, daya gelombang yang diserap, dan efisiensi daya serap. Hasil simulasi menunjukkan bahwa respons heave dan efisiensi daya serap sangat dipengaruhi oleh frekuensi gelombang, dengan nilai maksimum terjadi di sekitar kondisi resonansi sistem. Penelitian ini menunjukkan bahwa ANSYS AQWA dapat digunakan secara efektif untuk menganalisis respons hidrodinamika dan potensi penyerapan energi pada sistem PLTGL.

Kata kunci: PLTGL, point absorber, ANSYS AQWA, RAO, efisiensi daya serap.

ABSTRACT

MODELING AND SIMULATION OF THE HYDRODYNAMIC RESPONSE OF OCEAN WAVE POWER PLANT (PLTGL) STRUCTURES USING ANSYS AQWA

By

Rezsa Syakhdan Syaputra

Indonesian has significant ocean wave energy potential as a renewable energy source. One technology to utilize this potential is a Wave Power Plant (PLTGL) using a point absorber floating system. This study aims to evaluate the wave energy absorption performance of a PLTGL buoy through hydrodynamic response analysis and energy absorption efficiency. Numerical simulations were conducted using ANSYS AQWA with a hydrodynamic diffraction approach in the frequency domain. The analyzed structure is a cylindrical buoy with a length of 500 mm and a diameter of 168 mm. Regular waves were applied with variations of generator rotational speeds of 46, 56, and 62 RPM. The analysis focused on the heave motion response. The evaluated hydrodynamic parameters include added mass, radiation damping, excitation force, and the Response Amplitude Operator (RAO). RAO values were used to calculate the buoy motion amplitude, absorbed wave power, and energy absorption efficiency. The results show that the heave response and energy absorption efficiency are strongly influenced by wave frequency, with maximum values occurring near the system's resonance condition. This study confirms that ANSYS AQWA is an effective tool for analyzing hydrodynamic behavior and wave energy absorption potential of PLTGL systems.

Keywords: *Wave Power Plant, point absorber, ANSYS AQWA, RAO, energy absorption efficiency.*

LEMBAR PENGESAHAN

Judul skripsi : PEMODELAN DAN SIMULASI RESPON
HIDRODINAMIK STRUKTUR PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT
(PLTGL) MENGGUNAKAN ANSYS AQWA

Nama Mahasiswa : **Rezza Syakhdan Syaputra**

NPM : 2115021087

Program Studi : S1 Teknik Mesin

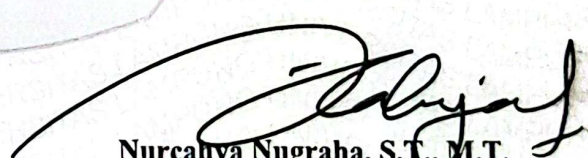
Fakultas : Teknik



Pembimbing I

Pembimbing II


Asnawi Lubis, S.T., M.Sc., Ph. D.
NIP 197004121997031006


Nurcahya Nugraha, S.T., M.T.
NIP 199510112024061001

MENGETAHUI

Ketua Jurusan Teknik Mesin

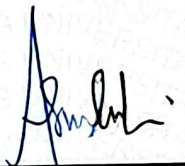
Ketua Program Studi S1


Ahmad Sudi, S.T., M.T.
NIP 197408162000121001


Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP 197908212003121003

MENGESAHKAN**1. Tim Penguji**

Ketua Penguji : Asnawi Lubis, S.T., M.Sc., Ph. D.



Anggota Penguji : Nurcahya Nugraha, S.T., M.T.



Penguji Utama : Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung

Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.

NIP 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 03 Februari 2026

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama mahasiswa : Rezza Syakhdan Syaputra
Nomor Pokok Mahasiswa : 2115021087
Program Studi : S1 Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul “Pemodelan dan Simulasi Respon Hidrodinamik Struktur Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) Menggunakan ANSYS AQWA” adalah hasil karya ilmiah saya sendiri yang disusun untuk memenuhi salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Universitas Lampung. Skripsi ini tidak mengandung karya atau tulisan orang lain, baik sebagian maupun seluruhnya, kecuali yang telah disebutkan secara jelas dalam kutipan dan daftar pustaka sebagaimana layaknya karya ilmiah. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku di Universitas Lampung.

Pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan saya bersedia menanggung segala akibat yang ada, apabila pernyataan ini tidak benar.

Bandar Lampung, 30 Januari 2026



Rezza Syakhdan Syaputra
NPM 2115021087

RIWAYAT HIDUP



Rezza Syakhdan Syaputra lahir pada 13 Januari 2004, di Kota Bandung, Jawa Barat. Merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Ibu Lindawati dan Bapak Suganda. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN 2 Oku Timur hingga tahun 2015, kemudian melanjutkan pendidikan tingkat menengah di SMP Negeri 1 Madang Suku III yang selesai pada tahun 2018, dan melanjutkan pendidikan tingkat menengah atas di SMA Negeri 2 Ogan Komering Ulu dan lulus pada tahun 2021. Pada tahun 2021, penulis melanjutkan studi S1 Teknik Mesin di Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN. Selama proses perkuliahan, penulis aktif tergabung dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai anggota divisi Dana dan Usaha periode 2024/2025. Penulis berkesempatan untuk melakukan Kerja Praktik (KP) pada tahun 2025 di PT. Sumatera Prima Fibreboard, Sumatera Selatan dengan judul laporan “Analisis Kualitas Produk *Medium Density Fibreboard* (MDF) Dengan Pendekatan Six Sigma Area Line 2 di PT. Sumatera Prima Fibreboard” penulis menyelesaikan program studi S1 Teknik Mesin dengan judul skripsi “Pemodelan dan Simulasi Respon Hidrodinamik Struktur Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) Menggunakan ANSYS AQWA”, di bawah bimbingan Dr. Asnawi Lubis dan Bapak Nurcahya Nugraha, S.T., M.T.

MOTTO

“Tidak semua pertarungan terlihat, beberapa terjadi di dalam diri dan aku menang hari ini”

(Rezza Syakhdan Syaputra)

”Mereka akan mencoba meredupkanmu, lalu meniru caramu bersinar”

(Rezza Syakhdan Syaputra)

“Ketika sudah mulai fokus pada impianmu, kesepian adalah harga yang harus kamu bayar”

(Kalimasada)

UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, karunia, dan nikmat-Nya kepada Penulis, sehingga Penulis dapat menyusun dan menyelesaikan skripsi ini dengan judul **“PEMODELAN DAN SIMULASI RESPON HIDRODINAMIK STRUKTUR PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT (PLTGL) MENGGUNAKAN ANSYS AQWA”**. Skripsi ini disusun guna memenuhi salah satu syarat mencapai gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Dalam penyusunan skripsi ini banyak pihak yang telah memberikan pengalaman, dukungan, dan bantuan baik secara materi maupun motivasi. Hal tersebutlah yang sangat memotivasi penulis dalam menyelesaikan Skripsi ini. Untuk itu, dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan rasa terimakasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Ahmad Suudi, S.T, M.T. Selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. Selaku Ketua Prodi S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Dr. Asnawi Lubis. Selaku dosen pembimbing akademik sekaligus dosen pembimbing I yang telah banyak memberikan waktu dalam membimbing dan memberikan arahan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Bapak Nurcahya Nugraha, S.T., M.T. Selaku Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan waktu dalam membimbing dan memberikan saran dalam

penyelesaian Tugas Akhir ini.

6. Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T. Selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan kritik dan masukan yang bermanfaat dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
7. Seluruh Dosen, Staff dan karyawan Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
8. Kepada kedua orang tua terhebat, Bapak Suganda dan Ibu Lindawati, terima kasih atas cinta yang tak pernah habis, pengorbanan yang tak pernah terlihat lelah, dan doa yang tak pernah berhenti menyertai langkah anakmu ini. Saya menyadari, perjalanan saya hingga berada di titik ini bukanlah hasil dari usaha saya semata, melainkan dari perjuangan panjang Bapak dan Ibu yang selalu mendahulukan masa depan saya di atas segalanya. Di saat kesempatan pendidikan dahulu tidak sepenuhnya berpihak kepada kalian, Bapak dan Ibu justru berjuang tanpa ragu agar anak laki-laki satu-satunya ini dapat meraih pendidikan setinggi mungkin.

Kepada Bapak, terima kasih atas setiap tetes keringat yang jatuh dalam diam, atas kerja keras yang mungkin tak pernah saya lihat sepenuhnya, namun selalu saya rasakan hasilnya. Terima kasih telah menjadi contoh nyata tentang arti tanggung jawab, keteguhan, dan cinta seorang ayah yang tidak banyak bicara, tetapi selalu berbuat. Dari Bapak, saya belajar tentang kekuatan, kesabaran, dan arti menjadi seorang laki-laki yang memikul keluarga dengan penuh kehormatan.

Kepada Ibu, terima kasih atas doa yang tak pernah putus, bahkan ketika saya sendiri hampir menyerah. Terima kasih atas pelukan yang menenangkan, nasihat yang menguatkan, dan kasih sayang tanpa batas yang selalu menjadi rumah paling aman bagi saya. Kesabaran dan pengorbanan Ibu adalah cahaya yang menuntun saya melewati setiap kesulitan. Ibu adalah sumber kekuatan terbesar saya, pelita yang tak pernah padam dalam hidup saya. Saya mungkin tidak akan pernah mampu membalas semua yang telah Bapak dan Ibu berikan. Namun setiap langkah, setiap pencapaian, dan setiap keberhasilan yang saya raih akan selalu saya niatkan sebagai bentuk bakti dan rasa terima kasih saya kepada kalian.

9. Penulis mengucapkan terimakasih kepada Yoar Allyahmar Santoso, teman seperjuangan skripsi yang selalu membantu dan berdiskusi dalam mengerjakan penelitian skripsi ini.

10. Teman-teman Teknik Mesin Angkatan 2021 dan Tim Lab Mekanika Struktur yang menemani dan memberikan bantuan selama penulis menginjakkan kaki di bangku perkuliahan hingga fase skripsi.
11. Penulis menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, sehingga penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak. Akhir kata penulis sangat berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan para pembacanya.

Bandar Lampung, 30 Januari 2026

Penulis,



Rezza Syakhdan Syaputra
NPM 2115021087

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
MENGESAHKAN.....	vi
LEMBAR PERNYATAAN.....	vii
RIWAYAT HIDUP.....	viii
MOTTO	ix
UCAPAN TERIMA KASIH	x
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xvii
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan.....	4
1.3. Batasan Masalah.....	4
1.4. Sistematika Penulisan.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Gelombang Laut.....	6
2.2. Teori Gelombang Laut	7
2.2.1. Teori Gelombang Airy	8
2.2.2. Teori Gelombang Stokes	8
2.2.3. Teori Gelombang Knodal.....	9
2.2.4. Teori Gelombang Solitary	9
2.3. Teori Dasar Gerakan Gelombang Laut	10
2.4. Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL).....	11
2.5. Klasifikasi PLTGL	12
2.6. Mekanisme Kerja PLTGL	17

2.7. Titik – titik Stabilitas.....	18
2.8. <i>Response Amplitude Operator</i> (RAO)	20
2.9. Gaya Apung	21
2.10. ANSYS AQWA.....	22
2.10.1 Definisi.....	22
2.10.2 Fitur.....	23
2.10.3 ANSYS AQWA <i>Hydrodynamic Diffraction</i>	23
2.10.4 Keluaran (Output)	23
2.11. <i>Boundary Element Method</i> (BEM)	26
III. METODOLOGI PENELITIAN.....	28
3.1. Diagram Alir Penelitian	28
3.2. Rancangan Penelitian.....	30
3.3. Metode Penelitian	31
3.3.1. Studi Literatur	31
3.3.2 Pembuatan Model Geometri	32
3.3.3. Penentuan Parameter dan Kondisi Simulasi	32
3.3.4. Pre-Processing.....	33
3.3.5 Kondisi Batas	36
3.3.6. <i>Solution Processing</i>	37
3.3.7. <i>Post-Processing</i>	38
3.3.8. Analisis Data dan Validasi	39
3.4. Alat dan Bahan.....	42
3.5. Skema Alat Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut.....	43
3.6. Waktu dan Tempat Penelitian.....	44
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	45
4.1. Hasil Simulasi Hidrodinamika Struktur.....	45
4.1.1 Data Frekuensi Gelombang.....	45
4.1.2 Data Hidrodinamika Hasil Simulasi	48
4.1.3 Added Mass.....	48
4.1.4 Radiation Damping	53
4.1.5 Excitation Force	55
4.1.6 <i>Response Amplitude Operator</i> (RAO)	57
4.2. Perhitungan Efisiensi Daya Serap Gelombang	60
4.2.1 Penentuan Frekuensi Sudut Gelombang	61

4.2.2 Penentuan Amplitudo Gelombang Datang.....	61
4.2.3 Penentuan Amplitudo Gerak <i>Heave</i> Pelampung.....	61
4.2.4 Perhitungan Daya Gelombang yang Diserap Pelampung.....	62
4.2.5 Perhitungan Daya Gelombang Datang.....	62
4.2.6 Perhitungan Efisiensi Daya Serap Gelombang.....	62
4.3. Validasi Efisiensi Daya Serap gelombang	66
4.4. Diagram Sankey	68
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	71
5.1. Kesimpulan	71
5.2. Saran	72
DAFTAR PUSTAKA.....	73

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1 (a). PLTGL-SP/SB dan (b). Skema PLTGL-OWC.....	2
Gambar 1.2 PLTGL Point Absorber	2
Gambar 2.1 Parameter Gelombang Laut.....	7
Gambar 2.2 Profil Permukaan Ombak	9
Gambar 2.3 <i>Six Degree of Freedom</i> pada kapal.....	10
Gambar 2.4. Attenuator	12
Gambar 2.5. Oscillating Water Collumn.....	13
Gambar 2.6. Overtopping Device	14
Gambar 2.7. Oscillating Wave Surge Converter	15
Gambar 2.8. <i>Point Absorber</i>	16
Gambar 2.9 Submerged Pressure Differential.....	16
Gambar 2.10 Titik Stabilitas Transversal Kapal	20
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian.....	28
Gambar 3.2 Geometri Pelampung.....	33
Gambar 3.3 Meshing Desain Geometri Pelampung.....	35
Gambar 3.4 Simulasi Gelombang	35
Gambar 3.5 Enam Derajat Kebebasan Gerak	36
Gambar 3.6 Simulasi Struktur Pelampung.....	37
Gambar 3.7 Lebar Efektif Pelampung	41
Gambar 3.8 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut.....	44
Gambar 4.1 Ilustrasi Fenomena Added Mass	49
Gambar 4.2 Grafik Added Mass.....	50
Gambar 4.3 Ilustrasi Fenomena Radiation Damping	53
Gambar 4.4 Grafik Radiation Damping	54
Gambar 4.5 Ilustrasi Fenomena Excitation Force.....	56
Gambar 4.6 Grafik Excitation Force	56

Gambar 4.7 Ilustrasi Fenomena RAO	58
Gambar 4.8 Grafik RAO	59
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Efisiensi Daya Serap	63
Gambar 4.10 Diagram Sankey	69

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Detail Dimensi.....	32
Tabel 3.2 Data Parameter Gelombang	33
Tabel 3.3 Detail Meshing	34
Tabel 3.4 Data hasil simulasi	39
Tabel 4.1 Parameter Gelombang	46
Tabel 4.2 Perbandingan Nilai Efisiensi Daya Serap Gelombang.....	63
Tabel 4.3 Perbandingan Efisiensi Hidrodinamika.....	67

I. PENDAHULUAN

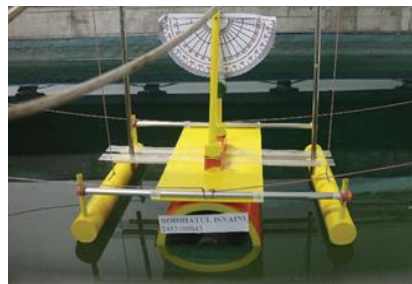
1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan luas wilayah perairan yang mencapai sekitar tiga kali luas daratan, yaitu sebesar 3.544.743,9 km² (Irfan, 2017). Kondisi tersebut menjadikan Indonesia sebagai negara maritim dengan garis pantai sepanjang 95.181 km yang memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan yang berasal dari laut. Besarnya potensi tersebut merupakan keuntungan strategis bagi Indonesia dalam pengembangan energi laut. Energi laut dapat dihasilkan dari pergerakan massa air dan perbedaan suhu lapisan laut (samudera), yang meliputi energi pasang surut, energi gelombang, energi arus laut, serta energi perbedaan suhu lapisan laut. Secara khusus, perairan Indonesia di sepanjang pantai selatan Pulau Jawa hingga Nusa Tenggara merupakan wilayah dengan potensi energi gelombang yang cukup besar, yaitu berkisar antara 10–20 kW per meter gelombang (Parjiman dkk., 2018).

Pemanfaatan energi gelombang laut sebagai sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan telah banyak dikaji oleh para peneliti, salah satunya melalui pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTG). Sistem PLTG bekerja dengan mengonversi energi gelombang laut menjadi energi mekanik, yang selanjutnya diubah menjadi energi listrik. Namun, pengembangan PLTG masih menghadapi kendala utama berupa karakteristik gelombang laut yang bersifat fluktuatif, sehingga kinerja sistem menjadi kurang optimal ketika gaya dorong gelombang relatif kecil.

Sebaliknya, pada kondisi gelombang dengan gaya dorong yang besar, sistem dapat bekerja secara optimal, tetapi kondisi tersebut tidak terjadi secara kontinu (Abdullatif dkk., 2013).

Di Indonesia hingga saat ini ada dua sistem konverter yang populer, yaitu *Oscillating Water Column* (OWC) dan Sistem Pendulum (SP) atau Sistem Bandul (SB) seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.1. Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut dengan menggunakan *Oscillating Water Column* dikenal sebagai PLTGL-OWC sedangkan Sistem Pendulum atau Sistem Bandul dikenal dengan istilah PLTGL-SP atau PLTGL-SB (Utomo dkk., 2008).



(a)



(b)

Gambar 1.1 (a). PLTGL-SP / SB dan (b). Skema PLTGL-OWC

Menurut Agustina dkk. (2021), PLTGL terbagi menjadi 4 jenis yaitu PLTGL OWC (*Oscillating Water Column*), PLTGL-AWS (*Arcimedes Wave Swing*), PLTGL-Pelamis, dan PLTGL-Duck. Walaupun terdapat beberapa variasi dalam desain dan konsep, *wave energy converter* (WEC) dapat dibedakan menjadi tiga tipe utama, yaitu *attenuator*, *point absorber*, dan *terminator* (Drew dkk., 2009).



Gambar 1.2 PLTGL Point Absorber

Dapat dilihat pada Gambar 1.2 Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) tipe *point absorber* yang digunakan sebagai objek kajian dalam penelitian ini. Sistem PLTGL tipe *point absorber* bekerja dengan memanfaatkan respons gerak *heave* (naik-turun) dari sebuah struktur pelampung akibat interaksi langsung dengan gelombang. Pelampung dimodelkan sebagai struktur terapung berbentuk silinder yang bergerak mengikuti arah gelombang, sehingga gerakan *heave* yang dihasilkan dapat digunakan sebagai dasar dalam proses penyerapan daya gelombang. Gambar tersebut merepresentasikan konsep dasar sistem yang dianalisis, yang selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam pemodelan dan simulasi hidrodinamika untuk mengevaluasi respons gerak pelampung serta parameter hidrodinamika terkait dalam penelitian ini.

Dalam penelitian ini, pemodelan dan simulasi numerik terhadap struktur pelampung PLTGL dilakukan menggunakan perangkat lunak ANSYS AQWA untuk menganalisis karakteristik hidrodinamika struktur akibat interaksi dengan gelombang. Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan variasi RPM yaitu 46, 56, dan 62, pada pelampung berbentuk silinder dengan panjang 500 mm dan diameter 168 mm. Parameter utama yang dianalisis adalah *Response Amplitude Operator* (RAO) pada gerakan *heave*, yang merepresentasikan respons gerak vertikal pelampung terhadap gelombang pada berbagai frekuensi.

Selain itu, parameter hidrodinamika lain seperti *added mass*, *radiation damping*, dan *excitation force* dianalisis untuk menjelaskan karakteristik interaksi antara gelombang dan struktur pelampung. Nilai RAO *heave* selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam perhitungan daya serap dan efisiensi daya serap sistem PLTGL. Dengan demikian, penelitian ini menitikberatkan pada keterkaitan antara karakteristik hidrodinamika dan potensi penyerapan daya gelombang oleh sistem PLTGL.

1.2. Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu mengevaluasi performa penyerapan daya gelombang pada model pelampung Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) tipe point absorber berdasarkan hasil simulasi numerik menggunakan ANSYS AQWA.

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Penulis menggunakan gelombang reguler (*regular wave*) dengan parameter tinggi (H) dan periode (T) hasil pengukuran laboratorium.
2. Struktur yang dianalisis adalah pelampung berbentuk silinder sederhana sebagai *point absorber* pada PLTGL.
3. Simulasi dilakukan pada domain frekuensi menggunakan ANSYS AQWA dengan modul *Hydrodynamic Diffraction*.
4. Analisis difokuskan pada respon *heave* (naik-turun).
5. Pengaruh angin, arus laut, dan gelombang tak teratur tidak diperhitungkan dalam penelitian ini.

1.4. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan oleh penulis dalam menyusun skripsi ini adalah sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisi penjelasan singkat terkait permasalahan yang akan diambil yang terdiri dari latar belakang, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan tentang landasan teori dari beberapa literatur yang

mendukung perumusan masalah yang akan dibahas atau dianalisis. Tinjauan pustaka juga merupakan sumber-sumber yang digunakan dalam menganalisis dan menghitung data-data yang diperoleh saat penelitian.

BAB III METODOLOGI

Bab ini berisikan tentang metode yang digunakan penulis untuk mengumpulkan informasi, serta menerangkan alur penelitian sebagaimana proses pengambilan data yang dilakukan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang perhitungan data-data yang sudah diperoleh dan dilanjutkan dengan pembahasan hasil yang telah didapatkan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisikan kesimpulan dan saran dari data yang diperoleh dan pembahasan dari penulis tentang studi kasus yang diambil dalam penelitian. Kesimpulan yang diperoleh ditulis secara ringkas dan jelas, serta saran yang diberikan untuk kelanjutan dari penelitian. Kesimpulan dan saran ini bertujuan untuk penelitian berikutnya agar dapat lebih sempurna daripada penelitian sebelumnya.

DAFTAR PUSTAKA

Berisikan tentang referensi yang digunakan dalam penulisan dan penyusunan laporan penelitian.

LAMPIRAN

Lampiran berisikan data-data pelengkap yang tidak dicantumkan pada bab-bab sebelumnya dan juga sebagai pelengkap dari laporan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Gelombang Laut

Gelombang laut merupakan gerakan periodik massa air laut yang dipicu oleh berbagai faktor. Faktor-faktor tersebut meliputi aktivitas kapal, gempa bumi baik yang bersifat vulkanik maupun tektonik, gaya gravitasi antara bumi dan bulan yang menyebabkan pasang surut, serta tiupan angin. Secara umum, gelombang laut ditandai oleh pergerakan naik-turun massa air laut dalam arah vertikal yang menyerupai pola gelombang sinusoidal (Waldopo, 2008).

Prinsip dasar terbentuknya gelombang laut berkaitan dengan interaksi antara dua massa yang memiliki kerapatan atau densitas berbeda dan saling bergesekan pada suatu bidang gerak. Dalam struktur gelombang, terdapat dua bagian utama yaitu puncak dan lembah. Puncak gelombang merujuk pada titik tertinggi selama fase naik, sedangkan lembah gelombang merupakan titik terendah pada fase penurunan. Menurut Kurniawan dkk. (2011) gelombang laut dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan energi pembangkitnya, antara lain:

1. Gelombang angin

Gelombang yang disebabkan oleh energi angin yang tertransfer ke permukaan laut, memiliki periode gelombang yang variatif tergantung frekuensi kejadiannya.

2. Gelombang pasang surut

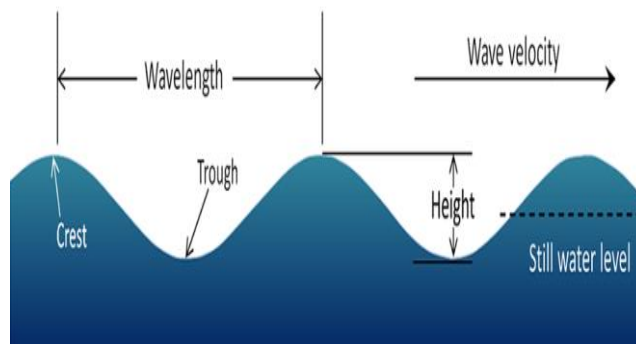
Gelombang akibat adanya gaya tarik bumi terhadap benda-benda langit seperti matahari dan bulan, berlangsung periodik berdasarkan peredaran benda-benda langit tersebut.

3. Gelombang tsunami

Gelombang yang disebabkan oleh gempa bumi tektonik atau letusan gunung api di dasar laut.

Gelombang laut memiliki beberapa parameter pengukuran di antaranya:

1. *Crest* (puncak), didefinisikan sebagai titik tertinggi (puncak) gelombang.
2. *Through* (lembah), didefinisikan sebagai titik terendah (lembah) gelombang.
3. *Wave length* (panjang gelombang), didefinisikan sebagai jarak antara dua puncak gelombang.
4. *Wave height* (tinggi gelombang), didefinisikan sebagai jarak antara tinggi puncak dan lembah gelombang
5. *Water depth* (kedalaman air), didefinisikan sebagai jarak dari dasar ke ketinggian air tenang (SWL).
6. *Periode* (periode), didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan suatu gelombang untuk merambat pada satu panjang gelombang.



Gambar 2.1 Parameter Gelombang Laut
(Webb, 2023)

2.2. Teori Gelombang Laut

Dalam memahami dinamika gelombang laut secara komprehensif, berbagai teori telah dikembangkan guna menjelaskan proses pembentukan, karakteristik fisik, serta perilaku gelombang dalam berbagai kondisi

lingkungan. Pemilihan teori gelombang yang tepat harus mempertimbangkan parameter-parameter utama seperti periode, tinggi, dan kedalaman gelombang. Setiap teori memiliki keterbatasan dalam penerapannya, sehingga hanya relevan digunakan pada kondisi tertentu. Berikut ini disajikan uraian mengenai empat teori utama yang umum digunakan dalam kajian gelombang laut:

2.2.1. Teori Gelombang Airy

Teori gelombang linier, yang juga dikenal sebagai teori gelombang Airy, merupakan salah satu pendekatan yang paling umum digunakan dalam kajian dinamika gelombang laut karena didasarkan pada asumsi yang relatif sederhana. Model ini merepresentasikan gelombang sebagai gelombang sinusoidal dengan amplitudo kecil dan digunakan sebagai dasar dalam banyak analisis hidrodinamika. Teori ini diturunkan dari persamaan Laplace untuk aliran tidak berotasi (*irrotational flow*), dengan penerapan kondisi batas pada permukaan bebas air dan dasar laut. Oleh karena itu, teori ini sering disebut sebagai teori amplitudo kecil (Parjiman dkk., 2018).

2.2.2. Teori Gelombang Stokes

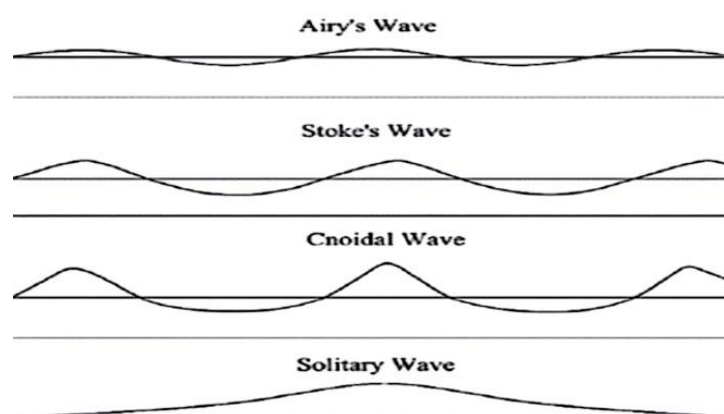
Teori gelombang Stokes mengadopsi pendekatan dengan mempertimbangkan amplitudo yang lebih besar dibandingkan dengan teori gelombang linear (teori Airy) dalam membentuk model gelombang. Teori ini mengembangkan persamaan hingga orde kedua dan ketiga, sehingga memungkinkan analisis gelombang dengan amplitudo hingga nilai hingga. Melalui pendekatan ini, Stokes mengintegrasikan efek non-linier yang muncul seiring meningkatnya amplitudo gelombang, sehingga model yang dihasilkan lebih representatif terhadap kondisi gelombang laut nyata.

2.2.3. Teori Gelombang Knodal

Teori gelombang Knodal merupakan pendekatan yang digunakan untuk memodelkan gelombang dengan amplitudo terbatas serta panjang gelombang yang melebihi kedalaman perairan. Model ini menawarkan deskripsi yang lebih kompleks terhadap bentuk gelombang, terutama pada kondisi di mana profil gelombang menyimpang dari bentuk sinusoidal. Pendekatan ini juga berguna dalam menganalisis karakteristik khas dari gelombang panjang pada lingkungan laut.

2.2.4. Teori Gelombang Solitary

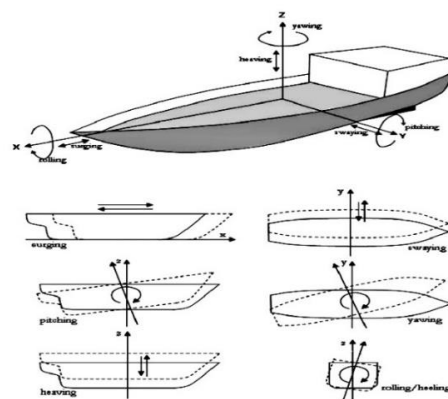
Gelombang soliter merupakan jenis gelombang tunggal yang dapat merambat tanpa mengalami perubahan bentuk selama perjalanannya. Kemunculan gelombang ini umumnya dipengaruhi oleh interaksi antara arus laut dan topografi dasar laut, serta oleh peristiwa geofisika seperti tsunami. Konsep gelombang soliter sangat berguna dalam memahami dinamika gelombang berenergi tinggi yang mampu menjalar dalam jarak jauh dengan mempertahankan karakteristiknya. Gelombang ini bersifat non-periodik dan tidak memiliki panjang gelombang yang terdefinisi secara tetap (Sundar, 2016).



Gambar 2.2 Profil Permukaan Ombak
(Akmal dkk., 2023)

2.3. Teori Dasar Gerakan Gelombang Laut

Struktur yang mengapung dan bergerak di atas permukaan laut akan mengalami gerak osilasi. Gerak osilasi ini didefinisikan sebagai gerak bolak-balik benda di sekitar titik setimbang dengan lintasan yang sama dan terjadi secara periodik yaitu berulang dalam rentang waktu yang sama. Saat sebuah benda berada dalam kondisi mengapung bebas di permukaan laut atau perairan, benda tersebut akan mengalami dinamika gerak osilasi yang terdiri atas kombinasi gerakan translasi dan rotasi dalam enam derajat kebebasan. Gerakan ini terjadi sebagai respons terhadap gaya-gaya eksternal seperti gelombang, arus, dan angin. Enam derajat kebebasan tersebut mencakup tiga gerakan translasi sepanjang sumbu ortogonal (X, Y, dan Z) serta tiga gerakan rotasi terhadap sumbu-sumbu tersebut.



Gambar 2.3 *Six Degree of Freedom* pada kapal
(Hutauruk dan Rengi, 2013)

Gerakan translasi meliputi:

- *Surge*, yaitu pergerakan longitudinal kapal ke arah depan dan belakang sepanjang sumbu X (arah haluan–buritan).
- *Sway*, yaitu pergerakan lateral ke arah port dan starboard sepanjang sumbu Y.
- *Heave*, yakni gerakan vertikal naik-turun sepanjang sumbu Z.

Adapun gerakan rotasional terdiri atas:

- *Roll*, yaitu gerakan rotasi kapal terhadap sumbu longitudinal (sumbu X), yang menyebabkan kapal miring ke sisi kanan atau kiri.
- *Pitch*, yaitu rotasi terhadap sumbu transversal (sumbu Y), yang menyebabkan bagian haluan dan buritan kapal naik-turun secara bergantian.
- *Yaw*, yaitu rotasi terhadap sumbu vertikal (sumbu Z), yang menyebabkan perubahan arah haluan kapal.

Gambar 2.3 ditunjukkan enam derajat kebebasan gerak atau *six degree of freedom* (6-DOF) yang dialami oleh struktur terapung di laut. Enam derajat kebebasan ini mencakup tiga gerakan translasi yaitu surge, sway, dan *heave*, serta tiga gerakan rotasi yaitu *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Gerakan translasi menggambarkan perpindahan linier struktur dalam arah longitudinal, lateral, dan vertikal, sedangkan gerakan rotasi menunjukkan perubahan orientasi struktur terhadap sumbu-sumbu tersebut. Pemahaman terhadap keenam jenis gerakan ini sangat penting dalam studi hidrodinamika karena setiap gerakan akan memberikan respons yang berbeda terhadap gaya-gaya dari gelombang laut.

2.4. Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL)

Pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL) adalah salah satu teknologi pembangkit listrik yang menggunakan sumber energi berupa gelombang laut di perairan atau garis pantai. PLTGL diciptakan untuk mendapatkan energi listrik dengan memanfaatkan energi kinetik gelombang laut (Suprijadi dkk., 2024). Energi gelombang air laut adalah energi yang dihasilkan dari pergerakan gelombang laut menuju ke daratan, dan sebaliknya. Gelombang laut muncul karena pergerakan air laut akibat dorongan pergerakan angin. Karena sumber energinya terus menerus ada akibat fenomena alam, energi gelombang laut termasuk dalam energi terbarukan (Loupatty, 2013).

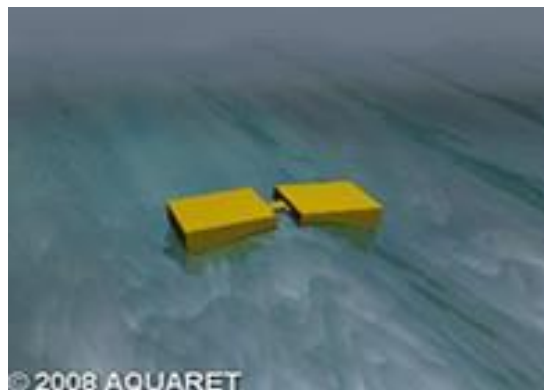
Pada umumnya PLTGL beroperasi dengan mengubah gelombang untuk dijadikan alat penggerak turbin (mekanik) kemudian dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik (Suprijadi dkk., 2024). Alat untuk mengkonversi energi gelombang laut menjadi energi listrik disebut *Wave Energi Converter* (WECs). Terdapat beberapa jenis teknologi konversi energi gelombang yang telah dikembangkan saat ini yaitu *submerged pressure differential*, *oscillating wave surge converter*, *azovertopping device*, *oscillating water column*, dan lain-lain (Iglesias dkk., 2010).

2.5. Klasifikasi PLTGL

Beberapa sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut yang telah dibangun adalah sebagai berikut.

a. *Attenuator*

Attenuator merupakan salah satu jenis konverter energi gelombang laut yang beroperasi dengan memanfaatkan gerakan permukaan air laut secara longitudinal. Alat ini biasanya diletakkan sejajar dengan arah rambat gelombang dan terdiri dari beberapa segmen yang dihubungkan secara fleksibel. Gerakan naik-turun antar segmen akibat datangnya gelombang menyebabkan terjadinya perbedaan sudut, dan perbedaan inilah yang kemudian dikonversi menjadi energi mekanik melalui sistem hidrolik atau engsel mekanik.

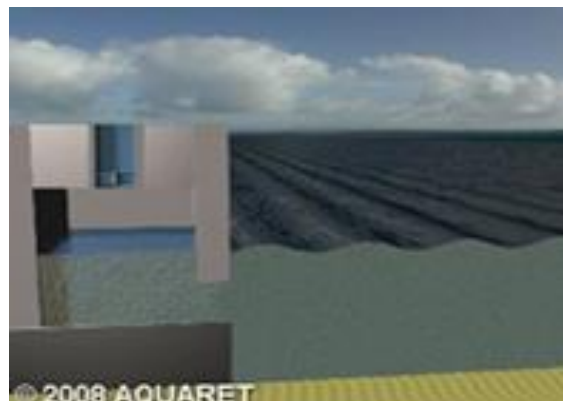


Gambar 2.4. Attenuator
(Parjiman dkk., 2018)

Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4, sistem *attenuator* bekerja dengan menangkap energi dari pergerakan gelombang yang melintasi permukaannya. Energi tersebut kemudian diubah menjadi energi listrik melalui sistem transmisi dan generator. Desain attenuator seperti pada model Pelamis yang dikembangkan di Inggris menjadi salah satu contoh nyata penerapan teknologi ini, karena mampu memanfaatkan energi gelombang secara efisien di laut lepas dan memiliki daya tahan tinggi terhadap kondisi laut yang dinamis.

b. Oscillating Water Column

Oscillating Water Column (OWC) menggunakan prinsip tekanan udara yang dihasilkan oleh gelombang laut dalam suatu ruangan tertutup untuk memutar turbin. Limpet menggunakan prinsip yang sama dengan memanfaatkan gerakan gelombang laut yang dapat memberikan tekanan udara pada tempat tertutup dan menghasilkan udara bertekanan yang menyebabkan turbin bergerak (Parjiman, dkk., 2018).



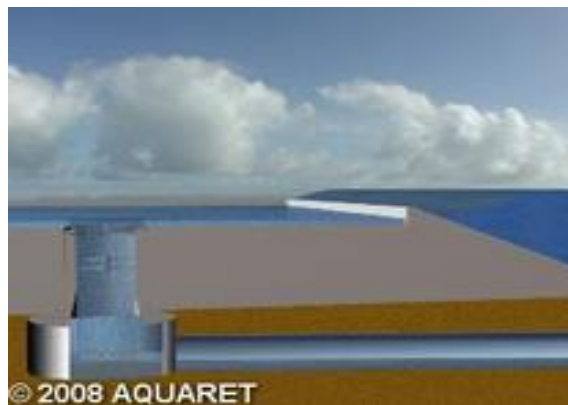
Gambar 2.5. *Oscillating Water Collumn*
(Parjiman dkk., 2018)

Gambar 2.5 menunjukkan sistem *Oscillating Water Column* (OWC) bekerja dengan memanfaatkan tekanan udara yang dihasilkan oleh gelombang laut di dalam ruang tertutup untuk memutar turbin. Ketika gelombang naik, udara dalam kolom tertekan dan mengalir melalui turbin, sementara saat gelombang turun, udara tersedot kembali melalui arah yang

sama, memutar turbin secara bolak-balik. Prinsip ini menjadikan OWC salah satu teknologi yang banyak digunakan karena konstruksinya sederhana dan tidak banyak komponen bergerak yang terendam air.

c. *Overtopping Device*

Overtopping Device merupakan sistem konversi energi gelombang laut yang bekerja berdasarkan prinsip penangkapan air laut yang mengalir melewati permukaan pembatas ke dalam wadah penampung yang terletak di atas permukaan laut. Air yang tertampung di dalam wadah tersebut memiliki energi potensial yang kemudian digunakan untuk memutar turbin guna menghasilkan energi listrik.

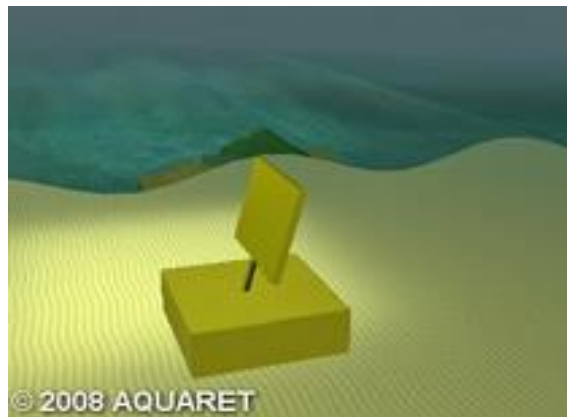


Gambar 2.6. *Overtopping Device*
(Parjiman dkk., 2018)

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.6, sistem ini mampu memanfaatkan energi potensial air laut secara berkelanjutan. Desain lain seperti pada *Wave Dragon* juga memungkinkan alat ini menangkap gelombang dengan amplitudo besar dan mengarahkan air ke dalam reservoir penampung melalui sistem saluran terarah, sehingga daya keluaran menjadi lebih stabil dan efisien. Teknologi ini sangat sesuai diterapkan di wilayah pesisir dengan intensitas gelombang tinggi karena mampu menghasilkan daya listrik yang relatif konstan serta memiliki tingkat keandalan yang tinggi terhadap variasi kondisi laut.

d. *Oscillating Wave Surge Converter*

Oscillating Wave Surge Converter merupakan alat konversi tenaga ombak dengan memanfaatkan energi horizontal gelombang laut. Prinsip yang sama digunakan oleh wraspa, dengan meletakkan alat konversi di dasar laut memanfaatkan energi horizontal gelombang laut untuk diubah menjadi energi listrik (Parjiman dkk., 2018).



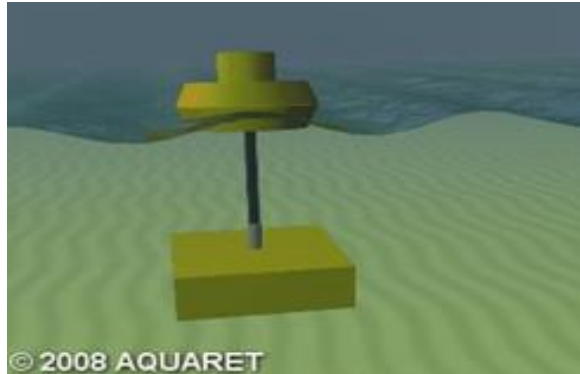
Gambar 2.7. *Oscillating Wave Surge Converter*
(Parjiman dkk., 2018)

Gambar 2.7 memperlihatkan sistem *Oscillating Wave Surge Converter* yang memanfaatkan energi horizontal dari gerakan gelombang laut. Alat ini biasanya dipasang di dasar laut dan dilengkapi dengan pelat yang bergerak mengikuti gerakan bolak-balik gelombang. Pergerakan ini kemudian dikonversi menjadi energi mekanik melalui sistem hidrolik atau mekanisme engsel. Karena bekerja pada lapisan bawah air, alat ini lebih tahan terhadap kondisi cuaca ekstrem di permukaan laut dan efisien dalam menangkap energi dari gelombang mendatar.

e. *Point Absorber*

Point Absorber merupakan sistem konversi energi gelombang laut yang bekerja dengan memanfaatkan gerakan vertikal permukaan air untuk menghasilkan energi listrik. Alat ini biasanya berupa pelampung yang ditempatkan di permukaan laut dan bergerak naik-turun mengikuti dinamika gelombang. Gerakan osilasi tersebut diteruskan melalui sistem

mekanik atau hidrolik yang terhubung ke generator, sehingga energi kinetik dari gelombang diubah menjadi energi listrik.

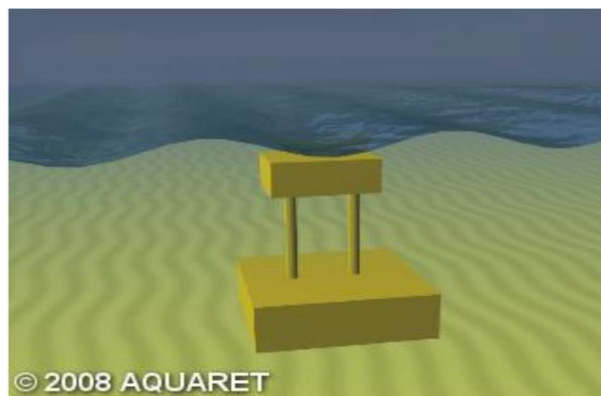


Gambar 2.8. *Point Absorber*
(Parjiman dkk., 2018)

Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8, *Point Absorber* memiliki kemampuan untuk menangkap energi dari berbagai arah datangnya gelombang (*omnidirectional*), menjadikannya salah satu sistem konversi yang efisien untuk kondisi laut yang berubah-ubah. Selain itu, desainnya yang sederhana dan berdimensi kecil membuat sistem ini mudah dipasang serta cocok digunakan di perairan dengan kedalaman bervariasi.

f. Submerged Pressure Differential

Submerged Pressure Differential tidak jauh berbeda dengan *Point Absorber*, hanya saja pelampung yang digunakan tidak terletak pada permukaan, melainkan di dalam laut.



Gambar 2.9 *Submerged Pressure Differential*
(Parjiman dkk., 2018)

Gambar 2.9 menggambarkan sistem Submerged Pressure Differential, yang memiliki prinsip kerja serupa dengan *Point Absorber* namun posisinya berada di bawah permukaan air laut. Perbedaan tekanan air akibat naik turunnya permukaan gelombang dimanfaatkan untuk menggerakkan membran atau pelat fleksibel yang menghasilkan energi mekanik. Keunggulan sistem ini adalah ketahanannya terhadap gelombang permukaan yang ekstrem, sehingga cocok untuk aplikasi di laut lepas dengan kondisi gelombang tinggi.

2.6. Mekanisme Kerja PLTGL

Secara umum, pembangkit listrik tenaga gelombang laut menggunakan teknologi oscillating water column. Beberapa komponen utama yang berperan untuk menghasilkan energi listrik, yaitu komponen mekanika konversi energi gelombang laut, turbin dan generator. Cara kerja PLTGL diawali dengan ditangkapnya potensi energi gelombang laut oleh mekanika mesin konversi energi gelombang laut. Dalam mesin konversi, energi kinetik yang dihasilkan oleh gelombang laut kemudian diteruskan ke turbin. Turbin kemudian berputar menghasilkan energi mekanik dari energi kinetik gelombang laut di mesin konversi. Setelah turbin bergerak, putarannya diteruskan ke generator dan menghasilkan energi listrik (Royyana dkk., 2015).

Gelombang laut mempunyai gaya yang jika mengenai benda akan memberi energi pada benda tersebut. Gaya ini bersifat periodik dan dipengaruhi oleh ketinggian gelombang dan periode (Syam, 2024). Pada rancangan sebuah model mekanika pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem pelampung diaplikasikan ke laut lepas di wilayah Indonesia. Gelombang air laut yang bergerak naik turun digunakan untuk menggerakkan sebuah pelampung yang tersambung dengan komponen mekanika rancang bangun pembangkit listrik tenaga gelombang air laut, lalu memutarakan komponen yang lainnya dan akan menghasilkan listrik. Mekanika rancang bangun pembangkit listrik tenaga gelombang air laut dengan sistem pelampung merupakan sebuah alat

pembangkit listrik dengan memanfaatkan energi gelombang air laut dengan sistem dua pelampung yang dilengkapi berbagai komponen yang bertujuan untuk menghasilkan listrik (Al Mursyid dkk., 2020).

Gelombang memiliki gaya dan ketika mengenai benda yang ditempatkan di laut, gelombang mengerahkan kekuatan pada benda yang akan naik turun. Gaya yang diberikan oleh gelombang bersifat periodik dan terutama bergantung pada tinggi gelombang dan periode (Parjiman dkk., 2018):

$$F \cos \omega t$$

Gaya reaksi benda terhadap gaya gelombang merupakan gaya restorasi, gaya redaman (gesekan), dan ekstraksi energi dengan persamaan.

$$m\ddot{y} + D\dot{y} + Sy = F \cos \omega t \dots\dots\dots(1)$$

Dimana,

$m\ddot{y}$ = Gaya inersia (massa $\times$ percepatan).

$D\dot{y}$ = Gaya redaman (*damping force*)

Sy = Gaya restorasi (*restoring force*)

$F \cos \omega t$ = Gaya gelombang yang bekerja (gaya eksitasi periodik)

2.7. Titik – titik Stabilitas

Keseimbangan kapal dapat dianalisis melalui perhitungan stabilitas yang memanfaatkan tiga titik penting: titik berat (G), titik apung (B), dan titik metasentrik (M). Ketiga titik ini menjadi dasar dalam penentuan momen pemulih (*restoring moment*) ketika kapal mengalami kemiringan. Pengaturan posisi G, B, dan M secara geometris sangat menentukan karakteristik stabilitas kapal, khususnya kemampuan kapal untuk memulihkan kedudukan normal setelah gangguan (Alamsyah dkk., 2021).

a. Titik Berat (*Centre of Gravity*)

Titik berat (G) atau *center of gravity* pada suatu kapal merupakan titik resultan dari seluruh gaya gravitasi yang bekerja ke bawah terhadap kapal tersebut. Posisi titik G dapat ditentukan dengan menganalisis distribusi beban atau muatan di dalam kapal; semakin banyak beban yang ditempatkan di bagian atas kapal, maka semakin tinggi posisi titik G. Nilai posisi titik G pada kondisi kapal kosong dapat dihitung melalui analisis stabilitas kapal. Perlu ditekankan bahwa posisi titik G lebih dipengaruhi oleh distribusi massa di dalam kapal dibandingkan faktor lainnya. Oleh sebab itu, meskipun kapal mengalami gerakan mengangguk (*pitching*) atau miring (*rolling*), posisi titik G tetap tidak berubah selama tidak terjadi perubahan distribusi beban.

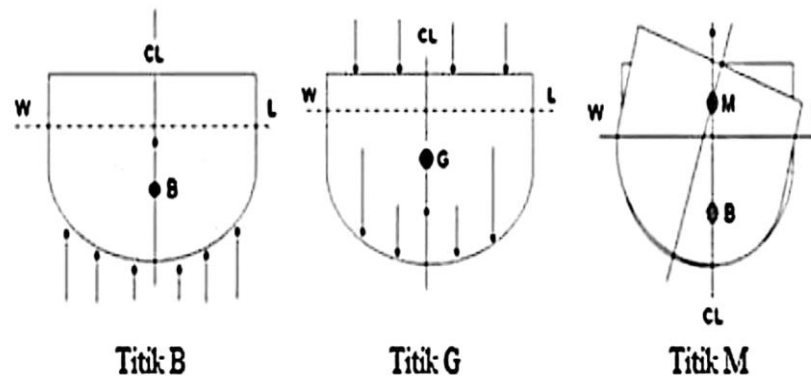
b. Titik Apung (*Centre of Buoyance*)

Titik apung kapal, atau dikenal sebagai *center of buoyancy* (ditandai sebagai titik B), merupakan pusat resultan dari gaya-gaya tekan vertikal ke atas yang bekerja pada volume kapal yang terendam air. Titik ini tidak bersifat tetap, melainkan akan mengalami pergeseran sesuai dengan perubahan posisi atau orientasi kapal. Dalam konteks stabilitas, titik B berperan penting sebagai lokasi di mana momen pemulih (*restoring moment*) bekerja untuk mengembalikan kapal ke posisi tegaknya setelah mengalami kemiringan. Lokasi titik B sangat dipengaruhi oleh besar kecilnya sudut kemiringan kapal; semakin besar perubahan kemiringan, semakin besar pula perpindahan titik B.

c. Titik Metasentris

Titik metasentris (M) pada suatu kapal merupakan titik teoretis yang menentukan batas kestabilan kapal, di mana titik berat (G) tidak boleh melampauinya agar kestabilan tetap terjaga. Posisi titik metasentris bersifat dinamis dan bergantung pada besarnya sudut kemiringan kapal. Saat kapal mengalami kemiringan kecil (kurang dari 15°), titik apung (B) akan bergerak mengikuti lintasan melengkung, dan pada kondisi ini, titik

M tetap berada di bidang tengah (centerline) kapal. Karena perpindahan titik M dalam kondisi ini relatif kecil, maka secara praktis dapat dianggap tetap.



Gambar 2.10 Titik Stabilitas Transversal Kapal
(Rahman dkk., 2014)

Seperti terlihat pada Gambar 2.10, analisis stabilitas kapal didasarkan pada tiga titik penting yaitu titik berat (G), titik apung (B), dan titik metasentris (M). Ketiga titik ini digunakan untuk menentukan kestabilan transversal kapal ketika mengalami kemiringan. Titik berat merupakan pusat distribusi massa kapal, titik apung adalah pusat gaya apung dari volume air yang dipindahkan, dan titik metasentris menjadi acuan keseimbangan stabilitas. Jika titik berat berada di bawah titik metasentris, kapal dikatakan stabil; namun jika sebaliknya, kapal cenderung mudah terbalik. Konsep ini menjadi dasar penting dalam perancangan struktur terapung termasuk pelampung PLTGL.

2.8. *Response Amplitude Operator (RAO)*

Response Amplitude Operator (RAO) merupakan parameter penting dalam analisis respons dinamis suatu struktur terapung terhadap pengaruh lingkungan eksternal seperti gelombang, angin, dan arus laut. RAO didefinisikan sebagai rasio antara amplitudo gerakan struktur terapung dengan amplitudo gelombang pada suatu frekuensi tertentu. Secara umum, RAO dapat dibedakan menjadi dua kategori utama, yaitu RAO untuk gerakan

translasi dan RAO untuk gerakan rotasi. Perhitungan RAO dilakukan menggunakan persamaan matematis tertentu yang menggambarkan hubungan antara gerakan struktur dengan gelombang yang bekerja padanya. RAO merupakan parameter yang menyatakan hubungan antara amplitudo gerakan struktur dan amplitudo gelombang datang pada frekuensi tertentu (Zahril dkk., 2021).

Parameter ini digunakan sebagai indikator utama dalam mengevaluasi respon dinamis struktur terapung terhadap gelombang laut, serta menjadi dasar dalam penentuan amplitudo gerak yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan daya serap dan efisiensi penyerapan energi pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL). Untuk menghitung RAO dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$RAO = \frac{Z_0}{\zeta_0} \dots\dots\dots(2)$$

Dimana,

Z_0 = amplitudo gerak struktur (m)

ζ_0 = amplitudo gelombang (m)

2.9. Gaya Apung

Gaya apung adalah gaya ke atas yang muncul ketika suatu benda terendam sebagian atau sepenuhnya dalam fluida, disebabkan oleh perbedaan antara berat benda dengan berat fluida yang dipindahkan. Nilai gaya apung tersebut setara dengan berat fluida yang dipindahkan oleh benda. Jika berat benda lebih ringan dibandingkan dengan berat fluida yang dipindahkan, benda akan mengapung di permukaan. Sementara itu, apabila berat benda sebanding dengan berat fluida yang dipindahkan, benda akan tetap berada dalam fluida pada kondisi setimbang tanpa pergerakan vertikal (Ajijj & Supriyatna, 2024).

Apabila sebuah benda dicelupkan sebagian atau sepenuhnya ke dalam suatu fluida, baik berupa zat cair maupun gas, fluida tersebut akan memberikan gaya dorong ke atas pada benda. Gaya ini memiliki besaran yang sama dengan berat fluida yang dipindahkan atau digantikan oleh volume benda yang tercelup. Besar gaya apung sangat bergantung pada dua faktor utama, yaitu volume benda yang berada di dalam fluida dan massa jenis fluida itu sendiri. Semakin besar volume benda yang terendam, semakin besar pula fluida yang dipindahkan sehingga gaya apung bertambah. Demikian juga, semakin besar massa jenis fluida, semakin besar pula gaya apung yang ditimbulkan. Akibat keberadaan gaya apung ini, benda yang berada dalam fluida akan tampak memiliki berat lebih kecil dibandingkan dengan berat aslinya di luar fluida (Edison, 2021).

2.10. ANSYS AQWA

ANSYS AQWA adalah perangkat lunak analisis hidrodinamika berbasis potensi, banyak digunakan dalam simulasi interaksi gelombang-struktur, terutama dalam konteks desain struktural terapung dan perangkat energi laut.

2.10.1 Definisi

ANSYS AQWA menerapkan metode panel (*Boundary Element Method*) dalam domain frekuensi untuk mensimulasikan fenomena difraksi dan radiasi gelombang serta menghitung parameter hidrodinamika seperti *Response Amplitude Operator* (RAO), *added mass*, dan *radiation damping*. Platform ini juga memungkinkan analisis hidrodinamika interaksi pada sistem multi-body maupun sistem tambat (*mooring*), dengan model yang dapat digunakan baik dalam domain frekuensi maupun waktu. Teknik ini telah dibuktikan efektif dalam studi seakeeping dan perencanaan sistem energi gelombang terbarukan (Qin dkk., 2025).

2.10.2 Fitur

Dalam praktiknya, AQWA sering diaplikasikan untuk mengekstrak parameter hidrodinamika penting dan memodelkan interaksi kompleks:

- Studi platform budidaya terapung tipe "flip" memanfaatkan AQWA untuk menganalisis respon RAO, massa tambahan, gerak dinamis, dan tegangan tali tambat dalam kondisi ekstrem seperti badai.
- Pada konteks peluncuran dan pemulangan AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*), AQWA memungkinkan analisis interaksi hidrodinamika antara permukaan kapal dan AUH (*autonomous underwater hull*), memfasilitasi evaluasi RAO gerak 6-DOF serta respons linier-nonlinier yang melibatkan efek redaman viskos.
- Dalam studi platform terintegrasi angin–gelombang (*wind–wave power generation*), AQWA digunakan untuk membangun model waktu-domena terkopel guna menganalisis interaksi gelombang tidak teratur dan beban tambat melalui pendekatan panel method (Chen dkk., 2019).

2.10.3 ANSYS AQWA *Hydrodynamic Diffraction*

Modul difraksi-radiasi dalam AQWA menyelesaikan masalah aliran potensial linier di sekitar struktur terapung: gelombang masuk mengalami difraksi, sementara gerak struktur menghasilkan radiasi gelombang. Pendekatan ini menghitung parameter hidrodinamika seperti gaya eksitasi, massa tambahan, dan redaman radiasi secara simultan. Hasilnya digunakan untuk membangun RAO serta memprediksi perilaku struktural dalam kondisi harmonik maupun acak dalam domain frekuensi maupun waktu (Qin dkk., 2025).

2.10.4 Keluaran (Output)

Hasil analisis hidrodinamika menggunakan ANSYS AQWA menghasilkan sejumlah parameter utama yang menggambarkan

interaksi antara struktur terapung dan gelombang laut. Parameter-parameter tersebut meliputi Added Mass, Radiation Damping, Excitation Force, serta *Response Amplitude Operator* (RAO). Keempat parameter ini diperoleh dari penyelesaian persamaan potensial fluida dalam domain frekuensi menggunakan Boundary Element Method (BEM). Masing-masing output memiliki makna fisis tersendiri yang penting untuk memahami dinamika gerak dan daya serap energi struktur.

1. Added Mass (Massa Tambahan)

Added mass menggambarkan massa fluida yang ikut bergerak bersama struktur saat mengalami percepatan. Ketika pelampung bergerak ke atas dan ke bawah akibat gelombang, sebagian fluida di sekitarnya turut berakselerasi sehingga menambah inersia sistem. Nilai ini bergantung pada frekuensi dan geometri pelampung - semakin besar added mass, semakin besar inersia efektif yang menggeser frekuensi alami sistem ke arah lebih rendah.

Dalam penelitian Phan & Ahn (2024), mekanisme pengaturan inersia dilakukan dengan menambahkan dua massa tambahan pada sistem PTO untuk menyesuaikan frekuensi alami agar sesuai dengan frekuensi eksitasi gelombang, sehingga penyerapan energi menjadi optimal.

2. Radiation Damping (Redaman Radiasi)

Radiation damping merupakan koefisien yang menggambarkan energi yang dipancarkan kembali ke fluida saat struktur bergerak. Ketika pelampung berosilasi, gerakannya menghasilkan gelombang sekunder yang menyebarkan energi ke sekitar dan menyebabkan hilangnya sebagian energi mekanik struktur ke fluida. Besarnya nilai redaman ini menentukan seberapa efektif energi gelombang dapat diserap oleh struktur; pada frekuensi

resonansi, nilai redaman yang sesuai dapat memaksimalkan daya serap.

Menurut Natarajan & Cho (2023), penentuan koefisien redaman dilakukan melalui analisis hidrodinamika frekuensi menggunakan ANSYS AQWA untuk memperkirakan energi yang dilepaskan oleh struktur ke air.

3. *Excitation Force* (Gaya Eksitasi)

Excitation force merupakan gaya yang dihasilkan oleh tekanan gelombang insiden terhadap permukaan struktur. Gaya ini terdiri atas dua komponen utama: gaya Froude–Krylov, yang berasal dari tekanan gelombang tanpa gangguan struktur, dan gaya difraksi, yang terjadi akibat gangguan gelombang oleh bentuk struktur. Kedua komponen ini bersama-sama menentukan besarnya respon struktur terhadap gelombang datang.

Dalam uji eksperimental oleh Shahroozi dkk. (2022), dijelaskan bahwa gaya eksitasi menjadi penentu utama dalam menentukan amplitudo gerak dan tali tambat maksimum pada kondisi gelombang ekstrem.

4. *Response Amplitude Operator* (RAO)

Response Amplitude Operator (RAO) menunjukkan rasio antara amplitudo gerak struktur (η) terhadap amplitudo gelombang (ζ) pada frekuensi tertentu. Nilai RAO diperoleh dari hasil gabungan *added mass*, *radiation damping*, dan *excitation force*. Kurva RAO menunjukkan bagaimana struktur merespons setiap frekuensi gelombang - puncak RAO terjadi saat resonansi, yang menandakan energi gelombang diserap secara maksimum. Peneliti Han dkk. (2023) menunjukkan bahwa RAO berfungsi sebagai parameter utama untuk menentukan frekuensi kerja optimal dan daya tangkap efektif pada sistem array *point absorber*.

2.11 *Boundary Element Method (BEM)*

Boundary Element Method (BEM) merupakan metode numerik berbasis formulasi integral batas yang digunakan untuk memecahkan persamaan diferensial parsial (PDE) pada berbagai bidang rekayasa, seperti mekanika fluida, akustik, elektromagnetik, elastisitas, dan hidrodinamika. Prinsip dasar BEM adalah mengubah domain permasalahan menjadi representasi di batas (*boundary*) saja, sehingga jumlah derajat kebebasan dapat dikurangi secara signifikan dibandingkan metode berbasis domain seperti *Finite Element Method (FEM)*. Pendekatan ini menghasilkan efisiensi komputasi yang tinggi, terutama pada permasalahan dengan domain tak terbatas atau semi-tak terbatas (Aimi dkk., 2024).

Dalam konteks hidrodinamika, BEM sering digunakan untuk memodelkan interaksi gelombang–struktur terapung dengan asumsi aliran potensial. Dengan memanfaatkan formulasi fungsi *Green's*, BEM dapat menyelesaikan persamaan laplace di seluruh domain fluida hanya melalui diskretisasi permukaan struktur dan bidang bebas gelombang. Hal ini mengurangi kebutuhan meshing volume air secara keseluruhan, sehingga mempercepat proses komputasi (Khanal dkk., 2025).

Perkembangan terkini pada BEM meliputi penerapan time-domain BEM adaptif yang menggabungkan strategi *a posteriori error estimation* untuk memperbaiki akurasi melalui adaptasi mesh di ruang dan waktu. Selain itu, inovasi fully differentiable BEM memungkinkan perhitungan sensitivitas hidrodinamika terhadap parameter desain secara langsung, sehingga mendukung optimasi bentuk struktur secara otomatis. Pada bidang akustik dan elektromagnetik, pengembangan isogeometric BEM telah memungkinkan integrasi langsung dengan model CAD dan penerapan teknik *reduced order modeling* untuk mempercepat simulasi tanpa kehilangan akurasi (Chen dkk., 2024).

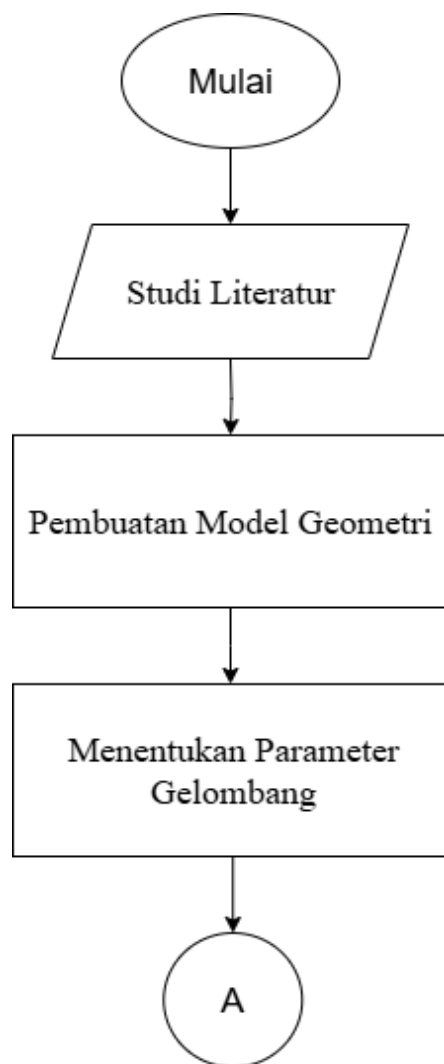
Formulasi varian seperti spectral BEM juga mendapatkan perhatian karena kemampuannya memecahkan permasalahan frekuensi tinggi dengan konvergensi yang lebih baik pada fungsi gelombang kompleks (Falletta & Sauter, 2025). Sementara itu, pada rekayasa struktur elastis, peningkatan elemen khusus seperti *hole elements* dan *tube elements* telah meningkatkan keakuratan BEM pada geometri dengan rongga atau saluran internal (Zheng dkk., 2024).

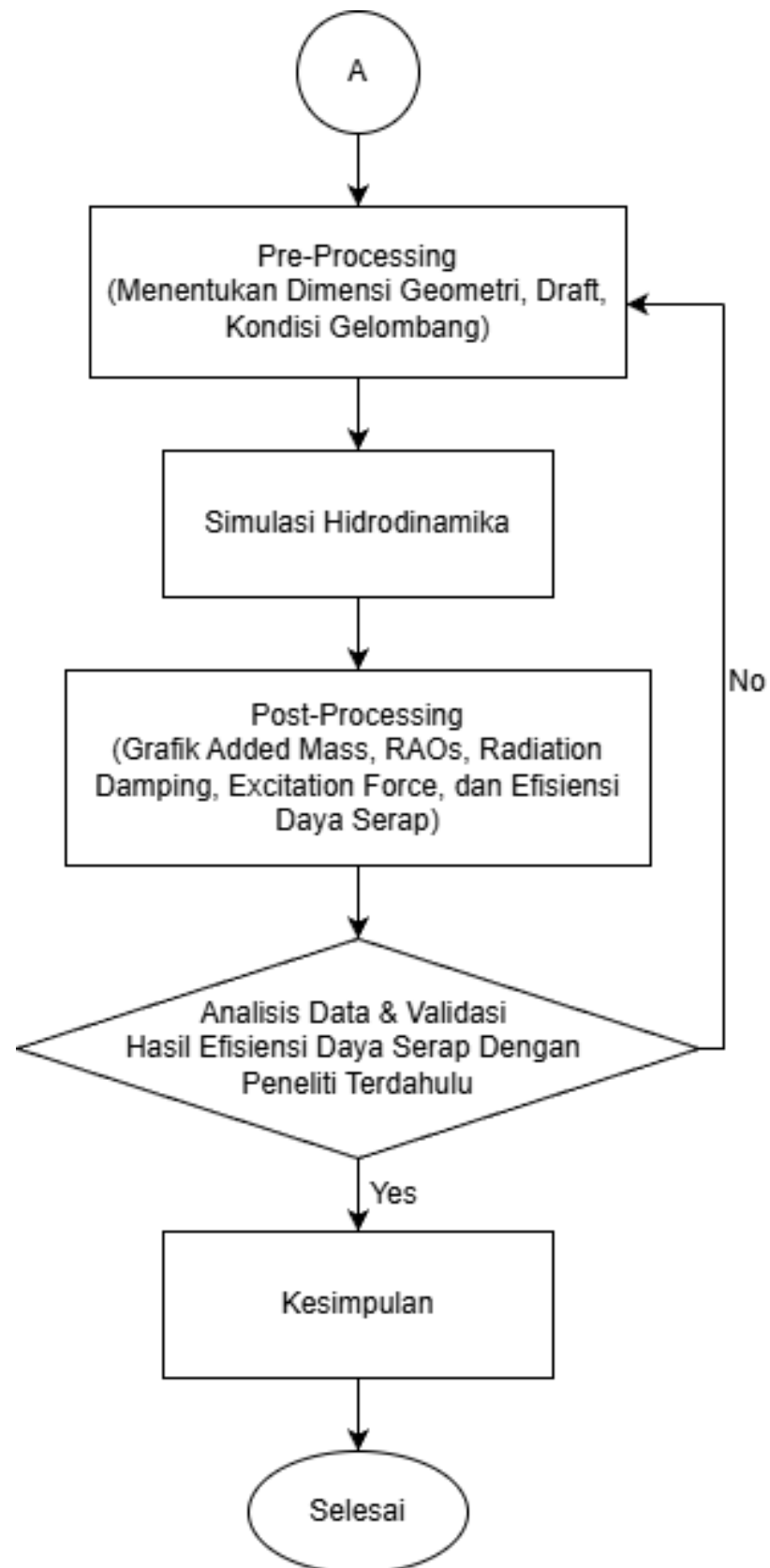
Secara keseluruhan, BEM terus berkembang dengan integrasi teknologi baru seperti *automatic differentiation*, *isogeometric analysis*, dan *hybrid coupling* dengan metode domain. Keunggulannya dalam memodelkan domain tak terbatas, efisiensi komputasi, dan fleksibilitas formulasi menjadikan BEM sebagai metode yang relevan dan berdaya saing tinggi dalam analisis numerik modern, termasuk pada simulasi hidrodinamika perangkat konversi energi gelombang.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Adapun alur pelaksanaan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1:





Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2. Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian ini disusun untuk mengevaluasi performa penyerapan daya gelombang pada model pelampung Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) melalui simulasi numerik menggunakan ANSYS AQWA. Pendekatan penelitian yang digunakan bersifat kuantitatif dengan memanfaatkan pemodelan hidrodinamika untuk menganalisis respon gerak pelampung terhadap gelombang. Penelitian diawali dengan pemodelan geometri pelampung PLTGL berbentuk silinder yang merepresentasikan model uji skala laboratorium. Dimensi geometri disesuaikan dengan spesifikasi model fisik agar karakteristik hidrodinamika yang dihasilkan dari simulasi numerik dapat mewakili kondisi aktual. Pelampung dimodelkan sebagai *point absorber* yang berfungsi menyerap daya gelombang melalui gerak *heave* (naik-turun).

Simulasi hidrodinamika dilakukan dalam domain frekuensi menggunakan modul Hydrodynamic Diffraction pada ANSYS AQWA. Variabel gelombang yang digunakan berupa gelombang reguler dengan variasi frekuensi berdasarkan data pengujian laboratorium. Struktur pelampung diasumsikan terapung bebas dengan enam derajat kebebasan, namun analisis difokuskan pada respon gerak *heave* karena gerakan ini berperan dominan dalam mekanisme penyerapan daya gelombang.

Hasil simulasi berupa parameter hidrodinamika, meliputi *Response Amplitude Operator* (RAO) arah *heave*, *excitation force*, *added mass*, dan *radiation damping*. Parameter tersebut digunakan untuk menentukan amplitudo gerak pelampung serta menghitung daya gelombang yang diserap. Selanjutnya, efisiensi daya serap gelombang dihitung sebagai perbandingan antara daya yang diserap pelampung terhadap daya gelombang datang, sehingga dapat digunakan untuk menilai performa penyerapan energi pada sistem PLTGL sesuai dengan tujuan penelitian.

3.3. Metode Penelitian

Diagram alir penelitian menggambarkan alur proses yang dilakukan dalam penelitian ini, mulai dari identifikasi masalah hingga penarikan kesimpulan. Secara umum, langkah-langkah penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

3.3.1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh landasan teori yang mendukung analisis hidrodinamika pelampung Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL). Kajian literatur difokuskan pada interaksi gelombang dengan struktur terapung serta parameter hidrodinamika utama, yaitu *excitation force*, *added mass*, *radiation damping*, dan *Response Amplitude Operator* (RAO).

Menurut Ta dkk (2025) *excitation force* merupakan gaya utama yang menyebabkan struktur mengalami respons gerak akibat gelombang datang. Penelitian tersebut juga menjelaskan bahwa *added mass* dan *radiation damping* memengaruhi karakteristik dinamis struktur, khususnya pada gerakan heave. Respons heave dan nilai RAO sangat dipengaruhi oleh keseimbangan antara gaya eksitasi gelombang dan redaman radiasi. Hasil penelitian ini memperkuat peran *radiation damping* sebagai mekanisme utama kehilangan energi akibat gelombang yang diradiasikan oleh gerakan struktur (Shahroozi dkk, 2022).

Peneliti Zheng dkk (2024) menjelaskan bahwa metode *Boundary Element Method* (BEM) mampu merepresentasikan fenomena interaksi gelombang–struktur secara akurat pada domain frekuensi, termasuk perhitungan *added mass*, *radiation damping*, dan *excitation force*. Metode ini menjadi dasar pengembangan perangkat lunak hidrodinamika seperti ANSYS AQWA yang digunakan juga oleh Qin dkk (2025) untuk menganalisis respons hidrodinamika struktur

terapung dan mengevaluasi RAO sebagai indikator utama respons struktur terhadap gelombang.

3.3.2 Pembuatan Model Geometri

Model geometri dari struktur Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) dibuat menggunakan modul SpaceClaim dalam perangkat lunak ANSYS AQWA. Proses pemodelan diawali dengan pendefinisian ukuran dan bentuk struktur yang akan dianalisis, di mana struktur dimodelkan sebagai sistem terapung yang berinteraksi dengan gelombang laut. Dalam tahap ini, dimensi panjang, diameter, dan draft pelampung (permukaan terendam) ditetapkan sesuai dengan spesifikasi desain. Parameter geometri dan karakteristik model yang digunakan dalam proses pemodelan dan analisis selanjutnya disajikan secara rinci pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Detail Dimensi

Geometri	Dimensi
Panjang Pelampung	500 mm
Diameter Pelampung	168 mm
Draft Pelampung	84 mm

3.3.3. Penentuan Parameter dan Kondisi Simulasi

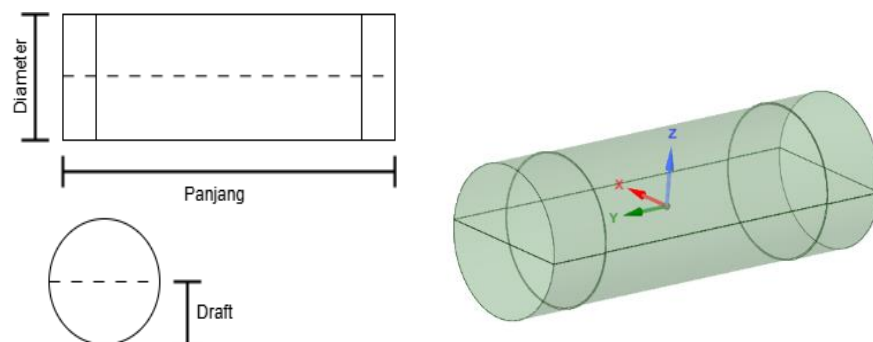
Menetapkan parameter gelombang reguler sesuai kondisi laboratorium: tinggi gelombang (H), periode (T), panjang gelombang (L), kedalaman (d), dan kecepatan rambat (C). Dapat dilihat pada Tabel 3.2, parameter ini digunakan sebagai input *sea state* dalam ANSYS AQWA. Data gelombang yang digunakan menggunakan variasi frekuensi tertentu. Frekuensi ini disesuaikan untuk memperoleh *Response Amplitude Operator* (RAO) dari struktur.

Tabel 3.2 Data Parameter Gelombang

No.	Parameter	Kecepatan Putaran (RPM)			Satuan
		46	56	62	
1.	Tinggi Gelombang	14	12	16	cm
2.	Periode Gelombang	1,31579	1,07527	0,97087	s
3.	Frekuensi Gelombang	0,76	0,93	1,03	Hz

3.3.4. Pre-Processing

- a. Pemodelan geometri dalam bentuk silinder yang berfungsi sebagai *point absorber* ditunjukkan pada Gambar 3.2. Dimensi serta massa geometri ditentukan berdasarkan asumsi dan data eksperimen di laboratorium, yaitu pelampung berbentuk silinder dengan panjang 500 mm, diameter 168 mm, draft setengah diameter pelampung ($\pm 84 \text{ mm}$). Setelah selesai, model diimpor ke dalam ANSYS AQWA *Hydrodynamic Diffraction* untuk dilakukan analisis lebih lanjut.

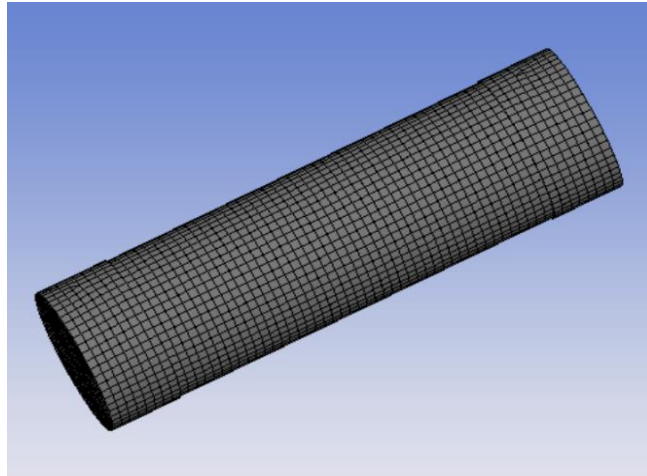


Gambar 3.2 Geometri Pelampung

- b. Pendefinisian karakteristik fisik struktur dilakukan dengan memasukkan parameter yang meliputi massa total geometri, momen inersia terhadap sumbu utama (X, Y, dan Z), posisi titik berat (*center of gravity*), serta posisi titik apung (*center of buoyancy*) yang ditentukan berdasarkan nilai *draft* geometri. Penentuan parameter-parameter tersebut diperlukan agar interaksi antara struktur dan fluida dapat direpresentasikan secara realistis dalam model numerik. Dengan karakteristik fisik yang terdefinisi secara tepat, respons dinamik struktur terhadap gelombang dapat dihitung secara lebih akurat dan konsisten dengan kondisi fisik yang diasumsikan.
- c. Proses *meshing* dilakukan dengan membagi model pelampung menjadi elemen-elemen kecil, sehingga perangkat lunak mampu menghitung distribusi gaya hidrodinamik pada permukaan struktur secara lebih rinci. Detail parameter dan tingkat kerapatan mesh yang digunakan dalam simulasi disajikan pada Tabel 3.3, sedangkan visualisasi *meshing* pada model pelampung ditunjukkan pada Gambar 3.3. Kerapatan mesh dipilih pada tingkat sedang untuk menjaga keseimbangan antara ketelitian perhitungan dan efisiensi waktu komputasi.

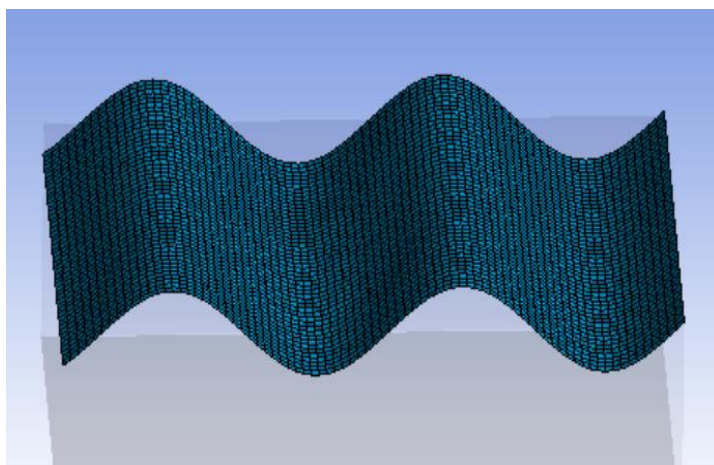
Tabel. 3.3 Detail Meshing

No.	Details of Mesh	Value
1.	Element Type	Surface Panel
2.	Element Size	13 mm
3.	Max. Allowed Frequency	4,15595 Hz
4.	Total Nodes	1947
5.	Total Element	1945



Gambar 3.3 Meshing Desain Geometri Pelampung

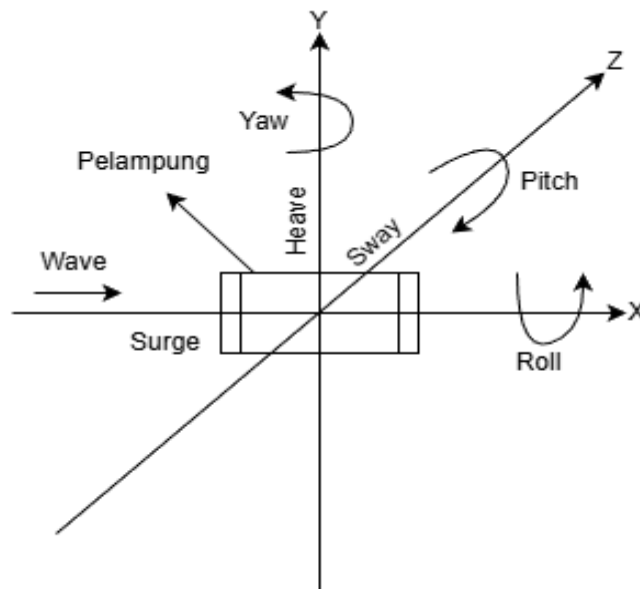
- d. Penentuan kondisi gelombang dalam simulasi dilakukan berdasarkan parameter hasil pengukuran di laboratorium. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.4, gelombang yang dimodelkan merupakan gelombang reguler dengan arah rambat searah terhadap struktur pelampung. Parameter gelombang yang dimasukkan mengacu pada hasil pengukuran di laboratorium, meliputi tinggi gelombang (H), periode gelombang (T), panjang gelombang (L), dan kedalaman air (d).



Gambar 3.4 Simulasi Gelombang

3.3.5 Kondisi Batas

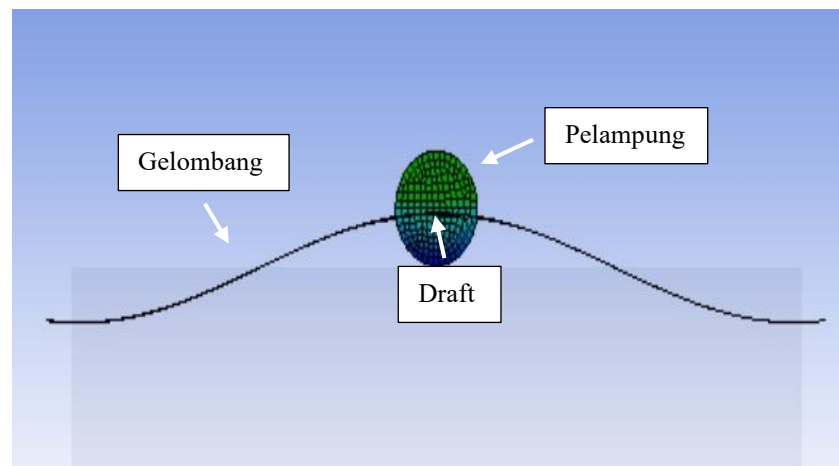
Kondisi batas yang merepresentasikan lingkungan fisik didefinisikan dalam perangkat lunak simulasi untuk menggambarkan interaksi antara struktur pelampung dan gelombang secara ideal. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.5, struktur pelampung dimodelkan dalam kondisi terapung bebas di permukaan air dengan enam derajat kebebasan gerak (*six degree of freedom*), yang mencakup tiga gerakan translasi dan tiga gerakan rotasi. Meskipun seluruh derajat kebebasan tersebut diperhitungkan dalam pemodelan, pada penelitian ini analisis difokuskan pada respons gerak heave (naik-turun), karena gerakan tersebut merupakan mode dominan yang secara langsung dipengaruhi oleh gelombang datang dan memiliki kontribusi utama terhadap mekanisme penyerapan daya gelombang laut pada sistem pembangkit listrik tenaga gelombang laut.



Gambar 3.5. Enam Derajat Kebebasan Gerak

Permukaan fluida dimodelkan sebagai bidang tak terbatas dengan kedalaman air yang disesuaikan dengan kondisi pengujian di laboratorium. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.6, struktur pelampung ditempatkan pada permukaan fluida dan berinteraksi

dengan gelombang datang yang dimodelkan sebagai gelombang reguler. Dalam pemodelan ini, pengaruh lingkungan lain seperti angin, arus laut, serta interaksi *multi-body* tidak dimasukkan ke dalam analisis. Penetapan kondisi batas tersebut dilakukan untuk membatasi kompleksitas model, sehingga analisis respons hidrodinamika pelampung dapat difokuskan pada pengaruh gelombang laut sesuai dengan ruang lingkup dan tujuan penelitian.



Gambar 3.6 Simulasi Struktur Pelampung

3.3.6. *Solution Processing*

Tahap solution merupakan proses penyelesaian perhitungan hidrodinamika yang dilakukan setelah seluruh parameter pemodelan dan kondisi batas ditetapkan. Pada penelitian ini, tahap solution dijalankan menggunakan modul *Hydrodynamic Diffraction* pada perangkat lunak ANSYS AQWA. Modul ini digunakan untuk menyelesaikan persamaan hidrodinamika berbasis teori aliran potensial linier dalam domain frekuensi.

Perangkat lunak menghitung respons pelampung terhadap gelombang datang untuk setiap variasi frekuensi yang telah ditentukan. Proses perhitungan dilakukan secara numerik untuk memperoleh parameter hidrodinamika utama yang meliputi *added mass*, *radiation damping*, *excitation force*, serta *Response Amplitude Operator* (RAO) pada

gerakan heave. Seluruh parameter tersebut dihitung berdasarkan interaksi antara geometri pelampung, karakteristik gelombang, dan asumsi hidrodinamika yang digunakan dalam simulasi.

Hasil dari tahap solution berupa data numerik mentah yang merepresentasikan perilaku hidrodinamika pelampung pada setiap frekuensi gelombang. Data ini belum dianalisis secara visual maupun interpretatif, sehingga memerlukan tahap lanjutan berupa pengolahan dan penyajian hasil.

3.3.7. Post-Processing

Tahap post-processing dilakukan setelah proses solution selesai, dengan tujuan untuk mengolah dan menyajikan hasil simulasi agar lebih mudah dianalisis dan diinterpretasikan. Pada tahap ini, data numerik yang dihasilkan dari ANSYS AQWA diolah ke dalam bentuk grafik dan tabel yang merepresentasikan hubungan antara parameter hidrodinamika dan frekuensi gelombang seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Salah satu hasil utama yang dianalisis pada tahap ini adalah grafik *Response Amplitude Operator* (RAO) untuk gerakan heave. Grafik RAO digunakan untuk mengidentifikasi frekuensi gelombang yang menghasilkan respon gerak maksimum pada pelampung, yang selanjutnya menjadi dasar dalam analisis potensi penyerapan daya gelombang. Selain RAO, data *added mass*, *radiation damping*, dan juga disajikan dalam bentuk grafik untuk melihat kecenderungan perubahan masing-masing parameter terhadap variasi frekuensi.

Selain itu, hasil simulasi yang telah diproses pada tahap post-processing disajikan dalam bentuk nilai numerik yang dapat digunakan untuk keperluan perbandingan dengan teori gelombang linier (teori Airy) serta data hasil pengujian laboratorium. Dengan demikian, tahap post-processing berperan penting dalam menghubungkan hasil simulasi

numerik dengan analisis fisik dan validasi penelitian secara keseluruhan.

Tabel 3.4 Data hasil simulasi

No.	Frekuensi (Hz)	<i>Added Mass</i> (kg)	<i>Radiation Damping</i> (Ns/m)	RAO (m/m)	<i>Excitation Force</i> (N)
1.	0,76	7,18729	17,58831	1,01736	562,66595
2.	0,93	6,11315	22,59489	1,04769	479,92352
3.	1,03	5,54191	24,69842	1,08181	438,17886

3.3.8. Analisis Data dan Validasi

Analisis data pada penelitian ini dilakukan untuk menilai kinerja penyerapan daya gelombang pada model pelampung Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) sebagaimana tujuan penelitian yang telah ditetapkan. Data yang dianalisis diperoleh dari hasil simulasi numerik menggunakan ANSYS AQWA, yang menghasilkan parameter hidrodinamika berupa *Response Amplitude Operator* (RAO) arah *heave*, *excitation force*, *added mass*, dan *radiation damping* pada berbagai frekuensi gelombang.

Tahapan analisis dimulai dengan mengkaji respon gerak *heave* pelampung berdasarkan nilai RAO untuk memahami perilaku dinamis struktur terhadap variasi frekuensi gelombang. Nilai RAO tersebut digunakan untuk menentukan amplitudo gerak vertikal pelampung,

yang selanjutnya menjadi dasar dalam perhitungan daya gelombang yang dapat diserap oleh struktur. Selain itu, parameter radiation damping digunakan untuk menggambarkan besarnya energi yang dipindahkan dari sistem pelampung ke fluida akibat gerakan osilasi, sehingga berperan penting dalam evaluasi penyerapan daya gelombang.

Selanjutnya, dilakukan perhitungan daya gelombang datang dan daya yang diserap oleh pelampung dengan menggunakan persamaan matematis. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, efisiensi daya serap gelombang ditentukan sebagai perbandingan antara daya yang diserap oleh pelampung terhadap daya gelombang datang. Nilai efisiensi ini digunakan sebagai parameter kuantitatif untuk mengevaluasi performa penyerapan daya gelombang pada sistem PLTGL. Hasil perhitungan daya serap dan efisiensi ini selanjutnya disajikan dan dibahas pada Bab IV sebagai indikator utama kinerja hidrodinamika pelampung PLTGL. Analisis difokuskan pada pengaruh variasi frekuensi gelombang terhadap respons *heave* pelampung dan efisiensi penyerapan energi yang dihasilkan.

Validasi model numerik dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap teori gelombang Airy serta data eksperimen laboratorium. Tingkat kesesuaian antara hasil simulasi dan data pembanding menunjukkan bahwa model numerik yang digunakan mampu merepresentasikan respon hidrodinamik pelampung dengan baik. Untuk memperoleh data tersebut dapat menggunakan persamaan:

$$\omega = 2 \pi f \dots\dots\dots(3)$$

$$A = \frac{H}{2} \dots\dots\dots(4)$$

$$X(\omega) = RAO \times A \dots\dots\dots(5)$$

Daya yang diserap oleh pelampung dihitung berdasarkan respon gerak dan karakteristik redaman radiasi, sesuai dengan formulasi penyerapan energi pada konverter gelombang tipe *point absorber* sebagaimana dijelaskan oleh Ta dkk. (2025):

$$P_{abs} = \frac{1}{2} b_{ext} \omega_n^2 Z_A^2 \dots\dots\dots(6)$$

Dimana,

A = amplitudo gelombang (m)

b_{ext} = radiation damping (N.s/m)

ω_n = frekuensi sudut (rad/s)

Z_A = amplitudo perpindahan (m)

Daya gelombang datang dihitung menggunakan persamaan gelombang linear berdasarkan tinggi dan periode gelombang, sebagaimana dirumuskan dalam kajian daya gelombang laut oleh Liang dkk. (2017):

$$P_{wave} = \frac{1}{8} \rho g H^2 c_g b \dots\dots\dots(7)$$

Dimana,

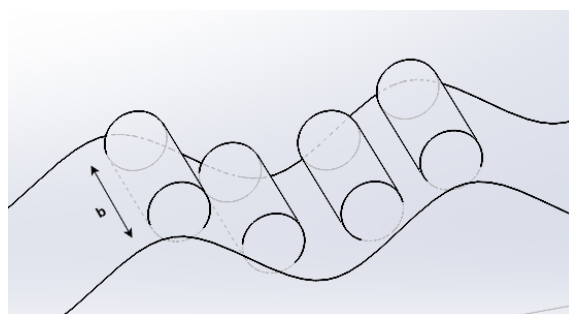
ρ = massa jenis air (kg/m³)

g = percepatan gravitasi (m/s²)

H = tinggi gelombang (m)

c_g = kecepatan rambat energi (m/s)

b = panjang pelampung (m)



Gambar 3.7 Lebar Efektif Pelampung

Persamaan (7) diambil dari peneliti Liang dkk. (2017). Penambahan keterangan pada persamaan dilakukan untuk memperjelas definisi parameter yang digunakan serta menyesuaikan dengan kondisi geometri sistem pelampung pada penelitian ini, tanpa mengubah bentuk dasar maupun prinsip fisik yang terkandung dalam persamaan tersebut. Berdasarkan konfigurasi pelampung pada Gambar 3.7, daya gelombang yang berpotensi ditangkap sistem ditentukan oleh lebar efektif pelampung terhadap arah datang gelombang. Oleh karena itu, interaksi gelombang dengan pelampung direpresentasikan melalui lebar pelampung b .

Setelah diperoleh data perhitungan daya gelombang dan daya yang diserap oleh struktur maka efisiensi daya mekanik dapat diketahui dengan persamaan berikut:

$$\eta(\omega) = \frac{P_a(\omega)}{P_{wave}} \times 100\% \dots\dots\dots(8)$$

3.4. Alat dan Bahan

1. Laptop

Laptop berfungsi sebagai media untuk menjalankan perangkat lunak (Software Ansys) sehingga dapat digunakan dalam simulasi (ANSYS AQWA) yang digunakan dalam proses penelitian. Adapun spesifikasi laptop yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Merk : Asus Vivobook
- b. Processor : AMD Ryzen 7 4800HS
- c. RAM :16 GB DDR4
- d. System type : Windows 10 Home
- e. Disk : SSD NVMe PCIe Gen4 512GB
- f. Graphics Card : AMD Radeon(TM) Graphic

2. Software Ansys 2025

Software Ansys 2025 dipakai untuk mensimulasikan dan menganalisa model pelampung pembangkit listrik tenaga gelombang laut untuk menentukan model geometry, proses meshing, sampai dengan menjalankan simulasi hidrodinamik, dan mendapatkan nilai respon gerak struktur terhadap frekuensi gelombang.

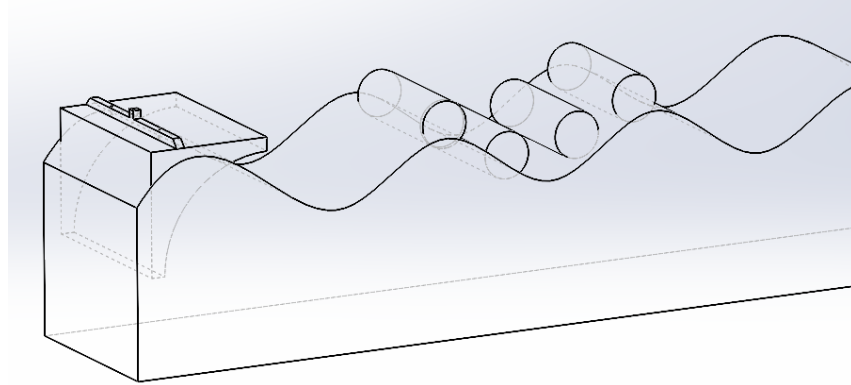
3.5. Skema Alat Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut

Gambar 3.7 menunjukkan skema alat pembangkit listrik tenaga gelombang laut tipe *point absorber* yang menjadi objek simulasi pada perangkat lunak ANSYS AQWA. Sistem ini terdiri dari komponen pelampung silinder yang mengapung di permukaan air dan bergerak secara naik-turun (*heave*) akibat interaksi dengan gelombang reguler. Energi gerak osilasi pelampung selanjutnya diasumsikan dikonversi menjadi energi mekanik melalui sistem transmisi, dan pada tahap akhir diubah menjadi energi listrik menggunakan generator.

Dalam konteks penelitian ini, skema alat digunakan sebagai representasi model fisik yang diproyeksikan ke dalam bentuk geometri tiga dimensi untuk proses pemodelan di ANSYS AQWA. Dimensi pelampung ditetapkan berdasarkan data eksperimen laboratorium, yaitu panjang 500 mm, diameter 168 mm, dan draft setengah diameter pelampung (± 84 mm). Variasi kondisi gelombang direpresentasikan melalui perubahan parameter periode, panjang gelombang, dan tinggi gelombang sesuai asumsi variasi kecepatan putar penghasil gelombang di laboratorium dengan RPM 46, 56, dan 62.

Model yang dibangun di ANSYS AQWA kemudian digunakan untuk menghitung parameter hidrodinamika seperti *added mass*, *radiation damping*, *excitation force*, serta nilai RAO pada gerakan *heave*. Hasil perhitungan ini menjadi dasar untuk analisis daya gelombang, daya serap

struktur, dan efisiensi daya serap. Dengan demikian, skema ini berfungsi sebagai acuan konseptual dalam menghubungkan rancangan fisik di laboratorium dengan model numerik yang dianalisis secara komputasi.



Gambar 3.8 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut

3.6. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Struktur Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang dimulai dari bulan Agustus 2025 sampai dengan bulan Januari 2026. Sebelum melakukan penelitian, penulis melakukan studi literatur yaitu mencari beberapa referensi yang berkaitan dengan topik penelitian. Topik penelitian ini ialah seputar pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL). Setelah mendapatkan informasi tentang topik penelitian, selanjutnya mendesain model pelampung pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan menggunakan *software ANSYS*.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini, yang bertujuan untuk menganalisis karakteristik hidrodinamika dan efisiensi daya serap gelombang pada PLTGL melalui simulasi numerik menggunakan ANSYS AQWA, adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil simulasi numerik menggunakan ANSYS AQWA, dapat disimpulkan bahwa pelampung PLTGL tipe point absorber yang dianalisis mampu menyerap daya gelombang secara efektif pada rentang frekuensi tertentu, sehingga tujuan penelitian untuk mengevaluasi performa penyerapan daya gelombang telah tercapai. Efisiensi daya serap meningkat seiring dengan bertambahnya frekuensi gelombang dan mencapai nilai maksimum sebesar 32,7% pada frekuensi 1,03 Hz, yang menunjukkan kondisi sistem mendekati resonansi. Hasil ini menegaskan bahwa respons gerak heave dan karakteristik dinamis pelampung berperan penting dalam menentukan performa penyerapan daya gelombang pada sistem PLTGL tipe point absorber. Nilai *Response Amplitude Operator* (RAO) *heave* meningkat seiring dengan bertambahnya frekuensi gelombang, yang mengindikasikan bahwa amplitudo gerak vertikal pelampung menjadi lebih besar ketika sistem mendekati frekuensi alaminya.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan pemodelan sistem *Power Take-Off* (PTO) ke dalam simulasi guna menghubungkan potensi daya serap dengan keluaran daya listrik.
2. Analisis dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan kondisi gelombang tidak teratur (*irregular wave*) agar hasil simulasi lebih merepresentasikan kondisi gelombang laut sebenarnya dibandingkan gelombang reguler yang digunakan dalam penelitian ini.
3. Penelitian berikutnya dapat mengevaluasi pengaruh variasi geometri dan ukuran pelampung terhadap nilai RAO, radiation damping, dan efisiensi daya serap, sehingga diperoleh desain pelampung yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbasi, R., Harris, J., Stedman, L., & Baldock, T. E. (2025). Numerical and Experimental Investigation of Float Shape Effects on Single-Heaving Wave Energy Converter Performance. *International Marine Energy Journal*, 8(4), 395-405.
- Abdullatif R.F, J. Aminuddin, dan A.N. Aziz.2013. Pengembangan Sistem Komputasi dan Instrumentasi Fisis dalam Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Pendulum. Seminar Nasional Pengembangan Pedesaan, LPPM-UNSOED September 2013.
- Agustina, S., Yusup, M., Dwijayanti, S., Otong, M. dan Suprpto, B.Y., 2021. Desain pengembangan sistem pembangkit listrik tenaga gelombang laut berbasis keseimbangan gyroscope. *Jurnal Surya Energy*, 5(2), pp.50–54. doi:10.32502/jse.v5i2.3328.
- Aimi, A., Di Credico, G., Gimperlein, H., & Guardasoni, C. (2024). Adaptive time-domain boundary element methods for the wave equation with Neumann boundary conditions.
- Ajij, I. M., & Supriyatna, D. (2024). Penerapan hukum archimedes pada kapal laut (mekanika fluida). *Kohesi: Jurnal Sains dan Teknologi*, 3(2), 31-40.
- Akmal, J., Suudi, A., Grahita, Y. S., Lubis, A., Tanti, N., & Hasyimi, Z. (2023). Media Pembangkit Gelombang Skala Laboratorium. *Jurnal Teknik Mesin*, 16(2), 127-132.
- Al Mursyid, M. H. A., Mangkurat, B. B., & Andriawan, A. H. (2020). Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Air Laut (Pelampung)

- Kapasitas 100 Watt. *Jurnal EL Sains P-ISSN*, 2527, 6336. Maheswara, W., Budiarto, U. dan Zakki, A.F. (2018) ‘Analisis Pengaruh Hull Vane Tipe NACA 4412 Sudut 10° terhadap Hambatan dan Seakeeping pada Kapal Perintis 750 DWT dengan Variasi Jumlah dan Posisi Foil Hull Vane menggunakan Metode CFD’, *Jurnal Teknik Perkapalan*, 6(2).
- Alamsyah, Z., Zulkarnaen, Z. dan Suardi, S., 2021. Analisis stabilitas KM. Rejeki Baru Kharisma rute Tarakan – Tanjung Selor. *TEKNIK*, 42(1), pp.52–62. doi:10.14710/teknik.v42i1.31283.
- Alver, F. (2025). Analysis and Optimization of Point Absorber Wave Energy System Buoys Using Ansys. *Kocaeli Journal of Science and Engineering*, 8(2), 147-153.
- Chen, C. W., Chen, Y., & Cai, Q. W. (2019). Hydrodynamic-interaction analysis of an autonomous underwater hovering vehicle and ship with wave effects. *Symmetry*, 11(10), 1213.
- Chen, L., Wang, Z., Lian, H., Ma, Y., Meng, Z., Li, P., Ding, C & Bordas, S. P. (2024). Reduced order isogeometric boundary element methods for CAD-integrated shape optimization in electromagnetic scattering. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 419, 116654.
- Drew, B., Plummer, A. R. and Sahinkaya, M. N. (2009). A Review Of Wave Energy Converter Technology, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 223(8), pp. 887–902. doi: 10.1243/09576509JPE782.
- Edison, E. (2021). Perancangan Sepeda Air Untuk Kendaraan Wisata Alam Lembah Harau. *Rang Teknik Journal*, 4(2), 339-347.
- Falletta, S., & Sauter, S. (2025). A spectral boundary element method for acoustic interference problems. *arXiv preprint arXiv:2502.21008*.
- Guachamin-Acero, W., Alvarez, R., Segovia, J., Salguero, M., Bravo, J., Paredes, R., ... & Portilla-Yandún, J. (2024). Feasibility study of a method for tuning

- wave energy converters. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 64, 103702.
- Han, M., Cao, F., Shi, H., Kou, H., Gong, H., & Wang, C. (2023). Parametrical study on an array of point absorber wave energy converters. *Ocean Engineering*, 272, 113857.
- Huang, Y., Xiao, Q., Dai, S., Cui, L., Yang, L., Lotfian, S., ... & Brennan, F. (2025). Experimental investigation of hydroelastic response and resonance characteristics in anaconda wave energy converter. *Ocean Engineering*, 334, 121554.
- Hutauruk, R. M., & Rengi, P. (2013). Wave Surface Simulation on Optimized Fishing Vessel Hullform. *International Fisheries and Marine* (hal. 84-88). Pekanbaru: Faperika UR.
- Iglesias, G., Alvarez, M., & García, P. (2010). Wave energy converters. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*.
- Irfan, I. R. (2017). Respon to Pontoon and Pendulum Motion at Wave Energy Converter Based on Pendulum System. *E3S Web of Conferences* 43,01022.
- Khanal, K., Ströfer, C. A. M., Ancellin, M., & Haji, M. (2025). Fully Differentiable Boundary Element Solver for Hydrodynamic Sensitivity Analysis of Wave-Structure Interactions. *arXiv preprint arXiv:2501.06988*.
- Kurniawan. R., Habibie.M. N., dan Suratno., 2011. Variasi Bulanan Gelombang Laut di Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 12 (3), pp. 221-232.
- Liang, B., Shao, Z., Wu, G., Shao, M., & Sun, J. (2017). New equations of wave energy assessment accounting for the water depth. *Applied Energy*, 188, 130-139.
- Loupatty, G., 2013. Karakteristik Energi Gelombang dan Arus Perairan di Provinsi Maluku. *BAREKENG: Jurnal Ilmu Matematika dan Terapan*, 7(1), pp.19–22. doi:10.30598/barekengvol7iss1pp19-22.

- Murtedjo, M. (2003). Penentuan Added Mass Hycat Akibat Gerakan Couple Heaving Pitching pada Gelombang Reguler. *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 10(1), 15-26.
- Natarajan, S. K., & Cho, I. (2023). New Strategy on Power Absorption of a Concentric Two-Body Wave Energy Converter. *Energies*, 16(9), 3791.
- Parjiman, Daryanto, Subekti, M. and Rif'an, M., 2018. Simulasi gelombang laut untuk pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL). *Jurnal Teknologi Elektro*, Universitas Mercu Buana, 9(2), May. ISSN 2086-9479.
- Phan, C. B., & Ahn, K. K. (2024). Experimental Investigation of a Point Absorber Wave Energy Converter Using an Inertia Adjusting Mechanism. *Applied Sciences*, 14(13), 5506.
- Qin, H., Peng, L., Wang, Z., Wu, S., He, W., Yang, Y., Li, J & Zhang, H. (2025). Wave Motion Response Analysis of Flip-Type Ocean Aquaculture Platforms Based on AQWA. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(2), 211.
- Rezaee, T. (2025). Boundary integral solver for wave energy converter hydrodynamics. *Discover Energy*, 5(1), 40.
- Royyana, M.B.N., Budiarto, U. and Rindho, G., 2015. Analisa bentuk oscillating water column untuk pemanfaatan gelombang laut sebagai sumber energi terbarukan dengan metode computational fluid dynamic (CFD). *Jurnal Teknik Perkapalan*, 3(1), January.
- Shahroozi, Z., Göteman, M., & Engström, J. (2022). Experimental investigation of a point-absorber wave energy converter response in different wave-type representations of extreme sea states. *Ocean Engineering*, 248, 110693.
- Sundar, V. (2016). *Ocean wave mechanics : applications in marine structures*.
- Suprijadi, L., Pasaribu, R.P., Sewiko and Nata, R., 2024. Rancang bangun mekanika pembangkit listrik tenaga gelombang air laut dengan sistem pelampung. *ZONA LAUT*, 5(2), July

- Syam, S.S., 2024. Studi potensi gelombang laut sebagai sumber energi pembangkit listrik tenaga gelombang dengan sistem oscillating water column di perairan Selat Makassar. Skripsi (Sarjana Teknik Elektro). Universitas Hasanuddin.
- Ta, D. T., Phan, Q. N., & Truong, T. T. (2025, February). Hydrodynamic Analysis of Point Absorber Wave Energy Converters Using ANSYS Aqwa. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2949, No. 1, p. 012047). IOP Publishing.
- Utomo A.R, L. Pasaribu, dan W. Handini.2008. Studi Penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut dengan Penggerak Pendulum di Lautan Kepulauan Mentawai Sumatera barat. Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi-II, 17-18 November, Universitas Lampung. 26-34.
- Waldopo. (2008). Perairan Darat dan Laut. Dra. Asih Priati, 7.
- Webb, P. (2023, Agustus 23). *Introduction To Oceanography*. Retrieved from [rwu.pressbooks.pub:https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/chapter/10-1-wave-basics/?utm](https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/chapter/10-1-wave-basics/?utm)
- Zahril, M. A., Manik, P., & Kiryanto, K. (2021). Analisa Pengaruh Penambahan Hull Fixed Bow Fin Terhadap Gerak Pitching dan Heaving Pada Kapal Tanker 112 Meter. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 9(3).
- Zheng, Y. T., Liu, Y., Gao, X. W., Yang, Y., & Peng, H. F. (2024). Improved hole and tube elements in BEM for elasticity problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 159, 17-35.