

SKRIPSI

**SIMULASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG
LAUT MENGGUNAKAN HOMER DENGAN TEKNOLOGI
OSCILLATING WATER COLUMN DI KABUPATEN
JENEPONTO SULAWESI SELATAN**

Disusun dan diajukan oleh

SITI NAMIRAH APRILLIAH

D041 19 1074



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**SIMULASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
GELOMBANG LAUT MENGGUNAKAN HOMER
DENGAN TEKNOLOGI *OSCILLATING WATER
COLUMN* DI KABUPATEN JENEPONTO SULAWESI
SELATAN**

Disusun dan diajukan oleh

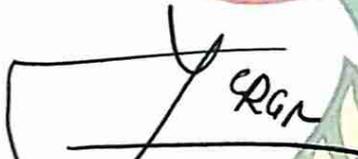
Siti Namirah Aprilliah
D041191074

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 11 Juli 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

UNIVERSITAS HASANUDDIN
Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,


Dr. Ir. Yusran, ST., MT.
NIP. 19690201 199412 1 001


Dr. Ikhlas Kitta, ST., MT.
NIP. 19750203 200012 2 002

Ketua Program Studi,




Eni R. Dewiani, M.T. IPM
NIP. 19691026 199412 2 0

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Siti Namirah Aprilliah
NIM : D041191074
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**SIMULASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT
MENGUNAKAN HOMER DENGAN TEKNOLOGI OSCILLATING
WATER COLUMN DI KABUPATEN JENEPONTO SULAWESI
SELATAN**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 20 Agustus 2024

Yang Menyatakan



Siti Namirah Aprilliah

KATA PENGANTAR

Dengan nama Allah Yang Maha pengasih lagi Maha Penyayang. Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira karena atas izin, rahmat serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul “Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Menggunakan Homer Dengan Teknologi *Oscillating Water Column* Di Kabupaten Jeneponto Sulawesi Selatan” sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Banyak pihak telah membantu dan mendukung dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kepada keluarga dan kedua orangtua penulis yang selalu memberikan motivasi dan dukungan selama proses studi di Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Bapak Dr. Yusran, S.T., M.T. selaku Kepala Laboratorium Elektronika Daya dan juga sebagai dosen pembimbing I dan Bapak Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing II yang telah membantu dan memberikan saran dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
3. Ibu Dr. Fitriyanti Mayasari, S.T., M.T dan Ibu Dr. Hasniaty Abdullah, S.T., M.T. yang telah memberikan kritik dan saran dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Ibu Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. Bapak dan Ibu Dosen beserta staf Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah membantu dan membagikan ilmunya selama proses studi penulis di Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Kepada teman-teman Ravensive yang menemani dan sebagai tempat melepas penat selama kuliah.
7. Kepada teman-teman Sarang laba-laba
8. Kepada teman-teman TR19GER yang telah membantu dan sama-sama berjuang selama perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini memiliki banyak kekurangan, untuk itu penulis berharap kritik dan saran yang konstruktif sebagai bahan evaluasi dan pembelajaran bagi penulis kedepannya. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan referensi bagi pembaca.

Gowa, 4 Agustus 2024

Penulis

ABSTRAK

SITI NAMIRAH APRILLIAH. *Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Menggunakan Homer Dengan Teknologi Oscillating Water Column di Kabupaten Jeneponto Sulawesi Selatan.* (dibimbing oleh Yusran dan Ikhlas Kitta)

Seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk, kebutuhan akan energi juga semakin meningkat. Salah satu potensi energi baru terbarukan yang ada di Indonesia yaitu gelombang laut. Dengan wilayah lautan Indonesia yang lebih besar daripada wilayah daratannya, potensi gelombang laut dapat dimanfaatkan sebagai salah satu sumber energi baru terbarukan. Akan tetapi pemanfaatan energi gelombang laut di Indonesia belum dimanfaatkan dengan maksimal karena keterbatasan teknologi pengolahan sumber daya alam tersebut.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besar daya listrik, karakteristik daya dari simulasi pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan teknologi *oscillating water column*. Penelitian ini dilakukan di Desa Pao, Kecamatan Tarawang, Kabupaten Jeneponto, Sulawesi Selatan. Penelitian ini menggunakan data sekunder dari Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika Stasiun Meteorologi Paotere Makassar, NASA dan NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

Metode penelitian yang digunakan yaitu penelitian kuantitatif dengan *software* yang digunakan untuk melakukan simulasi yaitu MATLAB Simulink dan HOMER.

Dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa pada pembangkit listrik tenaga gelombang laut, berdasarkan hasil perhitungan energi listrik yang dihasilkan paling tinggi sebesar 6648,622 kW pada bulan Februari 2023. Sedangkan untuk energi listrik paling rendah yaitu sebesar 390,980 kW pada bulan November 2022. Hasil tersebut dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu faktor cuaca, panjang dan lebar *chamber* dan spesifikasi alat yang digunakan untuk membuat model pembangkit listrik tenaga gelombang laut. Karakteristik daya yang dihasilkan pada pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan teknologi *oscillating water column* yaitu dengan mengikuti karakteristik dari kecepatan angin dan kecepatan gelombang.

Kata kunci: Energi baru terbarukan, *oscillating water column*, gelombang laut, simulasi, MATLAB, HOMER, daya.

ABSTRACT

SITI NAMIRAH APRILLIAH. *Simulation of Sea Wave Power Plant Using Homer with Oscillating Water Column Technology in Jeneponto Regency, South Sulawesi. (guided by Yusran and Ikhlas Kitta)*

As the population increases, the need for energy also increases. One of the potential for new renewable energy in Indonesia is sea waves. With Indonesia's ocean area larger than its land area, the potential of sea waves can be utilized as a new renewable energy source. However, the use of sea wave energy in Indonesia has not been utilized optimally due to the limitations of natural resource processing technology.

This study aims to determine the amount of electrical power, power characteristics from simulating sea wave power plants with *oscillating water column* technology. This research was conducted in Pao Village, Tarowang District, Jeneponto Regency, South Sulawesi. This study used secondary data from the Meteorology, Climatology and Geophysics Agency of the Makassar Paotere Meteorological Station, NASA and NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

The research method used is quantitative research with *software* used to conduct simulations, namely MATLAB, Simulink, and HOMER.

From this study, it can be concluded that in sea wave power plants, based on the calculation results, the highest amount of electrical energy produced is 6648,622 kW in February 2023. Meanwhile, the lowest electrical energy is 390,980 in November 2022. These results can be influenced by several factors, namely weather factors, chamber length and width and specifications of tools used to make models of ocean wave power plants. The characteristics of power generated in sea wave power plants with *oscillating water column* technology are by following the characteristics of wind speed and wave speed.

Keywords: renewable energy, oscillating water column, ocean wave, simulation, MATLAB, HOMER, power.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Pengertian Gelombang laut.....	4
2.2 Teori Gelombang Amplitudo Kecil	4
2.3 Energi Gelombang Laut menjadi Energi Listrik.....	5
2.4 Metode Pemanfaatan Gelombang Laut sebagai Penghasil Energi Listrik	7
2.5 Pembangkitan Gelombang Angin	11
2.6 PLTGL <i>Oscillating Water Column</i>	12
2.6.1 <i>Oscillating water column</i> (OWC)	12
2.6.2 Komponen PLTGL-OWC.....	14
2.6.2.1 Turbin.....	14
2.6.2.2 <i>Wells turbine</i>	15
2.6.2.3 Kolektor.....	15

2.6.2.4 Generator.....	16
2.7 Perhitungan Energi Gelombang Laut pada PLTGL-OWC	16
2.7.1 Perhitungan energi gelombang yang dihasilkan turbin sumur (<i>wells turbine</i>)	18
2.8 Pemodelan Turbin Sumur (<i>Wells Turbine</i>)	19
2.9 <i>Software</i> HOMER	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1 Lokasi Penelitian.....	23
3.2 Alat Penelitian.....	24
3.3 Tahapan Penelitian	24
3.4 Teknik Pengumpulan Data.....	25
3.5 Diagram Alir Penelitian	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Data Penelitian	27
4.2 Pemodelan PLTGL Sistem OWC dengan MATLAB Simulink	42
4.2.1 Pemodelan DFIG.....	42
4.2.2 Pemodelan <i>wells turbine</i>	44
4.3 Hasil Simulasi PLTGL Sistem OWC dengan MATLAB Simulink	44
4.4.1 <i>Hydrokinetic</i>	59
4.4.3 <i>Autosize genset</i>	60
4.4.3 <i>Electric load</i>	61
4.4 Hasil Simulasi Software HOMER	61
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	66
5.1 Kesimpulan	66
5.2 Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Gerakan partikel gelombang air (a) Gerakan melingkar partikel air di dalam air (b) gerakan melingkar panjang partikel air di permukaan (Twidell & Weir, 2006).	6
Gambar 2 Skematik PLTGL sistem kanal (Twidell & Weir, 2006)	9
Gambar 3 Pembentukan gelombang angin di daerah pembangkitan	12
Gambar 4 Skematik diagram PLTGL-OWC (Twidell & Weir, 2006)	13
Gambar 5 (a) <i>Wells turbine</i> (b) gerakan dari sudu turbin (Twidell & Weir, 2006).	15
Gambar 6 Peta lokasi kecamatan tarowang	23
Gambar 7 Peta batimetri perairan Sulawesi Selatan dan peta batimetri tempat pemasangan OWC di Kabupaten Jeneponto	24
Gambar 8 Diagram alir pemodelan simulasi MATLAB simulink	26
Gambar 9 Model DFIG di simulink	43
Gambar 10 Model wells turbine di simulink	44
Gambar 11 Model simulasi di simulink	54
Gambar 12 Grafik arus pada sisi rotor	55
Gambar 13 Grafik tegangan pada sisi rotor	56
Gambar 14 Grafik daya	56
Gambar 15 Grafik arus pada sisi stator	57
Gambar 16 Grafik tegangan pada sisi stator	57
Gambar 17 Skematik sistem PLTGL di HOMER	58
Gambar 18 Komponen hydrokinetic di HOMER	60
Gambar 19 Kurva beban rumah tangga di HOMER	61
Gambar 20 Output komponen hydrokinetic	63
Gambar 21 Visualisasi PLTGL-OWC	63

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Data kecepatan angin	27
Tabel 2 Data tinggi gelombang	28
Tabel 3 Data periode gelombang laut	29
Tabel 4 Data amplitudo	30
Tabel 5 Data panjang gelombang	30
Tabel 6 Data kecepatan gelombang	31
Tabel 7 Energi total yang dihasilkan dari pembangkit listrik tenaga gelombang laut	33
Tabel 8 Data daya gelombang laut	34
Tabel 9 Data daya angin	35
Tabel 10 Data koefisien daya	37
Tabel 11 Parameter turbin sumur	38
Tabel 12 Tekanan jatuh pada rotor	38
Tabel 13 Data koefisien torka	40
Tabel 14 Data torka turbin	41
Tabel 15 Daya PLTGL sistem OWC pada simulink	45
Tabel 16 Data amplitudo hasil simulasi MATLAB Simulink	45
Tabel 17 Data panjang gelombang hasil simulasi MATLAB simulink	46
Tabel 18 Data kecepatan gelombang hasil simulasi MATLAB simulink	47
Tabel 19 Data energi total hasil simulasi MATLAB simulink	48
Tabel 20 Data daya gelombang laut hasil simulasi MATLAB simulink	49
Tabel 21 Data daya angin hasil simulasi MATLAB simulink	50
Tabel 22 Data koefisien daya hasil simulasi MATLAB simulink	50
Tabel 23 Data tekanan jatuh hasil simulasi MATLAB simulink	51
Tabel 24 Data koefisien torka hasil simulasi MATLAB simulink	52
Tabel 25 Data hasil simulasi MATLAB simulink	53
Tabel 26 Data persentase kesalahan antara hasil perhitungan dan hasil simulasi	58
Tabel 27 Komponen yang digunakan pada sistem PLTGL	59
Tabel 28 Nilai input dan output hydrokinetic	59
Tabel 29 Produksi energi listrik PLTGL di HOMER	61

Tabel 30 Konsumsi energi listrik PLTGL di HOMER	62
Tabel 31 Spesifikasi <i>hydrokinetic</i>	62
Tabel 32 Parameter PLTGL-OWC	64

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
ρ	massa jenis
g	Kecepatan gravitasi
T	Periode gelombang
H	Ketinggian gelombang
λ	Panjang gelombang
V	Kecepatan gelombang
a	Amplitudo
E_w	Energi gelombang laut
P_w	Daya listrik dari energi gelombang laut
P_a	Daya angin
A	Luas area sapuan rotor
V_x	Kecepatan udara
τ	Torsi
F	Gaya
R/r	Jari-jari
Ω/ω	Kecepatan sudut
P_m	Daya mekanik
C_a	Koefisien daya
D_p	Tekanan jatuh pada rotor
K	Konstanta turbin
a_t	Area saluran turbin
C_t	Koefisien torka
T_t	Torka turbin
b	Tinggi sudu turbin
l	Panjang <i>chamber</i>
n	Jumlah bilah/sudu turbin
R_s	Resistansi stator
R_r	Resistansi rotor
L_{ss}	Induktansi stator

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
L_{rr}	Induktansi rotor
L_m	Induktansi bersama
EBT	Energi Baru Terbarukan
SDGs	<i>Sustainable Development Goals</i>
PLTGL	Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut
PLTA	Pembangkit Listrik Tenaga Air
OTEC	<i>Ocean Thermal Energy Conversion</i>
CFC	<i>Klorofluorokarbon</i>
HCFC	<i>Hidroklorofluorokarbon</i>
OWC	<i>Oscillating Water Column</i>
BMKG	Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika
BPS	Badan Pusat Statistik
HOMER	<i>Hybrid Optimisation of Multiple Energy Resources</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara geografis, Indonesia terletak di antara dua benua dan dua samudera yaitu Benua Asia dan Benua Australia dan berada di antara Samudera Hindia dan Samudera Pasifik. Secara astronomi Indonesia terletak di 6°LU - 11°LS dan 95°BT - 141°BT dimana Indonesia dilalui oleh garis khatulistiwa yang berpengaruh terhadap musim yang terjadi di Indonesia. Indonesia disebut sebagai Negara maritim karena wilayah perairan Indonesia lebih besar daripada wilayah daratannya yaitu wilayah lautnya dua per tiga dari wilayah daratannya.

Seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk, kebutuhan akan energi juga semakin meningkat. Selama ini, untuk memenuhi kebutuhan energi sehari-hari sebagian besar sumber energinya berasal dari energi fosil dimana energi ini semakin lama akan semakin menipis dan untuk menghasilkannya kembali membutuhkan waktu yang cukup lama (Fauzi Farhan, 2023).

Di Indonesia, telah dilakukan pengembangan Energi Baru Terbarukan (EBT) sebagai upaya untuk melakukan penurunan gas emisi rumah kaca sebagai langkah menuju transisi energi dan mempercepat peralihan dari energi fosil ke energi bersih agar dapat mencapai target Tujuan Pembangunan Berkelanjutan atau *Sustainable Development Goals* (SDGs) (EBTKE, 2021).

Salah satu potensi EBT yang ada di Indonesia yaitu gelombang laut. Dengan wilayah lautan Indonesia yang lebih besar daripada wilayah daratannya, potensi gelombang laut dapat dimanfaatkan sebagai salah satu sumber energi baru terbarukan. Akan tetapi pemanfaatan energi gelombang laut di Indonesia belum dimanfaatkan dengan maksimal karena keterbatasan teknologi pengolahan sumber daya alam tersebut (Anizar Indriani, 2020).

Di daerah Sulawesi Selatan sendiri, wilayah lautnya terdiri dari Selat Makassar di bagian barat, Laut Flores di bagian selatan dan Teluk Bone di bagian timur. Berdasarkan data pada tahun 2010, perairan selatan Sulawesi, Laut Flores dan Selat Makassar bagian selatan memiliki frekuensi gelombang lebih dari 3

meter. Untuk wilayah Kabupaten Jeneponto, wilayah perairannya termasuk dari bagian Laut Flores yang kecepatan angin rata-ratanya yaitu 3-12 knot (Utami, 2010).

Beberapa penelitian sebelumnya merupakan penelitian mengenai potensi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Menggunakan sistem *Oscillating Water Column* yang dimana untuk didaerah Sulawesi Selatan sendiri belum diteliti. Oleh karena itu, judul ini kemudian muncul untuk melihat potensi dari Pembangkit ini di wilayah Sulawesi Selatan khususnya di daerah Kabupaten Jeneponto.

1.2 Rumusan Masalah

1. Berapa besar daya listrik yang dapat dihasilkan dari pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan teknologi *oscillating water column* di Jeneponto Sulawesi Selatan?
2. Bagaimana karakteristik daya yang dihasilkan pada pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan teknologi *oscillating water column*?
3. Bagaimana hasil simulasi dari pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan teknologi *oscillating water column* menggunakan *software* MATLAB dan HOMER?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui besar daya listrik yang dapat dihasilkan dari pembangkit listrik tenaga gelombang laut di Jeneponto Sulawesi Selatan dengan teknologi *oscillating water column*.
2. Mengetahui karakteristik daya pada pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan teknologi *oscillating water column*.
3. Menghasilkan simulasi pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan teknologi *oscillating water column* dengan menggunakan *software* MATLAB dan HOMER.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaatnya yaitu memberikan informasi tentang potensi pembangkit listrik tenaga gelombang laut di Kecamatan Tarowang, Kabupaten Jeneponto, Sulawesi Selatan dan besar daya yang dapat dihasilkan dari Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut dengan teknologi *oscillating water column*.

1.5 Batasan Masalah

1. Lokasi penelitian ini yaitu di daerah Kabupaten Jeneponto, Sulawesi Selatan.
2. Penggunaan *software* MATLAB untuk membuat simulasi pembangkit dengan menghasilkan nilai daya yang dapat dibangkitkan dari pembangkit listrik tenaga gelombang laut.
3. Penggunaan *software* HOMER untuk membuat simulasi pembangkit listrik tenaga gelombang laut dalam periode satu tahun.
4. Hanya memperhatikan dari sisi besarnya daya yang dapat dibangkitkan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut di Kabupaten Jeneponto.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Gelombang laut

Gelombang laut merupakan pergerakan naik turunnya air dengan arah tegak lurus permukaan air laut yang membentuk kurva atau grafik sinusoidal. Angin memindahkan tenaganya ke permukaan perairan menyebabkan riak-riak, alunan atau bukit dan berubah menjadi apa yang disebut sebagai gelombang atau ombak. Prinsip dasar terjadinya gelombang laut adalah jika dua massa yang berbeda kerapatannya (densitasnya) bergesekan satu sama lain, maka pada bidang gerakannya akan terbentuk gelombang (Ludji, Koehuan, & Nurhayati, 2014).

2.2 Teori Gelombang Amplitudo Kecil

Teori gelombang amplitudo kecil diturunkan berdasar persamaan Laplace untuk aliran tak rotasi (*irrotational flow*) dengan kondisi batas di permukaan air dan dasar laut. Kondisi batas di permukaan air didapat dengan melinierkan persamaan Bernoulli untuk aliran tak mantap. Penyelesaian persamaan tersebut memberikan potensial kecepatan periodik untuk aliran tak rotasional. Potensial kecepatan ini kemudian digunakan untuk menurunkan persamaan dari berbagai karakteristik gelombang seperti fluktuasi muka air, kecepatan dan percepatan partikel, tekanan, kecepatan rambat gelombang, dan sebagainya. Anggapan-anggapan yang digunakan untuk menurunkan persamaan gelombang adalah sebagai berikut (Triatmodjo, 2008) :

1. Zat cair adalah homogen dan tidak termampatkan, sehingga rapat massa adalah konstan.
2. Tegangan permukaan diabaikan.
3. Gaya Coriolis (akibat perputaran bumi) diabaikan.
4. Tekanan pada permukaan air adalah seragam dan konstan.
5. Zat cair adalah ideal, sehingga berlaku aliran tak rotasi.
6. Dasar laut adalah horizontal, tetap dan *impermeable* sehingga kecepatan vertikal di dasar adalah nol.

7. Amplitudo gelombang kecil terhadap panjang gelombang dan kedalaman air.
8. Gerak gelombang berbentuk silinder yang tegak lurus arah penjalaran gelombang sehingga gelombang adalah dua dimensi.

Berdasarkan kedalaman relatif, yaitu perbandingan antara kedalaman air d dan panjang gelombang L , (d/L), gelombang dapat diklasifikasikan menjadi tiga macam yaitu :

1. Gelombang di laut dangkal jika $d/L \leq 1/20$
2. Gelombang di laut transisi jika $1/20 < d/L < 1/2$
3. Gelombang di laut dalam jika $d/L \geq 1/2$

Klasifikasi ini dilakukan untuk menyederhanakan rumus-rumus gelombang (Triatmodjo, 2008).

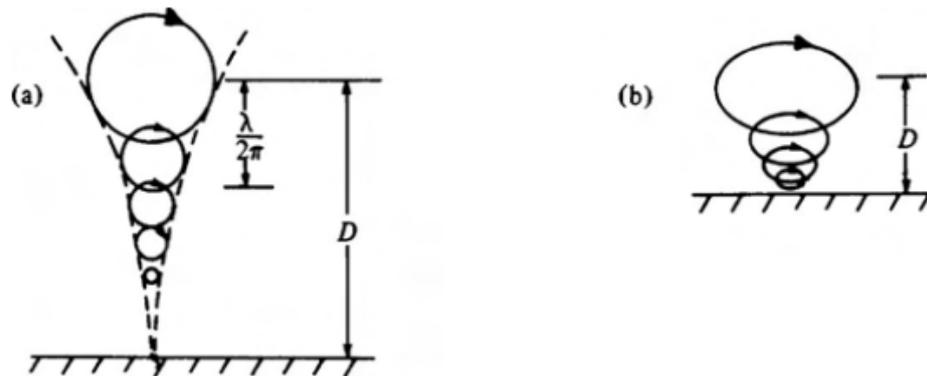
2.3 Energi Gelombang Laut menjadi Energi Listrik

Pembangkit listrik energi gelombang laut lebih banyak dirancang untuk mengubah energi gelombang laut yang berada di dalam air. Bentuk gelombang ini merupakan bentuk gelombang yang paling sering ditemui ketika rata-rata kedalaman dasar laut D lebih dari setengah panjang gelombang (λ). Gerakan melingkar partikel memiliki amplitudo yang menurun secara eksponensial terhadap kedalaman laut dan diabaikan jika $D > \frac{\lambda}{2}$. Di kedalaman laut yang dangkal gerakannya berubah menjadi berbentuk bulat panjang dan pergerakan air menjadi berlawanan dengan pergerakan yang ada di dalam air yang menghasilkan disipasi energi.

Gelombang air di kedalaman air laut memiliki khas tertentu yaitu :

1. Gelombang permukaan laut adalah gelombang sinus yang tidak terputus dengan gelombang, fasa dan arah yang tidak beraturan.
2. Gerakan partikel dari air adalah melingkar. Sedangkan bentuk gelombang permukaan dapat dilihat dengan menunjukkan perkembangan yang pasti, tetapi partikel air tidak memiliki perkembangan.
3. Air di permukaan tetap di permukaan.

4. Pada kedalaman $\frac{\lambda}{2} \pi$, amplitudo gerakan partikel air berkurang secara eksponensial, amplitudo akan dikurangi menjadi $\frac{1}{e}$ dari amplitudo yang ada di permukaan ($e = 2,72$, berdasarkan algoritma natural) di kedalaman $\frac{\lambda}{2}$ gerakan partikel air diabaikan dengan nilai kurang dari 5% dari gerakan yang ada di permukaan.
5. Amplitudo pada gambar a merupakan bentuk gelombang yang pada dasarnya tidak bergantung dengan panjang gelombang, kecepatan c atau periode T pada gelombang, bergantung pada angin yang ada di permukaan. Namun nilai amplitudo, jarang melebihi sepersepuluh dari panjang gelombang.
6. Gelombang akan pecah pada kemiringan permukaan sekitar 1 dari 7 dan akan menghilangkan potensi energi gelombang laut.



Gambar 1 Gerakan partikel gelombang air (a) Gerakan melingkar partikel air di dalam air (b) gerakan melingkar panjang partikel air di permukaan (Twidell & Weir, 2006).

Teori dasar dari gelombang dalam air dimulai dengan mempertimbangkan satu gelombang biasa. Partikel-partikel air yang berada dekat dari permukaan air akan bergerak melingkar pada fasa yang bervariasi dengan arah propagasi x . Gerak partikel akan tetap melingkar di dasar laut dengan kedalaman $D > 0.5\lambda$, jika nilai amplitudo diabaikan di dasar laut (Twidell & Weir, 2006).

Daya yang dapat dihasilkan per satuan panjang permukaan gelombang dapat dilihat pada persamaan (Silva, Beluco, & Almeida, 2014)

:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (1)$$

dimana,

ρ = massa jenis air laut (kg/m^3)

G = kecepatan gravitasi (m/s^2)

H_s = tinggi gelombang (m)

T_e = periode gelombang (s)

2.4 Metode Pemanfaatan Gelombang Laut sebagai Penghasil Energi Listrik

Metode yang dapat digunakan untuk pemanfaatan gelombang laut sebagai penghasil energi listrik, diantaranya :

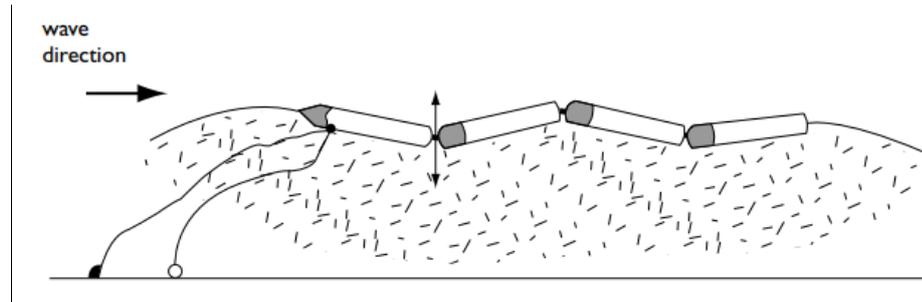
a. *Permanent Magnet Linear Buoy*

Peneliti Universitas Oregon mempublikasikan teman teknologi terbarunya yang diberi nama *Permanent Magnet Linear Buoy*. Diberi nama *buoy* karena memang pada prinsip dasarnya, teknologi terbaru tersebut dipasang untuk memanfaatkan gelombang laut di permukaan. Berbeda dengan *buoy* yang digunakan untuk mendeteksi gelombang laut di permukaan. Berbeda dengan *buoy* yang digunakan untuk mendeteksi gelombang laut yang menyimpan potensi tsunami. Prinsip dasar *buoy* penghasil listrik ini yaitu dengan mengapungkan di permukaan. Gelombang laut yang terus mengalir dan berirama bolak-balik dalam *buoy* ini akan diubah menjadi gerakan harmonis listrik. Sekilas bila dilihat dari bentuknya, *buoy* ini mirip dengan dinamo sepeda.

Bentuknya silindris dengan perangkat penghasil listrik pada bagian dalamnya. *Buoy* diapungkan di permukaan laut dengan posisi sebagian tenggelam dan sebagian lagi mengapung. Kuncinya, terdapat pada perangkat elektrik yang berupa koil (kumparan yang mengelilingi batang magnet di dalam *buoy*). Saat ombak mencapai pelampung, maka pelampung akan bergerak naik dan turun secara relatif terhadap batang magnet sehingga bisa menimbulkan beda potensial dan listrik dibangkitkan. Agar dapat bergerak, koil tersebut ditempelkan pada pelampung yang dikaitkan ke

dasar laut. Sistem ini diletakkan kurang lebih satu atau dua mil laut dari pantai. Kondisi ombak yang cukup kuat dan mengayun dengan gelombang yang lebih besar akan menghasilkan listrik dengan tegangan yang lebih tinggi.

b. Sistem Pelamis



Gambar 2 PLTGL sistem pelamis (*Twidell & Weir, 2006*)

Sistem pelamis dikembangkan oleh *ocean power delivery*, pada sistem ini terdapat tabung-tabung yang sekilas terlihat seperti ular yang mengambang di permukaan laut sebagai penghasil listrik. Setiap tabung memiliki panjang sekitar 122 meter dan terbagi menjadi empat segmen.

Setiap ombak yang melalui alat ini akan menyebabkan tabung silinder tersebut bergerak secara vertikal maupun lateral. Gerakan yang ditimbulkan akan mendorong piston diantara tiap sambungan segmen yang selanjutnya memompa cairan hidrolik bertekanan melalui sebuah motor untuk menggerakkan generator listrik.

Agar tidak terbawa arus, setiap tabung ditahan di dasar laut menggunakan jangkar khusus. Prinsipnya menggunakan gerakan naik turun dari ombak untuk menggerakkan piston yang bergerak naik turun pula di dalam sebuah silinder.

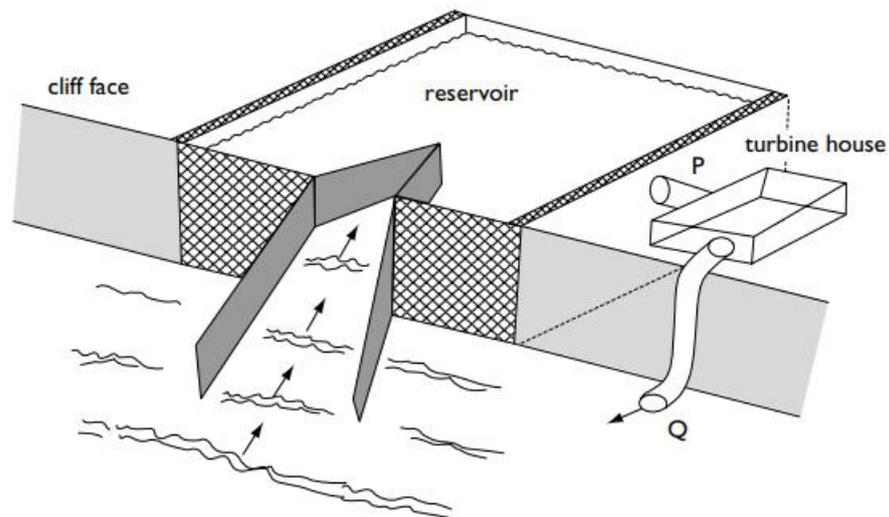
c. Sistem Sirip Ikan Hiu Buatan

Sistem ini dikembangkan oleh perusahaan inovatif *Bio Power System* yang mengembangkan sirip ikan hiu buatan dan rumput laut mekanik untuk menangkap energi dari ombak. Ketika arus ombak menggoyang sirip ekor mekanik dari samping ke samping, sebuah kotak gir akan mengubah gerakan osilasi tersebut menjadi gerakan searah yang

menggerakkan sebuah generator magnetik. Rumput laut mekaniknya pun bekerja dengan cara yang sama, yaitu dengan menangkap arus ombak di permukaan laut dan menggunakan generator yang serupa untuk merubah pergerakan laut menjadi listrik.

Dalam konfigurasi ini, mekanisme pendorong dibalik dan energi yang terdapat pada arus yang mengalir digunakan untuk mendorong gerakan perangkat terhadap torsi penahan dari sebuah generator listrik. Karena satu titik rotasi, perangkat ini dapat bekerja pada aliran ke segala arah, dan dapat menghindari kelebihan beban dalam kondisi ekstrim.

d. Sistem kanal



Gambar 2 Skematik PLTGL sistem kanal (*Twidell & Weir, 2006*)

Peralatan ini biasa juga disebut sebagai *tapered channel* atau kanal meruncing atau dapat juga disebut sistem *tapchan*, sistem ini dipasang pada sebuah struktur kanal yang dibangun di pantai untuk mengkonsentrasikan gelombang dan membawanya ke dalam kolam penampung yang ditinggikan. Air yang mengalir keluar dari kolam penampung ini yang akan digunakan untuk membangkitkan listrik dengan menggunakan teknologi standar *hydropower* (prinsip dasar PLTA) dengan menyalurkan gelombang ke dalam *reservoir* atau kolam.

e. Sistem Pelampung

Sistem pelampung adalah sistem yang akan membangkitkan listrik dari hasil gerakan vertikal dan rotasional pelampung. Alat ini dapat ditambatkan pada sebuah rakit yang mengambang atau alat yang tertambat di dasar laut yang dapat menggerakkan pompa hidrolis.

f. *Ocean Thermal Energy*

Cara lain untuk membangkitkan listrik dari energi yang ada di laut adalah dengan memanfaatkan perbedaan suhu di permukaan dan dasar laut. Jika kita berenang dan menyelam di laut kita akan merasakan bahwa semakin kita menyelam suhu laut akan semakin rendah (dingin).

Suhu yang lebih tinggi pada permukaan laut disebabkan sinar matahari memanasi permukaan laut. Tetapi, di bawah permukaan laut, suhu sangat dingin. Itulah sebabnya penyelam menggunakan baju khusus ketika mereka menyelam. Baju tersebut akan menjaga agar suhu tubuh mereka tetap hangat.

Pembangkit listrik energi panas air laut bisa dibangun dengan memanfaatkan perbedaan suhu untuk menghasilkan energi. Perbedaan suhu untuk menghasilkan energi. Perbedaan suhu yang diperlukan sekurang-kurangnya 38°F antara suhu permukaan dan suhu bawah laut untuk keperluan ini. Cara ini dinamakan *Ocean Thermal Energy Conversion* atau OTEC. Berdasarkan siklus yang digunakan, OTEC dapat dibedakan menjadi tiga macam :

1. Siklus tertutup

Pada alat OTEC dengan siklus tertutup, air laut permukaan yang hangat dimasukkan ke dalam alat penukar panas untuk menguapkan fluida yang mudah menguap misalnya seperti amonia. Uap amonia akan memutar turbin yang menggerakkan generator . uap amonia keluaran turbin selanjutnya dikondensasi dengan air laut yang lebih dingin dan dikembalikan untuk diuapkan kembali.

2. Siklus terbuka

Pada siklus terbuka, air laut pada permukaan yang hangat langsung diuapkan pada ruang khusus bertekanan rendah. Uap yang dihasilkan

digunakan sebagai fluida penggerak turbin bertekanan rendah. fluida uap keluaran turbin selanjutnya dikondensasi dengan air laut yang lebih dingin dan sebagai hasilnya diporeleh air desalinasi.

3. Siklus gabungan

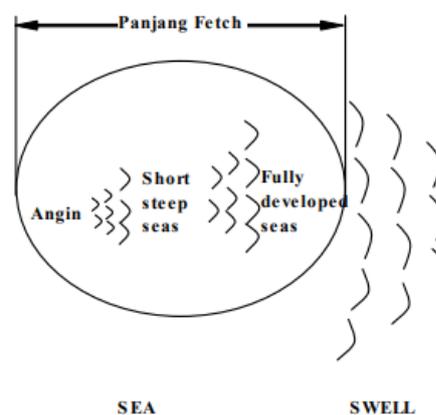
Pada siklus gabungan, air laut yang hangat masuk ke dalam ruang vakum untuk diuapkan dalam sekejap (*flash-evaporated*) menjadi uap (seperti siklus terbuka). Fluida uap tersebut kemudian menguapkan fluida kerja yang memutar turbin (seperti siklus tertutup). Selanjutnya fluida kembali dikondensasi menjadi air desalinasi.

Fluida kerja populer digunakan adalah amonia karena tersedia dalam jumlah besar, murah dan muda ditransportasikan. Namun, amonia beracun dan mudah terbakar. Senyawa seperti CFC dan HCFC juga merupakan pilihan yang baik, sayangnya menimbulkan efek penipisan lapisan ozon. Hidrokarbon juga dapat digunakan, akan tetapi menjadi tidak ekonomis karena menjadikan OTEC sulit bersaing dengan pemanfaatan hidrokarbon secara langsung. Selain itu yang juga perlu diperhatikan adalah ukuran pembangkit listrik OTEC bergantung pada tekanan uap dari fluida kerja yang digunakan. Semakin tinggi tekanan uapnya maka semakin kecil ukuran turbin dan alat penukar panas yang dibutuhkan, sementara ukuran tebal pipa dan alat penukar panas bertambah untuk menahan tingginya tekanan terutama pada bagian *evaporator*.

2.5 Pembangkitan Gelombang Angin

Angin yang berhembus di atas permukaan air yang semula tenang akan menyebabkan gangguan pada permukaan tersebut, selanjutnya timbul riak-riak gelombang kecil di atas permukaan air. Apabila kecepatan angin bertambah, riak gelombang tersebut menjadi bertambah besar dan apabila angin berhembus terus akhirnya akan terbentuk gelombang. Semakin lama dan semakin kuat angin berhembus, maka semakin besarlah gelombang yang terbentuk hingga akhirnya membentuk puncak gelombang yang curam dan selanjutnya akan terjadi fenomena gelombang pecah (*breaking wave*).

Gelombang angin dapat dibagi kedalam dua kelompok, yaitu gelombang badai (*storm waves/sea*) dan *swell*. Pembangkitannya masih dibangkitkan atau dipertahankan oleh angin, oleh karena itu keduanya dibatasi oleh *fetch* dan daerah badai (*storm zone*). Masing-masing jenis gelombang ini memiliki karakteristik yang berbeda. Angin yang berhembus di atas permukaan air akan memindahkan energinya ke air dan akan menimbulkan gelombang. Sedangkan gelombang yang menjalar keluar daerah pembangkitan merupakan gelombang bebas yang bentuknya lebih beraturan dengan panjang gelombang antara 30-500 kali tinggi gelombang, gelombang ini disebut sebagai gelombang *swell* (Pratikto, Suntoyo, Solikhin, & Sambodho, 2014).



Gambar 3 Pembentukan gelombang angin di daerah pembangkitan (Pratikto, Suntoyo, Solikhin, & Sambodho, 2014).

2.6 PLTGL *Oscillating Water Column*

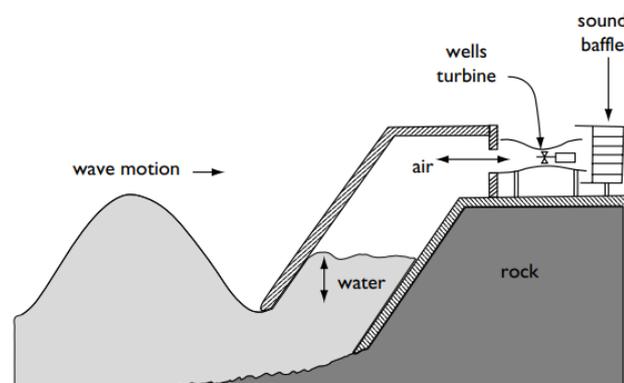
2.6.1 *Oscillating water column (OWC)*

Oscillating Water Column (OWC) adalah perangkat yang terdiri dari ruang udara dan turbin. Sebagian ruang udara terendam dan terbuka di bawah garis air sehingga gerakan naik turun permukaan laut memaksa udara yang terkandung dalam ruang melewati turbin. Karena sifat osilasi gelombang, udara didorong atau ditarik melalui turbin, menghasilkan aliran alternatif. Untuk menggunakan aliran alternatif ini, *Wells turbine* digunakan karena kapasitasnya untuk berputar terus menerus dalam satu arah terlepas dari arah aliran udara. Ini menggunakan airfoil simetris dengan bidang simetri mereka di jalur rotasi dan tegak lurus terhadap aliran

udara dan untuk alasan ini turbin bekerja dengan efisiensi yang lebih rendah sehubungan dengan turbin ‘normal’ menggunakan foil asimetris. Ruang udara OWC dapat diintegrasikan dalam pemecah gelombang di perangkat garis pantai, seperti yang ditunjukkan pada gambar, atau dapat dimasukkan dalam pelampung yang mengambang di air dangkal, seperti perangkat OSPREY.

Oscillating Water Column (OWC) adalah pembangkit listrik tenaga gelombang laut yang komponen utamanya terdiri dari ruang udara dan turbin. Sebagian ruang udara pada OWC terendam dan terbuka di bawah permukaan air laut sehingga gerakan naik turun permukaan laut memaksa udara yang ada dalam ruang udara untuk melewati turbin. Karena gelombang laut yang berosilasi, udara didorong atau ditarik melalui turbin menghasilkan aliran alternatif. Untuk menggunakan aliran alternatif ini turbin udara digunakan karena kapasitasnya untuk berputar terus-menerus dalam satu arah terlepas dari arah aliran udara.

Ketika gelombang laut melewati rongga pada OWC, yang membuat sebagian ruangan udara terendam air dan membuat air berosilasi naik turun di dalam ruang udara yang terhubung dengan turbin udara. Gerakan osilasi ini menyebabkan turbin udara berputar dan menghasilkan energi listrik.



Gambar 4 Skematik diagram PLTGL-OWC (*Twidell & Weir, 2006*)

Keuntungan menggunakan OWC sebagai alat untuk konversi energi adalah kecepatan udara meningkat dengan pengurangan halus di area penampang saluran yang mendekati turbin. Hal ini menyatukan gerakan lambat gelombang dengan rotasi turbin yang cepat tanpa roda gigi mekanis. Bentuk dan ukuran ruang udara menentukan respon frekuensi, dengan bentuk dan ukuran ruang udara dibuat dengan memperhitungkan respon terbaik gelombang dengan frekuensi tertentu.

Pada prinsipnya, efisiensi sistem akan lebih baik jika perangkat tersebut memiliki penyetelan aktif terhadap berbagai frekuensi gelombang laut yang ditemui dengan menggunakan beberapa rongga atau detektor gelombang yang masuk kemudian memberikan informasi tentang bentuk ruang udara yang akan dibuat dengan menyesuaikan kapasitas turbin yang akan dipasang (Twidell & Weir, 2006).

2.6.2 Komponen PLTGL-OWC

2.6.2.1 Turbin

Fungsi turbin pada mesin penggerak adalah mengubah tenaga mekanik menjadi energi gerak yaitu gerak rotasi. Adapun yang berperan dalam memutar turbin dapat berupa air yang dipanaskan atau uap, gas dan air berupa aliran sungai dan laut. (Rahmatullah, 2013).

Pada PLTGL sistem OWC digunakan turbin angin yang berfungsi untuk mengubah tekanan udara yang dihasilkan oleh kolektor menjadi energi gerak. Prinsip kerja turbin angin adalah mengubah energi mekanik dari tekanan udara menjadi energi gerak pada turbin kemudian putaran yang dihasilkan digunakan untuk memutar generator yang akhirnya menghasilkan energi listrik. (Mumin, 2019).

Pada OWC, posisi turbin diatur dengan kemiringan tertentu yaitu kemiringan bidang yang berlawanan agar pergerakan udara yang keluar masuk melalui kolektor bisa menghasilkan arah putaran yang sama (Ariyanto, 2018).

Turbin adalah mesin penggerak awal, yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Dimana energi fluida kerjanya dipergunakan langsung untuk memutar roda turbin. Pada turbin hanya terdapat gerak rotasi. Bagian turbin yang berputar dinamakan stator atau rumah turbin. Roda turbin terletak dalam rumah turbin dan roda turbin memutar poros daya yang menggerakkan atau memutar beban seperti generator listrik. Di dalam turbin terdapat fluida kerja yang mengalami proses ekspansi, yaitu proses penurunan tekanan dan mengalir secara terus menerus. Fluida kerja dapat berupa air, uap air atau gas.

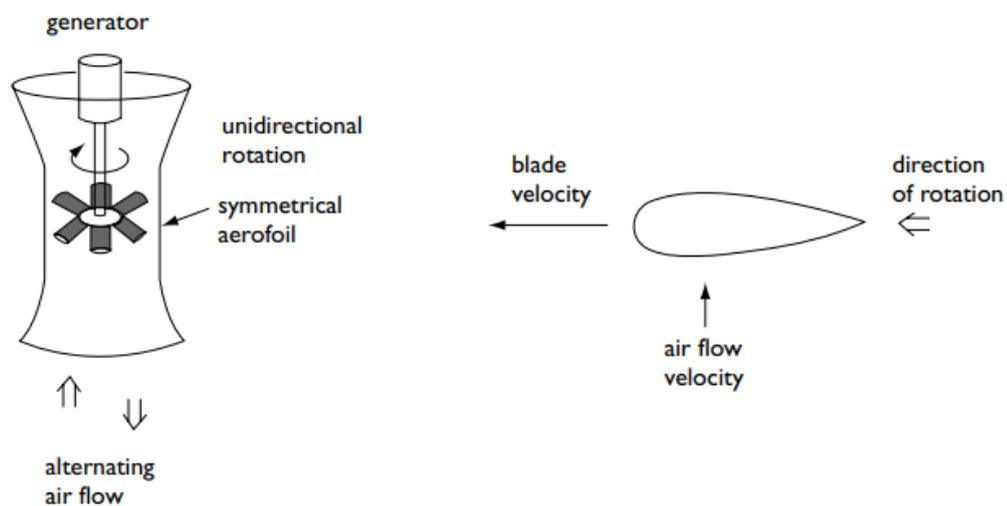
Pada roda turbin terdapat sudu, kemudian fluida akan mengalir melalui ruang diantara sudu tersebut sehingga roda turbin berputar. Ketika roda turbin

berputar maka tentu ada gaya yang bekerja pada sudu. Gaya tersebut timbul karena terjadinya perubahan momentum dari fluida kerja yang mengalir diantara sudu. Jadi sudu harus dibentuk sedemikian rupa agar terjadi perubahan momentum pada fluida kerja. Karena sudu bergerak bersamaan dengan gerak roda turbin, maka sudu tersebut dinamakan sudu gerak, sedangkan sudu yang menyatu dengan rumah turbin sehingga tidak bergerak dinamakan sudu tetap.

Sudu tetap berfungsi mengarah aliran fluida kerja masuk ke dalam sudu gerak atau juga berfungsi sebagai nosel. Pada sebuah roda turbin mungkin terdapat satu baris sudu gerak saja yang disebut turbin bertingkat tunggal, dan jika terdapat beberapa baris sudu gerak disebut turbin bertingkat ganda (Utami, 2010).

2.6.2.2 Wells turbine

sebuah roda turbin mungkin terdapat satu baris sudu gerak saja yang disebut turbin bertingkat tunggal dan jika terdapat beberapa baris sudu gerak disebut turbin bertingkat ganda (Utami, 2010).



Gambar 5 (a) Wells turbine (b) gerakan dari sudu turbin (Twidell & Weir, 2006).

2.6.2.3 Kolektor

Kolektor adalah bangunan yang memiliki fungsi untuk mengumpulkan ombak. Berdasarkan fungsinya maka bentuk dari kolektor adalah menjorok ke lautan lepas. (Mumin, 2019). Pada kolektor terdapat lubang yang menghubungkan

antara kolektor dengan turbin. Pada lubang ini terjadi gaya dan tekanan angin yang menggerakkan turbin (Ariyanto, 2018).

2.6.2.4 Generator

Generator adalah suatu peralatan yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Generator merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan bolak-balik dengan mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Energi mekanis pada generator dihasilkan dari penggerak mula (*prime mover*) yang memutar rotor pada generator, sedangkan energi listrik dihasilkan dari induksi elektromagnetik pada kumparan stator dan rotor pada generator (Siregar, 2021).

2.7 Perhitungan Energi Gelombang Laut pada PLTGL-OWC

Dalam pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem OWC, untuk menghitung besarnya potensi energi yang dapat dihasilkan dibutuhkan data ketinggian gelombang yang didapatkan dari Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika sebagai data sekunder. Dari data yang didapatkan maka periode datangnya gelombang bias diketahui dengan menggunakan rumus (Ariyanto, 2018):

$$T = 3,55 \sqrt{H} \quad (2)$$

dimana,

T = periode gelombang (s)

H = ketinggian gelombang (m)

Setelah periode datangnya gelombang diketahui maka panjang dan kecepatan gelombangnya dapat dihitung dengan persamaan :

$$\lambda = 5.12 T^2 \quad (3)$$

dimana,

λ = panjang gelombang (m)

T = periode gelombang (s)

Untuk kecepatan gelombang digunakan rumus :

$$V = \frac{\lambda}{T} \quad (4)$$

dimana,

V = Kecepatan Gelombang (m/s)

λ = panjang gelombang (m)

T = periode gelombang (s)

Untuk mendapatkan potensi energi ombak laut digunakan rumus :

$$E_p = \frac{1}{4} w \rho g a^2 \lambda \text{ (Joule)} \quad (5)$$

dimana,

E_p = energi potensial (Joule)

w = lebar kolom (m)

ρ = massa jenis air laut (Kg/m^3)

g = kecepatan gravitasi (m/s^2)

a = amplitudo (m)

λ = panjang gelombang (m)

Untuk mendapatkan energi kinetik gelombang laut digunakan rumus :

$$E_k = E_p \text{ (Joule)} \quad (6)$$

Rumus dari energi total untuk energi potensial dan energi kinetik dari gelombang laut yaitu :

$$E_w = E_k + E_p = \frac{1}{2} w \rho g a^2 \lambda \text{ (Joule)} \quad (7)$$

Untuk menghitung daya listrik yang dihasilkan dari gelombang laut digunakan rumus :

$$P_w = \frac{E_w}{T} \text{ (Watt)} \quad (8)$$

dimana,

T = periode gelombang (s)

E_w = energi gelombang laut (Kg/m^3)

P_w = Daya listrik dari energi gelombang laut (Watt)

2.7.1 Perhitungan energi gelombang yang dihasilkan turbin sumur (*wells turbine*)

Untuk membuat sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut dibutuhkan turbin untuk mengubah energi yang dihasilkan dari gelombang laut. Turbin yang digunakan pada pembangkit ini yaitu turbin sumur. Untuk membuat pemodelan turbin sumur dibutuhkan persamaan. Untuk persamaan yang pertama yaitu untuk mencari daya yang dihasilkan angin. Adapun persamaannya yaitu :

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_x^3 \quad (9)$$

dimana,

P_a = Daya angin (watt)

ρ = massa jenis udara (Kg/m^3)

A = luas area sapuan rotor (m^2)

V_x = kecepatan udara (m/s)

Selanjutnya untuk mendapatkan nilai daya mekanik turbin maka terlebih dahulu dicari nilai torsi dan kecepatan sudut dari turbin. Adapun persamaannya yaitu :

$$\tau = F \cdot R \quad (10)$$

dimana,

τ = Torsi (N.m)

$F = \text{Gaya (N)}$

$R = \text{Jari-jari (m)}$

Untuk mendapatkan nilai kecepatan sudut, adapun persamaannya yaitu :

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (11)$$

dimana,

$\Omega = \text{kecepatan sudut (rad/s)}$

$n = \text{Putaran poros (rpm)}$

Untuk mendapatkan nilai daya mekanik turbin persamaannya yaitu :

$$P_m = \tau \times \Omega \quad (12)$$

dimana,

$P_m = \text{Daya Mekanik (Watt)}$

$\tau = \text{Torsi (N.m)}$

$\Omega = \text{kecepatan sudut (rad/s)}$

2.8 Pemodelan Turbin Sumur (*Wells Turbine*)

Untuk membuat sistem pembangkit listrik tenaga gelombang laut dibutuhkan turbin untuk mengubah energi yang dihasilkan dari gelombang laut. Turbin yang digunakan pada pembangkit ini yaitu turbin sumur. Untuk membuat pemodelan turbin sumur dibutuhkan persamaan. Untuk mencari koefisien daya digunakan rumus (Tae Valen, 2015):

$$C_a = \frac{P_m}{P_a} \quad (13)$$

dimana,

$C_a = \text{Koefisien daya}$

$P_m = \text{Daya Mekanik (Watt)}$

P_a = Daya Angin (Watt)

Setelah nilai koefisien daya didapatkan, maka nilai tekanan jatuh pada rotor dapat dihitung menggunakan persamaan (Farez M'Zoughi, 2020) :

$$d_p = C_a \cdot K \cdot \left(\frac{1}{a_t}\right) \cdot [V_x^2 + (r \cdot \omega_r)^2] \quad (14)$$

dimana,

d_p = Tekanan jatuh pada rotor (Pa)

C_a = Koefisien daya

K = Konstanta turbin

a_t = Area saluran turbin (m²)

V_x = Kecepatan udara (m/s)

r = Jari-jari turbin (m)

ω_r = Kecepatan sudut turbin (rad/s)

Untuk nilai koefisien torka dihitung menggunakan rumus (Kaprawi, 2020):

$$C_t = \frac{C_a}{\lambda} \quad (15)$$

dimana,

C_t = Koefisien torka

C_a = Koefisien daya

λ = panjang gelombang (m)

Setelah nilai koefisien torka didapatkan, maka nilai torka turbin dapat dihitung menggunakan rumus (Farez M'Zoughi, 2020) :

$$T_t = C_t \cdot K \cdot r \cdot [V_x^2 + (r \cdot \omega_r)^2] \quad (16)$$

dimana,

T_t = Torka turbin (N.m)

C_t = Koefisien torka

K = Konstanta turbin

V_x = Kecepatan Udara (m/s)

ω_r = Kecepatan sudut turbin (rad/s)

r = Jari-jari turbin (m)

Selain rumus di atas, torka turbin dapat juga dihitung menggunakan rumus (Farez M'Zoughi, 2020):

$$T_t = \frac{dp \cdot C_t \cdot r \cdot a_t}{C_a} \quad (17)$$

dimana,

T_t = Torka turbin (N.m)

C_t = Koefisien turbin

C_a = Koefisien daya

a_t = area saluran turbin (m²)

r = Jari-jari turbin (m)

d_p = Tekanan jatuh pada rotor (Pa)

Untuk menghitung konstanta turbin dapat dihitung menggunakan rumus (Farez M'Zoughi, 2020) :

$$K = \frac{\rho \cdot b \cdot l \cdot n}{2} \quad (18)$$

dimana,

K = Konstanta turbin

ρ = Kerapatan udara (Kg/m³)

b = tinggi sudu turbin (m)

l = panjang chamber (m)

n = jumlah bilah/sudu turbin

Untuk menghitung persentase kesalahan dari antara hasil simulasi dan hasil perhitungan digunakan rumus (Tiara Hasan, 2020) :

$$\text{Persentase Kesalahan} = \left| \frac{\text{data hasil perhitungan} - \text{data hasil simulasi}}{\text{data hasil perhitungan}} \right| \times 100\% \quad (19)$$

2.9 Software HOMER

HOMER singkatan dari *the Hybrid Optimisation of Multiple Energy Resources* yang merupakan salah satu aplikasi yang digunakan untuk mensimulasikan dan mengoptimalkan sistem pembangkit listrik baik yang *stand-alone* (Tiara Hasan, 2020) maupun *grid-connected* yang terdiri dari *photovoltaic*, mikrohidro, turbin angin, biomassa, baterai yang melayani beban listrik (Kunaifi, 2010).

Proses simulasi pada HOMER dilakukan untuk mengetahui karakteristik atau performansi dari suatu sistem pembangkit. Proses Optimisasi dilakukan untuk memilah konfigurasi suatu pembangkit yang layak dan memiliki nilai ekonomis. Fitur analisa sensitivitas memungkinkan dilakukannya suatu studi terhadap gejala yang muncul pada suatu variabel optimisasi (Budiman, Supardi, & Rohman, 2012).

HOMER mensimulasikan operasi sistem dengan menyediakan perhitungan energy balance untuk setiap 8.760 jam dalam setahun. Jika sistem mengandung baterai dan generator diesel/bensin, HOMER juga dapat memutuskan untuk setiap jam, apakah generator diesel/bensin beroperasi dan apakah baterai diisi atau dikosongkan. Selanjutnya HOMER menentukan konfigurasi terbaik sistem dan kemudian memperkirakan biaya instalasi dan operasi sistem selama masa operasinya (life time costs) seperti biaya awal, biaya penggantian komponen-komponen, biaya O&M, biaya bahan bakar dan lain-lain. Saat melakukan simulasi, HOMER menentukan semua konfigurasi sistem yang mungkin, kemudian ditampilkan berurutan menurut *net present costs-NPC*.