

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teknik konversi Energi Kelautan Menjadi Energi Listrik

Salah satu potensi laut dan samudra yang belum banyak diketahui masyarakat umum adalah potensi energi laut dan samudra untuk menghasilkan listrik. Negara yang melakukan penelitian dan pengembangan potensi energi samudra untuk menghasilkan listrik adalah Inggris, Prancis dan Jepang.

Secara umum, potensi energi samudra yang dapat menghasilkan listrik dapat dibagi kedalam 3 jenis potensi energi yaitu energi pasang surut (*tidal power*), energi gelombang laut (*wave energy*) dan energi panas laut (*ocean thermal energy*). Energi pasang surut adalah energi yang dihasilkan dari pergerakan air laut akibat perbedaan pasang surut. Energi gelombang laut adalah energi yang dihasilkan dari pergerakan gelombang laut menuju daratan dan sebaliknya. Sedangkan energi panas laut memanfaatkan perbedaan temperatur air laut di permukaan dan di kedalaman. Meskipun pemanfaatan energi jenis ini di Indonesia masih memerlukan berbagai penelitian mendalam, tetapi secara sederhana dapat dilihat bahwa probabilitas menemukan dan memanfaatkan potensi energi gelombang laut dan energi panas laut lebih besar dari energi pasang surut.

Pada dasarnya pergerakan laut yang menghasilkan gelombang laut terjadi akibat dorongan pergerakan angin. Angin timbul akibat perbedaan tekanan pada 2 titik yang diakibatkan oleh respons pemanasan udara oleh matahari yang berbeda di kedua titik tersebut. Mengingat sifat tersebut maka energi gelombang laut dapat dikategorikan sebagai energi terbarukan.

Gelombang laut secara ideal dapat dipandang berbentuk gelombang yang memiliki ketinggian puncak maksimum dan lembah minimum. Pada selang waktu tertentu, ketinggian puncak yang dicapai serangkaian gelombang laut berbeda-beda, bahkan ketinggian puncak ini berbeda-beda untuk lokasi yang sama jika diukur pada hari yang berbeda. Meskipun demikian secara statistik dapat ditentukan ketinggian signifikan gelombang laut pada satu titik lokasi tertentu.

Keuntungan penggunaan energi arus laut adalah selain ramah lingkungan, energi ini juga mempunyai intensitas energi kinetik yang besar dibandingkan dengan energi terbarukan yang lain. Hal ini disebabkan densitas air laut 830 kali lipat dari densitas udara sehingga dengan kapasitas yang sama, turbin arus laut akan jauh lebih kecil dibandingkan dengan turbin angin. Keuntungan lainnya adalah tidak perlu perancangan struktur yang kekuatannya berlebihan seperti turbin angin yang dirancang dengan memperhitungkan adanya angin topan karena kondisi fisik pada kedalaman tertentu cenderung tenang dan dapat diperkirakan.

Kekurangan dari energi arus laut adalah output-nya mengikuti grafik sinusoidal sesuai dengan respons pasang surut akibat gerakan interaksi Bumi-Bulan-Matahari. Pada saat pasang purnama, kecepatan arus akan deras sekali, saat pasang perbani, kecepatan arus akan berkurang kira-kira setengah dari pasang purnama. Kekurangan lainnya adalah biaya instalasi dan pemeliharaannya yang cukup besar. Kendati begitu bila turbin arus laut dirancang dengan kondisi pasang perbani, yakni saat di mana kecepatan arus paling kecil, dan dirancang untuk bekerja secara terus-menerus tanpa reparasi selama lima tahun, maka kekurangan ini dapat diminimalkan dan keuntungan ekonomisnya sangat besar. Hal yang terakhir ini merupakan tantangan teknis tersendiri untuk para insinyur dalam desain sistem turbin, sistem roda gigi, dan sistem generator yang dapat bekerja secara terus-menerus selama lebih kurang lima tahun. (<http://www.energi.lipi.go.id/utama.cgi?cetakartikel&1125749769>)

Pada dasarnya prinsip kerja teknologi yang mengkonversi energi gelombang laut menjadi energi listrik adalah mengakumulasi energi gelombang laut untuk memutar turbin generator. Karena itu sangat penting memilih lokasi yang secara topografi memungkinkan akumulasi energi. Meskipun penelitian untuk mendapatkan teknologi yang optimal dalam mengkonversi energi gelombang laut masih terus dilakukan.

Ada tiga cara membangkitkan listrik dengan tenaga ombak : (Siti Rahma Utami, 2010 : 6)

a. Energi Gelombang

Energi kinetik yang terkandung pada gelombang laut di gunakan untuk menggerakkan turbin. Ombak naik ke dalam ruang generator, lalu air yang naik menekan udara keluar dari ruang generator dan menyebabkan turbin berputar ketika air turun, udara bertiup dari luar ke dalam ruang generator dan memutar turbin kembali.

b. Pasang Surut Air Laut

Bentuk lain dari pemanfaatan energi laut dinamakan energi pasang surut. Ketika pasang datang ke pantai, air pasang di tampung di dalam reservoir. Kemudian ketika air surut, air di belakang reservoir dapat dialirkan seperti pada PLTA biasa. Agar bekerja optimal, kita membutuhkan gelombang pasang yang besar. Dibutuhkan perbedaan kira-kira 16 kaki antara gelombang pasang dan gelombang surut. Hanya ada beberapa tempat yang memiliki kriteria ini. Beberapa pembangkit listrik telah beroperasi menggunakan sistem ini. Sebuah pembangkit di Prancis sudah beroperasi dan mencukupi kebutuhan listrik untuk 240.000 rumah.

c. Pemanfaatan Perbedaan Temperatur Air Laut

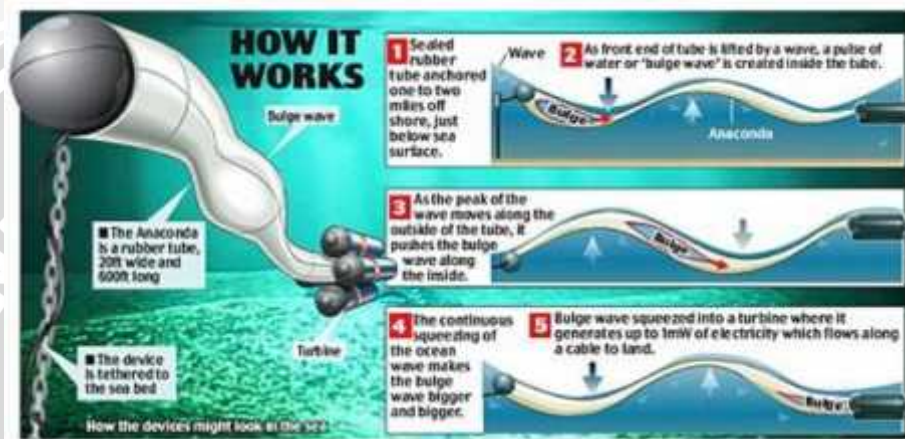
Cara lain untuk membangkitkan listrik dengan ombak adalah dengan memanfaatkan perbedaan suhu di laut. Jika kita berenang dan menyelam di laut kita akan merasakan bahwa semakin kita menyelam suhu laut akan semakin rendah (dingin). Suhu yang lebih tinggi pada permukaan laut di sebabkan sinar matahari memanasi permukaan laut. Tetapi, di bawah permukaan laut, suhu sangat dingin.

Pembangkit listrik bisa di bangun dengan memanfaatkan perbedaan suhu untuk menghasilkan energi. Perbedaan suhu yang di perlukan sekurang-kurangnya 38⁰ fahrenheit antara suhu permukaan dan suhu bawah laut untuk keperluan ini. Cara ini dinamakan *Ocean Thermal Energy Conversion* atau OTEC. Cara ini telah digunakan di Jepang dan Hawaii dalam beberapa proyek percobaan.

Ada bermacam-macam metode yang dapat di gunakan untuk pemanfaatan gelombang laut sebagai penghasil energi listrik, diantaranya adalah : (Ahmad Hasnan, 2010 : 2)

a) *Anaconda Bulge Wave Sistem*

Ombak laut yang naik turun dimanfaatkan untuk menggerakkan air didalam tabung besar dan panjang, tabung fleksibel tersebut berukuran 6-15m dengan panjang sampai dengan 150m. Adapun prinsip kerja dari *Anaconda Bulge Wave Sistem* terlihat pada Gambar 2.1 .



Gambar 2.1 Prinsip Kerja Anaconda Bulge Wave System
 Sumber : Ahmad Hasnan, 2010 :2

Dari Gambar 2.1 terlihat air yang masuk dari ujung dengan katup searah ditambah pergerakan ombak yang naik turun menyebabkan tabung tersebut terisi air terus menerus dan menekan kearah belakang, seperti gerak peristaltik pada usus di perut, bagian belakang terdapat sistem hidrolik yang terhubung dengan motor listrik, sistem ini dipengaruhi oleh tinggi ombak, kecepatan ombak, dan ukuran dari bulge.

Adapun kelebihan dan kekurangan dari PLTO tipe *Anaconda Bulge Wave Sistem* adalah sebagai berikut : (Simon Copar, 2009:8)

Kelebihan

- Biaya investasi dan perawatan rendah.
- Sistem instalasi yang mudah.
- Mempunyai resiko kerusakan yang rendah.

Kekurangan

- Daya listrik yang dihasilkan tidak teratur.

b) *Oyster Hydraulic Piston System*

Model dan prinsip kerja dari *Oyster Hydraulic Piston System* terlihat pada Gambar 2.2 .



Gambar 2.2 *Oyster Wave Energy Converter*

Sumber : Ahmad Hasnan, 2010 : 3

Dari Gambar 2.2 Teknologi hydraulic yang dihubungkan dengan piston mengubah energi ombak untuk menggerakkan piston lalu mengangkat air dalam saluran tekanan tinggi dan disalurkan ke hydroelectric generator. Salah satu sistem yang terkenal saat ini adalah oyster buatan dari aquamarine power.ltd, didunia ini potensi penggunaan hydraulic piston mencapai 60 GW.

Adapun kelebihan dan kekurangan dari PLTO tipe *Oyster Hydraulic Piston System* adalah sebagai berikut : (Lihui Guo, 2010:28)

Kelebihan :

- Bagian ereksi yang besar pada *Oyster* menjadikannya sistem sangat bagus dalam kemampuan menangkap ombak.
- *Oyster* mempunyai struktur yang kuat terhadap kondisi iklim dan cuaca yang buruk.
- *Oyster* menggunakan turbin hidrolik dan generator yang efisien dalam pembangkitan daya.

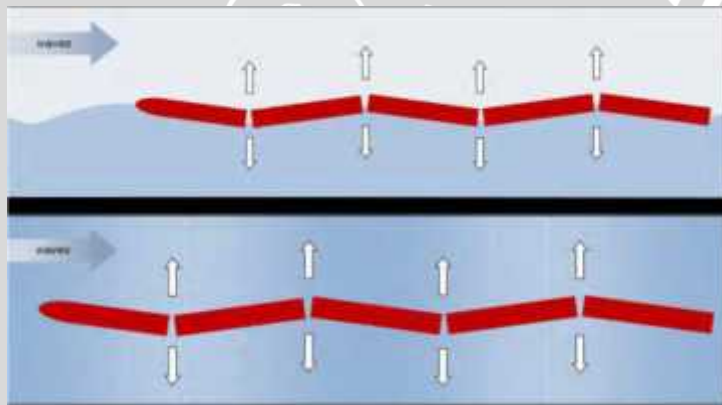
Kekurangan :

- *Oyster* hanya bisa di tempatkan pada kedalaman laut 10 meter – 16 meter dimana daerah itu merupakan perairan laut dangkal yang memiliki daya ombak yang rendah.
- Kapasitas pembangkitan daya untuk tiap konverter *Oyster* relatif kecil.

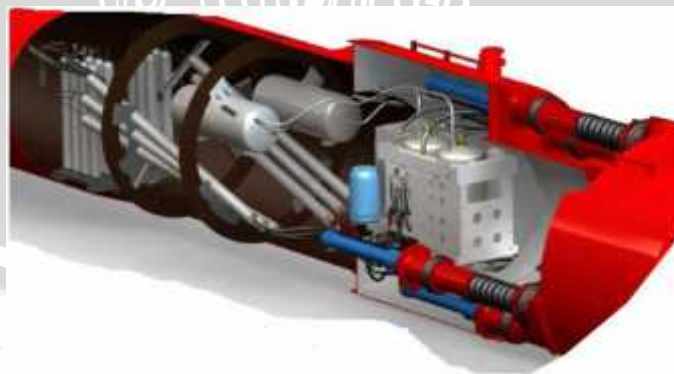
c) *Attenuator Pelamis System*

Attenuator terdiri dari banyak bagian yang mengambang secara paralel terhadap arah gelombang, energi didapatkan dari pergerakan setiap bagian karena antar bagian bergerak saling menekuk mendorong hydraulic ram yang berada di tabung untuk menggerakkan generator listrik. Salah satu yang terkenal adalah pelamis, pelamis dapat bergerak naik turun maupun berbelok ke kanan dan ke kiri, sebuah pelamis pada umumnya terdiri dari minimal 3 bagian dengan panjang setiap bagian 50 m dan diameter tabung 3 m. Hasil penelitian menunjukkan pelamis dengan panjang 180 m dan diameter 4 m dapat menghasilkan energi listrik sebesar 750 kW dengan kedalaman air laut 50 m.

Prinsip kerja dari *Attenuator Pelamis System* terlihat pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4 .



Gambar 2.3 Pelamis Attenuator Tampak Atas dan Samping
Sumber : Ahmad Hasnan, 2010 : 3



Gambar 2.4 Posisi Hydraulic Ram, Generator, dan Spring
Sumber : Ahmad Hasnan, 2010 : 3

Dari Gambar 2.3 dan 2.4 Ketika ombak mengarah ke badan Pelamis, ombak akan menyebabkan terjadinya pembengkokkan pada

sendi-sendi Pelamis. Gerakan pembengkokkan tersebut dimanfaatkan dengan mengubahnya menjadi energi listrik dengan bantuan hidrolik sistem *take-off* yang memanjang dan memendek seiring dengan tarikan dan tekanan yang berasal dari gerakan naik-turun ombak. Listrik kemudian didistribusikan melalui kabel bawah tanah.

Adapun kelebihan dan kekurangan dari PLTO tipe *Attenuator Pelamis System* adalah sebagai berikut : (Lihui Guo, 2010:25)

Kelebihan :

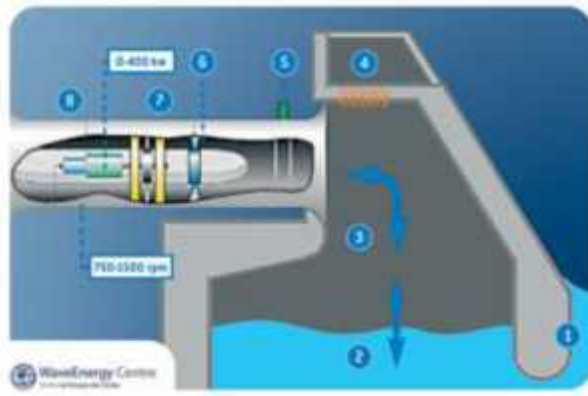
- Pelamis konverter terdiri dari beberapa bagian silinder yang mempunyai kemampuan menangkap ombak yang baik.
- Sistem pembangkitan daya pada pelamis menggunakan sistem hidrolik yang mempunyai pengembangan dan efisiensi yang tinggi.
- Konverter pelamis mempunyai struktur yang kuat dan dapat bertahan pada kondisi iklim yang buruk serta mempunyai jangka waktu pemakaian yang lama.
- Pelamis beroperasi pada kedalaman 50m hingga 70m, sehingga sangat fleksibel untuk memilih lokasi penempatan sistem.
- Biaya modal untuk Pelamis sangat rendah, sehingga sangat cocok untuk investasi komersial.
- Pelamis bekerja sangat efisien pada daerah yang mempunyai densitas daya gelombang yang tinggi.

Kekurangan :

- Pelamis beroperasi di daerah lepas pantai sejauh 5 sampai 10 km dari pantai, sehingga memerlukan kabel transmisi listrik yang panjang untuk menghubungkan ke jaringan listrik.
- Pelamis adalah mesin yang besar sehingga menyulitkan pada saat transportasi ke darat pada saat perawatan.

d) *Oscillating Water Column*

Energi ombak pada PLTO tipe OWC (*Oscillating Water Column*) terbentuk melalui efek osilasi tekanan udara pada kolam akibat fluktuasi pergerakan gelombang yang masuk ke dalam chamber. Tekanan udara tersebut digunakan untuk menggerakkan turbin angin, prinsip kerjanya dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Oscillating Water Column System

Sumber : Ahmad Hasnan, 2010 : 4

Dari Gambar 2.5 dapat diamati pergerakan ombak(1) akan masuk kedalam kolom(2) lalu udara tertekan didalam kolom(3) setelah melewati katub(5) angin yang terkompresi menggerakkan turbin angin(7) yang terhubung dengan generator, yang mengkonversikan gerakan turbin menjadi listrik(8). Di Indonesia OWC sudah dibangun didaerah Gunung kidul,JawaTengah. Sedangkan tipe modelnya dapat dilihat di technopark parang racuk Yogyakarta. Dikembangkan oleh BPPT, teknologi ini dinamakan PLTO (pembangkit listrik tenaga ombak) beroperasi dikedalaman 4-10, dengan rpm maksimal 300rpm. Listrik yang dihasilkan mencapai 3400 kW. OWC yang sering digunakan terdapat dua tipe yaitu tipe fixed dan floating.

Adapun kelebihan dan kekurangan dari PLTO tipe *Oscillating Water Column* adalah sebagai berikut : (Lihui Guo, 2010:19)

Kelebihan :

- Teknologi OWC telah dikembangkan selama lebih dari tiga puluh tahun sehingga OWC sangat fleksibel untuk semua karakteristik laut dan dapat beroperasi sangat efisien pada daerah dengan densitas daya gelombang yang rendah. Maka dari itu OWC menjadi teknologi pemanfaatan gelombang laut yang paling populer.
- Turbin angin pada sistem OWC adalah turbin yang berputar searah yang sangat cocok untuk aerodinamis.

- Sebagian besar sistem OWC terletak di daratan sehingga sangat fleksibel untuk menghubungkan daya listrik yang dihasilkan ke dalam jaringan listrik.
- Sebagian besar sistem OWC terbuat dari baja dan beton, sehingga memiliki kerangka yang sangat stabil dan memiliki umur pemakaian yang lama.
- Seluruh Sistem kontrol pada OWC di kendalikan oleh remote komputer.
- Perawatan dan operasi sistem OWC membutuhkan biaya yang rendah.

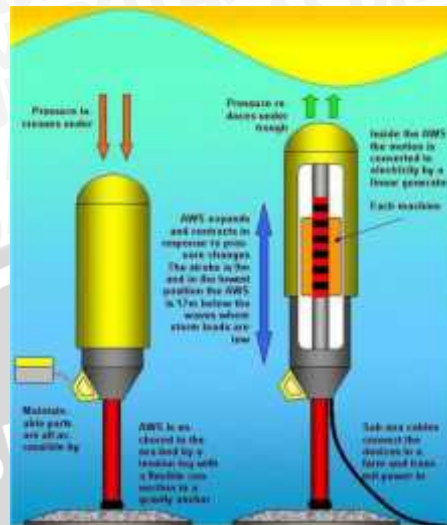
Kekurangan :

- Konversi energi sistem OWC memiliki total efisiensi yang sangat rendah terutama turbin angin dan generator, hal ini disebabkan proses konversi yang kompleks dan efisiensi turbin angin yang rendah
- Selama pembangunan sistem OWC terdapat banyak permasalahan, kondisi iklim yang buruk akan merusak struktur bangunan dan meningkatkan biaya modal investasi.
- Kebanyakan sistem OWC dipasang di pantai yang merupakan wilayah perairan dangkal, hal ini menyebabkan kerapatan daya gelombang laut menjadi rendah.
- Biaya modal untuk sistem OWC yang terlalu tinggi menyebabkan sistem OWC kurang sesuai jika digunakan untuk pembangkit listrik komersial.

e) *Archimedes Wave Swing System*

AWS (*Archimedes Wave Swing System*) menggunakan prinsip archimedes bahwa benda dalam air dapat dibagi menjadi tiga, melayang, mengapung dan tenggelam. Memanfaatkan pergerakan naik turun karena perbedaan ketinggian ombak dikonversikan menjadi gerakan vertikal, didalam tabung terdapat stator dan rotor, stator terikat di dasar laut, sehingga posisinya tidak berubah, namun rotor terikat pada tabung yang dapat bergerak secara naik turun mengikuti irama ombak dengan bebas.

Prinsip kerja dari *Archimedes Wave Swing System* terlihat pada Gambar 2.6 .



Gambar 2.6 Prinsip Kerja *Archimedes Wave Swing System*

Sumber : Ahmad Hasnan, 2010 : 4

Keunggulan pada AWS adalah tidak dibutuhkan tempat yang luas untuk mengekstraksi energi ombak, di Eropa dan USA sedang di uji coba untuk digunakan secara luas, walaupun sampai saat ini biaya yang digunakan untuk memproduksi AWS tergolong lebih mahal dibandingkan sistem pembangkit listrik energi gelombang yang lain.

Adapun kelebihan dan kekurangan dari PLTO tipe *Archimedes Wave Swing System* adalah sebagai berikut : (Jawad Faiz et.all, 2011:427)

Kelebihan :

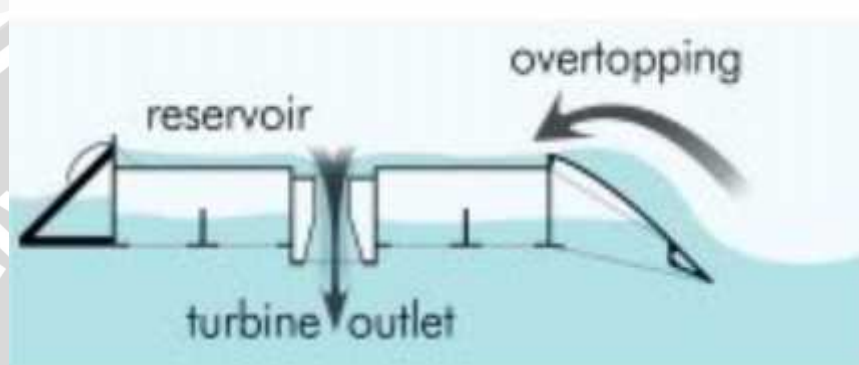
- AWS (*Archimedes Wave Swing*) terletak di dasar laut sehingga tahan terhadap kondisi badai.
- AWS tidak membutuhkan perawatan yang banyak sehingga dapat meminimalisir biaya operasional.

Kekurangan :

- AWS membutuhkan lokasi yang memiliki periode ombak yang panjang dan amplitudo ombak yang tinggi.
- AWS membutuhkan sistem hidrolik dan generator dengan efisiensi yang tinggi sehingga hal ini menyebabkan nilai investasi semakin besar.
- AWS membutuhkan biaya investasi yang tinggi.

f) *Wave Dragon*

Prinsip kerja *wave dragon* adalah mengumpulkan ombak di laut lepas ditampung dalam sebuah kolam, lalu dibagian tengah kolam dipasang *low head water turbine*, air yang masuk dalam kolam diarahkan ke tengah lalu memutar turbin air tersebut (gambar 2.8). Tes pertama kali dilakukan di Nissum Bredning, Denmark pada tahun 2009. Wave dragon berkapasitas 7MW sudah berhasil dipasang. Prinsip kerja dari *Wave Dragon* di tunjukkan pada Gambar 2.7 .



Gambar 2.7 Prinsip Kerja *Wave Dragon*

Sumber : Ahmad Hasnan, 2010 : 4

Adapun kelebihan dan kekurangan dari PLTO tipe *Wave dragon* adalah sebagai berikut : (Lihui Guo, 2010:34)

Kelebihan :

- Wave dragon mempunyai fleksibilitas yang tinggi terhadap berbagai macam karakteristik laut.
- Wave dragon mempunyai efisiensi yang tinggi terhadap gelombang di laut dangkal.

Kekurangan :

- Teknologi wave dragon termasuk dalam teknologi baru yang masih dalam tahap pengujian dalam skala kecil.

2.2 Gelombang laut

Gelombang yang terjadi di laut sebenarnya dapat dibedakan menjadi beberapa jenis atau tipe gelombang. Perbedaan jenis atau tipe gelombang ini berdasarkan gaya yang membangkitkannya. Gelombang yang terjadinya karena dibangkitkan oleh angin disebut dengan gelombang angin. Angin yang bertiup dipermukaan laut selama waktu tertentu, baik angin yang bertiup ke arah darat

maupun angin yang bertiup ke arah laut akan menimbulkan gelombang. Gelombang angin ini termasuk jenis gelombang pendek, karena besarnya periode gelombang ini adalah mulai beberapa detik sampai dengan beberapa menit. Gelombang pasang surut atau sering disebut juga dengan gelombang pasut, merupakan gelombang yang terjadinya disebabkan oleh gaya tarik-menarik benda-benda langit, terutama matahari dan bulan. Gelombang ini termasuk jenis gelombang panjang, karena periode gelombangnya adalah dari beberapa jam sampai dengan beberapa tahun. Gelombang tsunami adalah gelombang yang terjadinya karena adanya pergerakan massa air laut, yang dapat disebabkan oleh letusan gunung berapi atau gempa yang terjadi di laut. (Ahmad Zakaria, 2009-1)

Gelombang sebenarnya yang terjadi di alam adalah sangat kompleks dan tidak dapat dirumuskan dengan akurat. Akan tetapi dalam mempelajari fenomena gelombang yang terjadi di alam dilakukan beberapa asumsi sehingga muncul beberapa teori gelombang. Akan tetapi dalam penelitian ini hanya akan dibahas mengenai teori gelombang amplitudo kecil. Teori gelombang ini merupakan teori gelombang yang paling sederhana karena merupakan teori gelombang linier, yang pertama kali diperkenalkan oleh Airy pada tahun 1845.

Sebelum menurunkan persamaan gelombang, maka perlu diketahui asumsi-asumsi yang diberikan untuk menurunkan persamaan gelombang. Asumsi-asumsi ini diberikan agar penurunan teori gelombang amplitudo kecil dapat dilakukan. Berikut adalah asumsi-asumsi tersebut : (Ahmad Zakaria, 2009-3)

1. Air laut adalah homogen, sehingga rapat massanya adalah konstan.
2. Air laut tidak mampu mampat.
3. Tegangan permukaan yang terjadi diabaikan.
4. Gaya Coriolis diabaikan.
5. Tegangan pada permukaan adalah konstan.
6. Zat cair adalah ideal dan berlaku aliran tak berotasi.
7. Dasar laut adalah horizontal, tetap dan impermeable.
8. Gerak gelombang tegak lurus terhadap arah penjarannya.

2.2.1. Energi Ombak

Ombak yang besar mengandung banyak energi per meter daripada ombak yang kecil. Yang perlu di ketahui pertama adalah kandungan energi ombak yang tersedia. Energi total dari sebuah gelombang merupakan hasil penjumlahan energi potensial dan energi kinetik yang terdapat pada gelombang itu.

Energi potensial adalah energi yang di timbulkan oleh massa air diantara palung dan puncak terhadap MWL (*mean water level*) sehingga persamaan untuk P.E adalah : (Istikomah, 2005-22)

$$EP = mg \frac{y(x,t)^2}{2} \quad (2-2)$$

Dengan :

$$m = wpy \quad (2-3)$$

- m : massa ombak (kg)
- g : gravitasi bumi (9,81)
- w : lebar ombak (m) ; di asumsikan sama dengan lebar ombak yang masuk ke dalam pembangkit
- y : $y(x,t) = a \sin kx - \omega t$
- berat jenis air (kg/m^3)
- persamaan ombak (diasumsikan sinusoidal)
- a : amplitudo ombak = H/2
- k : $2\pi/\lambda$
- frekuensi sudut = $2\pi/T$ (rad/s)
- panjang ombak (m)
- h : tinggi ombak
- T : periode ombak

Energi potensial dapat dituliskan sebagai berikut :

$$EP = wpg \frac{y^2}{2} = wpg \frac{a^2}{2} \sin^2 kx - \omega t \quad (2-4)$$

Jika kita ingin menghitung energi potensial ombak lebih dari satu periode, diasumsikan ombak adalah hanya fungsi dari x dan waktu independen, maka $y(x,t) = y(x)$:

$$dEP = 0,5wpga^2 \sin^2 kx - \omega t \quad (2-5)$$

$$\begin{aligned}
 EP &= \int_0^{\lambda} dEP \\
 &= \int_0^{\lambda} \frac{1}{2} \rho g a^2 \sin^2 kx - \omega t \\
 &= \frac{1}{2} \rho g a^2 \int_0^{\lambda} \sin^2 kx - \omega t \, dx
 \end{aligned}$$

Mengingat bahwa $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ dan $\omega = \frac{2\pi}{T}$ didapatkan

$$EP = \frac{1}{4} \rho g a^2 \lambda \quad (J) \quad (2-6)$$

Energi kinetik adalah energi yang timbul akibat adanya kecepatan partikel air yang bergerak bersamaan dengan gerak ombak. Rumus umum dari energi kinetik suatu massa adalah : (Istikomah, 2005-23)

$$EK = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2-7)$$

Sedangkan energi ombak pada lebih dari satu periode adalah sebagai berikut:

$$EK = \frac{1}{4} \rho g a^2 \lambda \quad (J) \quad (2-8)$$

Maka didapatkan total energi ombak dalam satu periode :

$$\begin{aligned}
 E_w &= EK + EP \\
 &= \frac{1}{2} \rho g a^2 \lambda \quad (J)
 \end{aligned}
 \quad (2-9)$$

Untuk menghitung daya ombak yang masuk ke dalam pembangkit dengan persamaan (Istikomah, 2005-23) :

$$P_w = \frac{E_w}{T} = \frac{1}{2T} \rho g a^2 \lambda \quad (W) \quad (2-10)$$

Dengan :

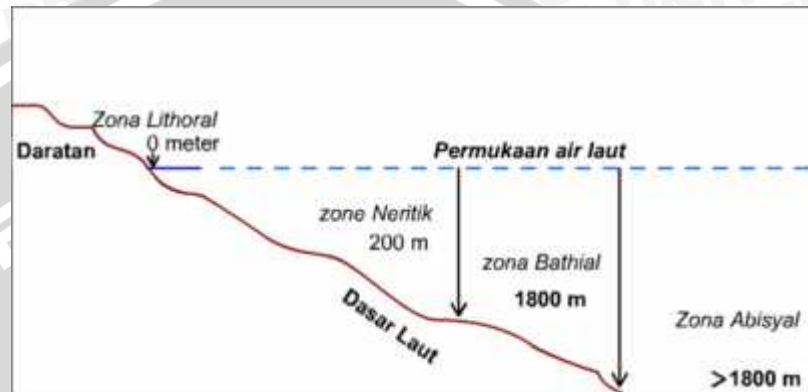
- w : lebar ombak (m)
- ρ : berat jenis air (1030 kg/m³)
- g : gravitasi bumi (9,81 m/s²)
- a : amplitudo gelombang (H/2)
- H : Tinggi gelombang (m)
- T : periode gelombang (s)

Pada persamaan diatas, lebar ombak sama dengan lebar kolom kolektor pada PLTO. dapat terlihat dengan tinggi ombak (H) dan periode (T) yang sama namun dimensi pembangkit yang berbeda akan



mengakibatkan turunnya daya ombak yang terdapat didalam kolom pembangkit. Turunnya daya ombak diakibatkan semakin kecilnya lebar dari pembangkit. Lebar pembangkit dalam hal ini sebagai kolektor ombak laut.semakin sempit kolektor maka ombak yang ditangkap oleh pembangkit juga semakin kecil

Berdasarkan kedalamannya, laut dapat dibedakan menjadi beberapa zona seperti terlihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8. Zona Laut Berdasarkan Kedalamannya

Sumber : www.idkf.bogor.net

a. Zona litoral

Zona litoral atau zona pesisir adalah wilayah laut antara garis batas air pasang naik dengan garis batas air pasang surut. Wilayah ini tergenang pada saat pasang naik sedangkan pada saat surut wilayah ini tidak tergenang air laut.

b. Zona neritik

Zona neritik atau zona laut dangkal adalah wilayah laut yang dangkal antara batas pasang surut sampai kedalaman 200 meter.

c. Zona bathial

Zona bathial atau zona laut dalam adalah wilayah laut yang dalam dengan kedalaman antara 200 meter hingga 1800 meter.

d. Zona abisyal

Zona abisyal atau zona laut sangat dalam adalah wilayah laut dengan kedalaman lebih dari 1800 meter.

Pada penelitian ini, lokasi yang direncanakan untuk penempatan PLTO adalah pada bagian selatan pulau sempu yang berhadapan langsung dengan samudera hindia. Berdasarkan kedalamannya daerah lokasi tersebut termasuk zona laut dangkal atau zona neritik karena

berada dekat dengan garis pantai dan lokasi tersebut selalu tergenang air laut pada saat air laut pasang ataupun surut.

Berdasarkan kedalaman relatif (h/λ) dimana (h) adalah kedalaman laut dan (λ) adalah panjang gelombang, gelombang dapat diklasifikasikan menjadi 3 tipe gelombang :

1. Gelombang di laut dangkal jika : $h/\lambda < 1/20$
2. Gelombang di laut transisi jika : $1/20 < h/\lambda < 1/2$
3. Gelombang di laut dalam jika : $h/\lambda > 1/2$

Pada penelitian ini, tipe gelombang yang terdapat pada lokasi penempatan PLTO adalah tipe gelombang di laut dangkal, hal ini dikarenakan PLTO tipe OWC terletak di garis pantai yang merupakan perairan laut dangkal, Jika persamaan untuk cepat rambat gelombang adalah : (Ahmad Zakaria, 2009-20)

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (2.11)$$

Dan persamaan untuk panjang gelombang adalah $\lambda = CT = \frac{gT^2}{2\pi}$ sehingga persamaan cepat rambat gelombang adalah :

$$C = \frac{gT}{2\pi} \quad (2.12)$$

Dengan :

g : gravitasi bumi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

T : periode gelombang (s)

h : kedalaman laut (m)

λ : panjang gelombang (m)

Berdasarkan tipe gelombang, jika kedalaman relatif h/λ adalah lebih kecil dari atau sama dengan $\frac{1}{20}$, maka nilai $\tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)$ lebih mendekati nilai $\frac{2\pi h}{\lambda}$, maka Persamaan 2.11 dapat ditulis menjadi :

$$C = \frac{gT}{2\pi} \left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (2.13)$$

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (2.14)$$

Persamaan 2.13 merupakan persamaan cepat rambat gelombang di laut dangkal dan Persamaan 2.14 merupakan persamaan panjang gelombang di laut dangkal.

2.2.2. Data Ombak

Pada penelitian ini data ombak yang digunakan adalah data ketinggian ombak pada bagian selatan Pulau Sempu Kabupaten Malang, data ombak tersebut mencakup data ketinggian ombak dan juga periode ombak. Adapun sumber data tersebut adalah dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Stasiun Meteorologi Maritim Perak Surabaya. Data ombak yang digunakan adalah data ombak yang terjadi pada bulan Januari 2013 sampai bulan Desember 2013. Pada Tabel 2.1 berikut memperlihatkan data ketinggian dan periode ombak yang akan digunakan pada penelitian ini :

Tabel 2.1. Data Ketinggian Ombak Pulau Sempu Periode Januari 2013 - Desember 2013

Bulan	Tinggi Maksimum (m)	Periode (s)	Tinggi Minimum (m)	Periode (s)
Januari	5,1	4,7	0,9	4,8
Februari	3,4	4,6	0,7	4,7
Maret	2,7	4,9	0,1	4,8
April	1,7	4,5	0,6	5,3
Mei	1,6	5,5	0,5	5,3
Juni	1,6	5,5	0,9	5,3
Juli	2,8	5,7	1,0	5,6
Agustus	2,2	6,0	1,0	6,3
September	2,1	5,4	0,4	5,6
Oktober	1,9	4,7	0,3	4,7
November	1,3	4,7	0,5	4,8
Desember	3,1	4,6	1,1	4,6

Sumber : BMKG Stasiun Meteorologi Maritim Perak Surabaya

2.3 PLTO Type Oscillating Water Column

Dari beberapa jenis WEC (Wave Energi Converter) tipe Oscillating Water Column adalah tipe WEC yang paling populer. PLTO tipe Oscillating water column mempunyai beberapa kelebihan dibandingkan dengan teknologi PLTO tipe lainnya. Berikut adalah beberapa kelebihan PLTO tipe OWC :

1. PLTO tipe OWC dapat di tempatkan di daratan yang berada di tepi laut sehingga mempunyai aksesibilitas yang mudah.
2. PLTO tipe OWC membutuhkan biaya perawatan yang relatif rendah jika dibandingkan dengan PLTO tipe lainnya, PLTO tipe OWC khususnya OWC-shoreline mempunyai tingkat korosif yang lebih rendah.
3. kemudahan dalam distribusi daya listrik yang dibangkitkan oleh PLTO tipe OWC karena tidak memerlukan jaringan kabel transmisi di bawah laut, hal tersebut dapat memperkecil biaya investasi dalam pembangunan PLTO tipe OWC.

Oscillating Water Column memanfaatkan energi ombak yang masuk kedalam kolom PLTO. Ombak tersebut akan mengisi kolom yang telah dibuat sehingga dengan ketinggian ombak tersebut akan menekan udara yang ada di dalam kolom sehingga udara yang tertekan tersebut akan berhembus keluar PLTO melalui turbin angin.

Sistem pembangkit listrik tersebut terdiri dari air collector chamber berisi udara yang berfungsi untuk menggerakkan turbin, kolom tempat air bergerak naik dan turun melalui saluran yang berada di bawah ponton dan turbin yang terhubung dengan generator. Gerakan air naik dan turun yang seiring dengan gelombang laut menyebabkan udara mengalir melalui saluran menuju turbin. Turbin tersebut didesain untuk bisa bekerja dengan generator putaran dua arah. Sistem yang berfungsi mengkonversi energi mekanik menjadi listrik terletak di atas permukaan laut dan terisolasi dari air laut dengan meletakkannya di dalam ruang khusus kedap air, sehingga bisa dipastikan tidak bersentuhan dengan air laut.

Dari segi penempatan, PLTO tipe *Oscillating water column* (PLTO-OWC) dapat dibedakan menjadi 2 yaitu PLTO-OWC *Nearshore* dan PLTO-OWC *Shoreline*. PLTO-OWC *Nearshore* adalah PLTO yang terletak di tepian laut dan berjarak tidak jauh dari daratan, sedangkan PLTO-OWC *Shoreline* adalah PLTO yang terletak di daratan yang berhadapan langsung dengan laut.

Secara teoritis efisiensi yang dihasilkan pembangkit listrik energi gelombang tipe OWC ini adalah berkisar 70-80%. Namun pada saat pemasangan efisiensi tersebut tidak sesuai dengan teori karena terpengaruh pada kecepatan aliran udara yang berada dalam chamber dan pengaruh dari kondisi gelombang. (www.carbontrust.co.uk/nr/owc1.pdf)

2.4 Komponen Dasar PLTO type *Oscillating Water Column* (OWC)

2.4.1. Kolektor

Kolektor adalah bangunan yang berfungsi untuk mengumpulkan ombak sebanyak-banyaknya, kemudian memfokuskan pada konverter. Berdasarkan fungsinya maka bentuk dari kolektor adalah menjorok ke lautan lepas seperti terlihat pada Gambar 2.9 .

Dalam mendesain kolektor OWC ada beberapa hal yang harus di perhatikan:

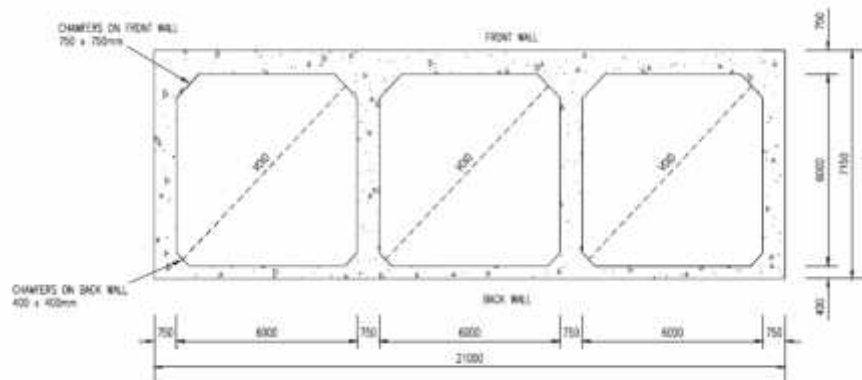
- Kapasitas target pembangkitan
- Aksesibilitas situs
- Pemilihan bahan konstruksi
- Ide-ide teknik perancangan
- Penerapan desain ke situs



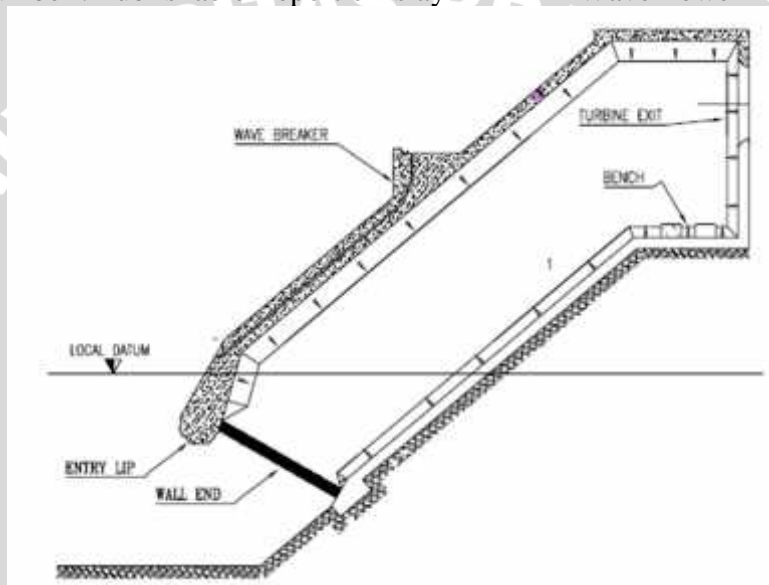
Gambar 2.9. Kolektor LIMPET Tampak Depan

Sumber : Publishable Report of Islay LIMPET Wave Power Plant

Kolektor berisi udara yang berfungsi untuk menggerakkan turbin yang telah di kopel dengan generator. Pergerakan air dari ombak menyebabkan gerakan naik dan turun sehingga udara di dalam kolektor mengalir ke turbin melalui oriface atau saluran udara yang terhubung dengan turbin udara. Pergerakan naik dan turun menghasilkan tekanan udara sehingga turbin angin dapat berputar. Pergerakan udara didalam kolektor adalah tiup dan hisap sehingga dibutuhkan baling-baling unidirectional sehingga dengan aliran udara tiup dan hisap baling-baling tersebut mempunyai putaran searah.



Gambar 2.10. Kolektor Tampak Atas
 Sumber : Publishable Report of Islay LIMPET Wave Power Plant



Gambar 2.11 . Kolektor Tampak Samping
 Sumber : Publishable Report of Islay LIMPET Wave Power Plant

Dari Gambar 2.10 dan 2.11 terlihat dimensi dari PLTO Limpet dengan lebar kolom 6x6 meter dengan ketebalan dinding 750 mm pada bagian depan dan 400 mm pada bagian belakang. Tabel 2.2 berikut adalah referensi ukuran kolektor PLTO Limpet-Irlandia :

Tabel 2.2 Referensi Tinggi Kolektor

Section	Dimension (m)
Collector Roof	12.50
Turbine Axis	9.84
Top of Turbine Slab	8.30
Bench Level Inside Collector	4.94
Top of Wave Breaker on Front Wall	8.30
Start of 60 ⁰ Slope on Front wall	2.40
Mean High Water Spring Tides	0.76
Local Datum	0.00
Mean Low Water Spring Tides	-1.34
Underside of Entry Lip	-2.63
Bottom of Diaphragm Walls	-4.52
Sea Bed under Lip	-7.00

Sumber : Publishable Report of Islay LIMPET Wave Power Plant

Dari data yang diperoleh yaitu ketinggian ombak, periode ombak dan lebar kolom kolektor dapat di hitung besarnya daya ombak yang masuk ke dalam pembangkit yaitu dengan menggunakan persamaan (Istikomah, 2005:23) :

$$P_w = \frac{1}{2T} w \rho g a^2 (W) \tag{2-15}$$

dengan :

- w : lebar ombak (m)
- ρ : berat jenis air (1030 kg/m³)
- g : gravitasi bumi (9,81 m/s²)
- a : amplitudo gelombang (H/2)
- H : Tinggi gelombang (m)
- T : periode gelombang (s)

Dari Persamaan 2.15 dapat terlihat dengan tinggi ombak (H) dan periode (T) yang sama namun dimensi pembangkit yang semakin kecil akan mengakibatkan turunnya daya ombak yang terdapat didalam kolom pembangkit. Turunnya daya ombak diakibatkan semakin kecilnya lebar dari pembangkit. Lebar pembangkit dalam hal ini sebagai kolektor ombak laut. Semakin sempit kolektor maka ombak yang ditangkap oleh pembangkit juga semakin kecil.

2.4.2. Turbin Angin

Turbin angin pada OWC berfungsi merubah tekanan udara yang dihasilkan oleh kolektor menjadi energi gerak. Prinsip kerja dari turbin angin adalah mengubah energi mekanis dari tekanan udara menjadi energi putar pada turbin, lalu putaran turbin digunakan untuk memutar generator yang telah dikopel untuk menghasilkan energi listrik. Umumnya daya efektif yang dapat dihasilkan oleh turbin angin hanya sebesar 30%-40%.

Turbin angin bersifat searah atau unidirectional sehingga tekanan udara tiup dan hisap yang dihasilkan kolektor menyebabkan turbin angin tetap berputar searah. Turbin angin yang umum digunakan dalam sistem OWC adalah turbin Wells yang dirancang oleh Professor Alan Wells dari Queens University.

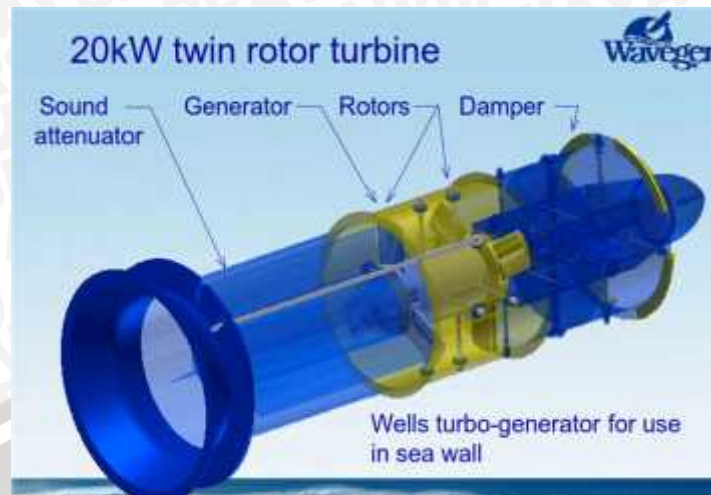
Parameter turbin angin yang digunakan adalah :

Tabel 2.3 Parameter Turbin Angin

Turbine Diameter	2.6 m
Nominal Operating Speed	1050 rpm
Number of Turbines	2
Arrangement	In Line Contra-rotating
Blade Form	NACA0012
Number of Blades	7
Blade Chord	320mm
Hub to Tip Ratio	0.62

Sumber : Publishable Report of Islay LIMPET Wave Power Plant

Gambar 2.12 dan Gambar 2.13 memperlihatkan gambar rangkaian turbin angin.



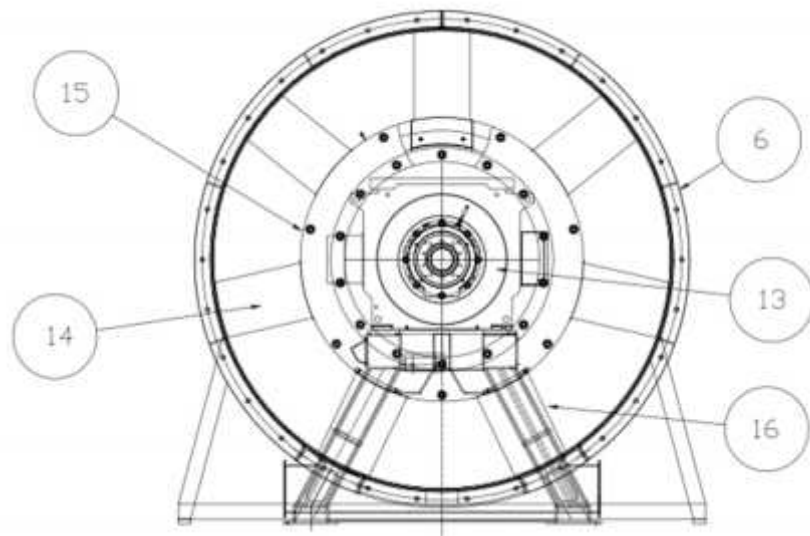
Gambar 2.12. Rangkaian Pada Turbin Angin
 Sumber : Graeme Mackie, 2004



Gambar 2.13. Turbin Angin dan Generator Sebelum Terhubung
 Dengan Kolektor
 Sumber : Graeme Mackie, 2004

Turbin wells diletakkan pada *Duct* dengan diameter 2,6m dengan panjang 1342mm, pada tiap ujung *Duct* terdapat *Butterfly valve* yang berfungsi sebagai katup, fungsi utama dari katup ini adalah untuk mengatur besarnya udara yang masuk ke dalam *Duct* yang mempengaruhi putaran turbin angin. Selain itu fungsi dari katup ini adalah untuk mengisolasi turbin angin dari kolektor pada saat perbaikan ataupun kondisi darurat.

Gambar 2.14 memperlihatkan gambar rangkaian turbin dan generator tampak depan pada *Duct* kolektor.



Gambar 2.14 Turbin dan Generator Tampak Depan
 Sumber : Publishable Report of Islay LIMPET Wave Power Plant

Dari Gambar 2.14 terlihat bahwa generator dan turbin angin terhubung pada *Duct* menggunakan frame penyangga, frame penyangga tersebut diletakkan pada dinding beton PLTO yang terhubung dengan kolom kolektor.

Untuk menghitung daya yang dihasilkan turbin angin pada pembangkit membutuhkan nilai gaya pada oriface kolektor serta torsi dari turbin. Nilai gaya dan tekanan angin pada oriface didapatkan dari hasil uji coba model menggunakan software CFD. Setelah didapatkan nilai tekanan angin yang dihasilkan kolektor, maka dilakukan perhitungan untuk mencari gaya angin tersebut dengan persamaan : (<http://id.wikipedia.org/wiki/Tekanan>)

$$\text{Gaya (N)} = \text{Tekanan (Pa)} \times \text{luas penampang turbin (m}^2\text{)} \quad (2-16)$$

Dimana luas penampang turbin sesuai dengan spesifikasi turbin yang digunakan adalah sebesar 5,3 m². Untuk menghitung torsi turbin digunakan rumusan : (Istikomah, 2005:24)

$$Q = F \times l \quad (2-17)$$

dengan :

- Q : torsi turbin (Nm)
- F : Gaya pada orifice (N)
- l : jari-jari turbin (m)

Setelah diketahui besarnya torsi yang dihasilkan turbin, kita dapat menghitung besarnya daya yang dihasilkan turbin sesuai dengan persamaan 2-18 (Arseto, 2009:24) :

$$P_t = \omega Q = 2\pi n Q \quad (2-18)$$

dengan :

P_t : daya yang dihasilkan turbin (W)

Q : torsi turbin (Nm)

n : putaran turbin (rpm)

2.4.3. Generator

Konversi energi elektro magnetik yaitu perubahan energi dari bentuk mekanik kebentuk listrik dan bentuk listrik kebentuk mekanik.

Generator sinkron (alternator) merupakan jenis mesin listrik yang berfungsi untuk menghasilkan tegangan bolak – balik dengan cara mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Energi mekanis diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula (*primemover*), sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya

Generator sinkron dengan definisi sinkronnya, mempunyai makna bahwa frekuensi listrik yang dihasilkannya sinkron dengan putaran mekanis generator tersebut. Rotor generator sinkron yang diputar dengan penggerak mula (prime mover) yang terdiri dari belitan medan dengan suplai arus searah akan menghasilkan medan magnet putar dengan kecepatan dan arah putar yang sama dengan putaran rotor tersebut. Hubungan antara medan magnet pada mesin dengan frekuensi listrik pada stator ditunjukkan pada Persamaan 2.20. (Eugene C Lister, 1988: 220)

$$f = \frac{n_s p}{120} \quad (2-19)$$

dengan :

f : Frekuensi listrik (Hz)

n_s : Kecepatan putar medan magnet (rpm)

p : Jumlah kutub

Generator sinkron sering kita jumpai pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik (dengan kapasitas yang relatif besar). Misalnya, pada PLTA, PLTU, PLTD dan lain-lain. Selain generator dengan kapasitas besar, kita mengenal juga generator dengan kapasitas yang relatif kecil, misalnya generator yang digunakan untuk penerangan darurat yang sering disebut Generator Set atau generator cadangan.

2.4.3.1. Komponen Generator Sinkron

Generator sinkron mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik bolak-balik secara elektromagnetik. Energi mekanik berasal dari penggerak mula yang memutar rotor, sedangkan energi listrik dihasilkan dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan-kumparan stator.

Secara umum generator sinkron terdiri atas stator, rotor, dan celah udara. Stator merupakan bagian dari generator sinkron yang diam sedangkan rotor adalah bagian yang berputar dimana diletakkan kumparan medan yang disuplai oleh arus searah dari Eksiter. Celah udara adalah ruang antara stator dan rotor.

2.4.3.2. Prinsip Kerja Generator Sinkron

Adapun prinsip kerja dari generator sinkron secara umum adalah sebagai berikut :

1. Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi tertentuyang akan mensuplai arus searah terhadap kumparan medan. Dengan adanya arus searah yang mengalir melalui kumparan medan maka akan menimbulkan fluks yang besarnya terhadap waktu adalah tetap.
2. Penggerak mula (PrimeMover) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya.
3. Perputaran rotor tersebut sekaligus akan memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Medan putar yang dihasilkan pada rotor, akan diinduksikan pada kumparan jangkar sehingga pada kumparan jangkar yang terletak di stator akan dihasilkan fluks magnetik yang berubah-ubah besarnya terhadap

waktu. Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut. Untuk generator sinkron tiga fasa digunakan tiga kumparan jangkar yang ditempatkan di stator yang disusun dalam bentuk tertentu, sehingga susunan kumparan jangkar yang sedemikian akan membangkitkan tegangan induksi pada ketiga kumparan jangkar yang besarnya sama tapi berbeda fasa 120° satu sama lain.

2.5 Perkiraan Potensi Daya Listrik Yang Dibangkitkan

Untuk menentukan besarnya potensi daya listrik yang dapat di bangkitkan oleh PLTO tipe OWC di Pulau Sempu adalah dengan mengetahui daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin sebagai penggerak rotor generator. Daya mekanik yang dihasilkan turbin angin digunakan sebagai dasar acuan pemilihan generator. Setelah didapatkan spesifikasi dan efisiensi generator, maka dilakukan perhitungan daya listrik yang dapat dibangkitkan oleh PLTO dengan persamaan (2-20).

$$P_g = P_t \times \eta_{\text{generator}} \quad (2-20)$$

dengan :

P_g : daya listrik yang dibangkitkan generator (W)

P_t : daya mekanik yang dihasilkan turbin angin (W)

$\eta_{\text{generator}}$: efisiensi generator