

PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT MENGGUNAKAN TEKNOLOGI OSCILATING WATER COLUMN DI PERAIRAN BALI

I Wayan Arta Wijaya

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

Kampus Bukit Jimbaran, Bali, 80361

Email: artawijaya@ee.unud.ac.id

Abstrak

Untuk di Bali saat ini, telah berdiri beberapa jenis pembangkit listrik. Pembangkit-pembangkit itu adalah pembangkit listrik tenaga diesel, pembangkit listrik tenaga uap, dan pembangkit listrik tenaga gas. Dari semua jenis pembangkit yang telah ada, keseluruhannya tergantung dari pemakaian bahan bakar yang berasal dari pembakaran fosil yang berumur jutaan tahun yaitu batu bara dan minyak bumi. Keseluruhan pembangkit-pembangkit yang sudah ada ini, tentu saja menimbulkan beberapa permasalahan baik itu terhadap lingkungan, kesehatan dan ekonomi. Untuk mengantisipasi hal tersebut maka dilakukan suatu upaya dengan penyediaan energi listrik berbahan bakar alternatif yang sifatnya non konvensional yakni pembangkit listrik tenaga gelombang laut. Pembangkit listrik tenaga gelombang laut ini menggunakan teknologi *oscilating water column* (PLTGL-OWC). Energi gelombang merupakan energi yang sifatnya dapat diperbaharui dan ramah lingkungan, serta selalu tersedia sepanjang waktu.

Dalam penelitian ini dianalisis mengenai besarnya energi yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan teknologi *oscilating water column* (OWC) di perairan Samudra Hindia, tepatnya di laut yang ada di kawasan Jimbaran. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui besarnya energi yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan teknologi *oscilating water column* (OWC) di laut yang ada di kawasan Jimbaran. Manfaat penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan untuk perencanaan pembangunan suatu pembangkit listrik tenaga gelombang laut di laut yang ada di kawasan Jimbaran, sehingga diharapkan nantinya mampu membangkitkan daya listrik guna melayani konsumen yang ada di pulau Bali. Metode yang digunakan adalah dengan menganalisis besarnya energi dan daya listrik yang mampu dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC di laut yang ada di kawasan Jimbaran.

Dari hasil penelitian didapatkan bahwa dengan penggunaan pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan teknologi *oscilating water column* (PLTGL-OWC) di laut di kawasan Jimbaran dapat dihasilkan energi yang tertinggi adalah sebesar 16.478.982,17 Joule dan yang terendah adalah sebesar 92,5897 Joule. Sedangkan untuk daya listrik yang mampu dihasilkan dengan penggunaan pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan dengan teknologi *oscilating water column* (PLTGL-OWC) di lokasi tersebut yang tertinggi adalah sebesar 4.174.007,641 Watt dan yang terendah adalah sebesar 175,892 Watt.

Kata kunci: Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut, *Oscilating water column*, PLTGL-OWC

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan perkembangan peradaban manusia, tingkat kebutuhan energi manusia juga semakin meningkat. Pemenuhan energi ini sebagian besar berasal dari pembakaran bahan bakar fosil yang berumur jutaan tahun dan tidak dapat diperbaharui dan sebagian kecil saja yang berasal dari penggunaan sumber energi lain yang lebih terbarukan. Melihat topografi pulau Bali yang dikelilingi oleh laut, jenis pembangkit listrik tenaga gelombang laut sangat cocok dibangun di Bali. Jenis pembangkit listrik tenaga gelombang laut ini selain ramah lingkungan, dalam pembangunan dan pengoperasiannya tidak akan merusak ekosistem alam di Bali, sehingga Bali akan tetap menjadi daerah tujuan wisata yang terkenal dengan keindahan alamnya. Saat ini telah banyak jenis teknologi yang dikembangkan pada pembangkit listrik tenaga gelombang laut, diantaranya: teknologi *buoy tipe*, teknologi *overtopping devices*, dan teknologi *Oscilating water*

column. Untuk di Bali sendiri, teknologi yang cocok dikembangkan adalah pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan teknologi *oscilating water column* (PLTGL-OWC). Hal ini dikarenakan teknologi *oscilating water column* (OWC) sangat cocok dibangun di daerah dengan topografi dasar laut yang landai dan memiliki ketinggian gelombang laut yang konstan, serta tidak memerlukan daerah konstruksi yang luas. Salah satu lokasi di Bali yang potensial untuk didirikan pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan teknologi *oscilating water column* ini adalah di laut yang ada di kawasan Jimbaran. Hal ini dikarenakan, laut yang ada kawasan Jimbaran berhadapan langsung dengan laut lepas (Samudra Hindia) sehingga ketinggian gelombang lautnya cukup besar dan konstan.

Berdasarkan masalah tersebut diatas, maka perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai potensi penggunaan pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan teknologi *oscilating water column* (PLTGL-OWC) yang berlokasi di laut yang ada di

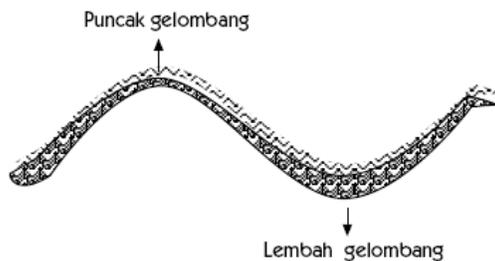
kawasan Jimbaran. Dari uraian di atas, dapat dirumuskan beberapa masalah yang perlu diteliti lebih lanjut, adalah berapakah besar energi dan daya listrik yang mampu dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan teknologi *oscillating water column* (OWC) di laut yang ada di kawasan Jimbaran? Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui besarnya energi yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan teknologi *oscillating water column* (OWC) di laut yang ada di kawasan Jimbaran. Manfaat penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan untuk perencanaan pembangunan suatu pembangkit listrik tenaga gelombang laut di laut yang ada di kawasan Jimbaran, sehingga diharapkan nantinya mampu membangkitkan daya listrik guna melayani konsumen yang ada di pulau Bali

2. GELOMBANG LAUT

Gelombang laut merupakan energi dalam transisi, merupakan energi yang terbawa oleh sifat aslinya. Prinsip dasar terjadinya gelombang laut adalah sebagai berikut (waldopo,2008):

" Jika ada dua massa benda yang berbeda kerapatannya (densitasnya) bergesekan satu sama lain, maka pada bidang gerakanya akan terbentuk gelombang. "

Gelombang merupakan gerakan naik turunnya air laut. Hal ini seperti ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Gambar pergerakan air laut.
(Sumber: Waldopo ,2008)

Gelombang permukaan merupakan gambaran yang sederhana untuk menunjukkan bentuk dari suatu energi lautan. Gejala energi gelombang bersumber pada fenomena-fenomena sebagai berikut (Pudjanarsa, 2006):

- Benda (*body*) yang bergerak pada atau dekat permukaan yang menyebabkan terjadinya gelombang dengan periode kecil, energi kecil pula.
- Angin merupakan sumber penyebab utama gelombang lautan.
- Gangguan seismik yang menyebabkan terjadinya gelombang pasang atau tsunami. Contoh gangguan seismik adalah: gempa bumi, dll.

- Medan gravitasi bumi dan bulan penyebab gelombang-gelombang besar, terutama menyebabkan gelombang pasang yang tinggi.

Selanjutnya gelombang laut ditinjau dari sifat pengukurannya dibedakan menurut ketinggian serta periode alunannya. Dari kebanyakan data yang ada, tinggi gelombang lautan dapat diukur melalui alat ukur gelombang ataupun dengan cara visual dengan melakukan pengamatan langsung di lapangan.

Gelombang laut sukar dijabarkan dengan pasti, tetapi dapat diformulasikan dengan pendekatan. Berbagai macam teori pendekatan digunakan untuk memberikan informasi ilmiah tentang sifat gelombang lautan pada suatu tingkat fenomena yang aktual. Suatu teori sederhana tentang gelombang lautan dikenal sebagai teori dari Airy atau teori gelombang linier.

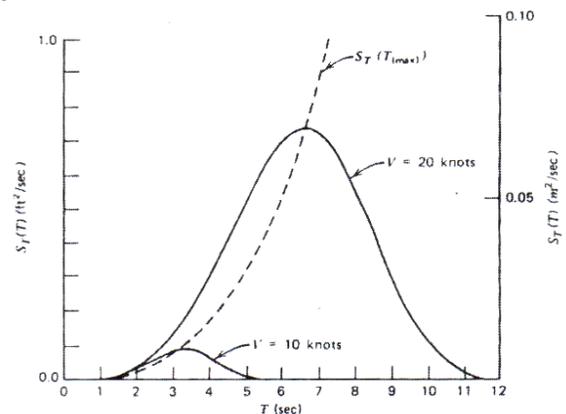
Selanjutnya para ahli membedakan sifat gelombang laut sebagai gelombang linier dan gelombang non-linier.

2.1 Pengaruh angin

Angin adalah sumber utama terjadinya gelombang lautan. Dengan demikian tinggi gelombang, periode, dan arah gelombang selalu berhubungan dengan kecepatan dan arah angin.

Angin dengan kecepatan rendah akan menyebabkan kecilnya tinggi gelombang dan rendahnya periode gelombang yang terjadi, sedangkan angin yang kuat dan angin ribut akan menyebabkan variasi tinggi serta periode gelombang serta mengarah ke berbagai penjuru. Pada kondisi angin yang baik, gelombang laut dapat diobservasi secara random, baik untuk tinggi, periode, maupun arahnya. Angin memberikan pengaruh yang besar terhadap terjadinya gelombang laut sehingga efisiensi hampir semua pesawat konversi energi gelombang laut dipengaruhi oleh frekuensi angin yang terjadi sepanjang tahun pada suatu zone lautan tertentu.

Gambar 2 menunjukkan suatu spektrum periode gelombang untuk berbagai variasi kecepatan angin.



Gambar 2. Spektrum periode gelombang untuk berbagai kecepatan angin (Pudjanarsa,2006)

2.2 Disain Pembangkit Listrik Tenaga (PLT) Gelombang Laut

2.2.1 Komponen dasar PLT gelombang laut

Konstruksi pembangkit listrik tenaga (PLT) gelombang terdiri dari mesin konversi energi gelombang, turbin, generator.

A. Mesin konversi energi gelombang laut

Energi gelombang laut dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan pesawat-pesawat yang nantinya bermanfaat demi kesejahteraan manusia. Upaya untuk memanfaatkan energi gelombang laut telah banyak dilaksanakan baik dengan konsep yang sederhana maupun yang canggih. Sejumlah percobaan telah dilaksanakan oleh para ahli di bidang gelombang laut dan telah ditemukan beberapa konsep pemanfaatannya, diantaranya (Pudjanarsa, 2006):

- a. Konsepsi yang sederhana:
 - *Heaving and pitching bodies*
 - *Cavity resonators*
 - *Pressure device*
 - *Surgin wave energy conventors*
 - *Particel motion convertors*
 - *Float wave-power machine*
 - *The dolphin type wave power generators*
- b. Konsepsi yang lebih tinggi:
 - *Salter's nodding duck*
 - *Cockerell's rafts*
 - *Russel rectifier*
 - *Wave focusing techniques*

B. Turbin

Turbin merupakan bagian penting dalam suatu pembangkit tenaga listrik. Pada pembangkit listrik tenaga gelombang laut ini jenis turbin yang digunakan ada dua jenis turbin yang banyak digunakan yaitu turbin air dan turbin udara. Dimana turbin air menggunakan media air sebagai fluida kerjanya. Sedangkan turbin udara menggunakan udara sebagai fluida kerjanya. Jenis turbin air biasanya digunakan pada pembangkit listrik tenaga gelombang laut yang menggunakan teknologi *buoy tipe* dan teknologi *overtopping devices*. Sedangkan jenis turbin udara dipakai pada pembangkit listrik tenaga gelombang laut yang menggunakan teknologi *oscilating water column*.

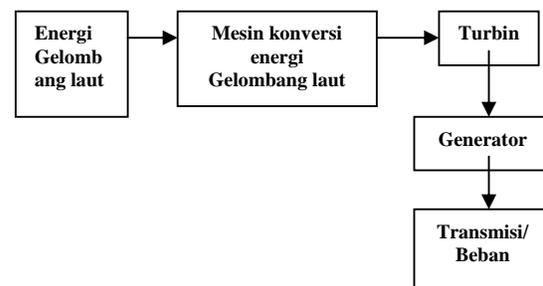
Jenis turbin udara (*wells turbine*) yang digunakan pada PLTGL-OWC ini adalah *uni-directional wells turbine*. Dimana turbin ini terdiri dari 2 jenis ukuran turbin, hal ini disesuaikan dengan prinsip kerja 2 arah pada PLTGL-OWC. Dua buah turbin ini diatur dengan kemiringan posisi bidang turbin yang berlawanan, sehingga nantinya pada pergerakan udara keluar masuk *chamber* dihasilkan arah putaran yang sama. Kemudian dari perputaran turbin inilah nantinya akan dikopel dengan generator sehingga dapat menghasilkan daya listrik.

2.2.2 Cara kerja PLT gelombang laut

Dalam sistem pembangkitan tenaga gelombang laut, ada beberapa peralatan penting yang sangat berperan mulai dari awal proses pembangkitan hingga tenaga listrik dihasilkan yang nantinya tenaga listrik tersebut akan disalurkan kepada para konsumen. Peralatan-peralatan tersebut adalah:

- a. Mesin konversi energi gelombang laut
Befungsi untuk menyalurkan energi kinetik yang dihasilkan oleh gelombang laut yang kemudian dialirkan ke turbin.
- b. Turbin
Befungsi untuk mengubah energi kinetik gelombang menjadi energi mekanik yang dihasilkan oleh perputaran rotor pada turbin.
- c. Generator
Di dalam generator ini energi mekanik dari turbin dirubah kembali menjadi energi listrik atau boleh dikatakan generator ini sebagai pembangkit tenaga listrik.

Sistem pembangkitan pada pembangkit listrik tenaga gelombang ini dapat dijelaskan melalui skema dibawah ini.



Gambar 3. Skema sistem pembangkitan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang

Pertama-tama aliran gelombang laut yang mempunyai energi kinetik masuk kedalam mesin konversi energi gelombang. Kemudian dari mesin konversi aliran gelombang yang mempunyai energi kinetik ini dialirkan menuju turbin. Di dalam turbin ini, energi kinetik yang dihasilkan gelombang digunakan untuk memutar rotor. Kemudian dari perputaran rotor inilah energi mekanik yang kemudian disalurkan menuju generator. Di dalam generator, energi mekanik ini dirubah menjadi energi listrik (daya listrik). Dari generator ini, daya listrik yang dihasilkan dialirkan lagi menuju sistem transmisi (beban) melalui kabel laut. Daya listrik yang disalurkan melalui kabel laut ini adalah daya listrik arus searah (DC).

2.3. PLTGL-OWC

OWC merupakan salah satu sistem dan peralatan yang dapat mengubah energi gelombang laut menjadi energi listrik dengan menggunakan kolom osilasi. Alat OWC ini akan menangkap energi gelombang

yang mengenai lubang pintu OWC, sehingga terjadi fluktuasi atau osilasi gerakan air dalam ruang OWC, kemudian tekanan udara ini akan menggerakkan baling-baling turbin yang dihubungkan dengan generator listrik sehingga menghasilkan listrik

2.3.1 Teknologi *oscilattng water column* (OWC)

Pada teknologi OWC ini, digunakan tekanan udara dari ruangan kedap air untuk menggerakkan *whells turbine* yang nantinya pergerakan turbin ini digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Ruangan kedap air ini dipasang tetap dengan struktur bawah terbuka ke laut. Tekanan udara pada ruangan kedap air ini disebabkan oleh pergerakan naik-turun dari permukaan gelombang air laut. Gerakan gelombang di dalam ruangan ini merupakan gerakan *compresses* dan gerakan *decompresses* yang ada di atas tingkat air di dalam ruangan. Gerakan ini mengakibatkan, dihasilkannya sebuah *alternating streaming* kecepatan tinggi dari udara. Aliran udara ini didorong melalui pipa ke turbin generator yang digunakan untuk menghasilkan listrik. Sistem OWC ini dapat ditempatkan permanen di pinggir pantai atau bisa juga ditempatkan di tengah laut. Pada sistem yang ditempatkan di tengah laut, tenaga listrik yang dihasilkan dialirkan menuju transmisi yang ada di daratan menggunakan kabel laut.

2.3.2 Kerapatan energi yang dihasilkan PLTGL OWC

Dalam menghitung besarnya energi gelombang laut dengan metode *oscilattng water column* (OWC), hal yang pertama yang harus diketahui adalah ketersediaan akan energi gelombang laut. Total energi gelombang laut dapat diketahui dengan menjumlahkan besarnya energi kinetik dan energi potensial yang dihasilkan oleh gelombang laut tersebut. Energi potensial adalah energi yang ditimbulkan oleh posisi relatif atau konfigurasi gelombang laut pada suatu sistem fisik. Bentuk energi ini memiliki potensi untuk mengubah keadaan objek-objek lain di sekitarnya, contohnya, konfigurasi atau gerakannya. Besarnya energi potensial dari gelombang laut dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (University of Michigan, 2008):

$$P.E. = mg \frac{y(x,t)}{2} \quad (J)$$

Dimana:

m = wpy : Massa Gelombang (kg)

ρ : massa jenis air laut (kg/m^3)

w : lebar gelombang (m) (diasumsikan sama dengan luas *chamber* pada OWC).

Y = y(x,t) = a sin(kx- ω t) (m) : persamaan gelombang (diasumsikan gelombang sinusoidal).

a = h/2 : amplitudo gelombang.

h = ketinggian gelombang (m)

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} : \text{konstanta gelombang}$$

λ : panjang gelombang (m)

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ (rad/sec) : frekuensi gelombang.}$$

T : periode gelombang (sec)

Maka persamaan energi potensial ini dapat ditulis sebagai berikut:

$$P.E. = w\rho g \frac{y^2}{2} = w\rho g \frac{a^2}{2} \sin^2(kx - \omega t)$$

Selanjutnya dihitung besarnya energi potensial gelombang lebih dari 1 periode, diasumsikan bahwa gelombang hanya merupakan fungsi dari x terhadap waktu, sehingga didapatkan persamaan $y(x,t) = y(x)$. Jadi didapatkan:

$$dP.E. = 0.5w\rho g a^2 \sin^2(kx - \omega t) dx$$

Berdasarkan persamaan $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ dan $\omega = \frac{2\pi}{T}$, maka

didapatkan persamaan:

$$P.E. = \frac{1}{4} w\rho g a^2 \lambda$$

Besarnya energi kinetik lebih dari 1 periode adalah sebanding dengan besarnya energi potensial yang dihasilkan.

$$K.E. = \frac{1}{4} w\rho g a^2 \lambda$$

Dimana energi kinetik adalah bagian energi yang berhubungan dengan gerakan dari gelombang laut.

Setelah besarnya energi potensial dan energi kinetik diketahui, maka dapat dihitung total energi yang dihasilkan selama lebih dari 1 periode dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$E_W = P.E. + K.E. = \frac{1}{2} w\rho g a^2 \lambda$$

Total energi yang dimaksud disini adalah jumlah besarnya energi yang dihasilkan gelombang laut yang didapatkan melalui penjumlahan energi potensial dan energi kinetik yang dimilikinya. Melalui persamaan diatas, maka dapat dihitung besarnya *energy density* (E_{WD}), daya listrik (P_w), dan *power density* (P_{WD}) yang dihasilkan gelombang laut. Untuk menentukan besarnya *energy density* (E_{WD}) yang dihasilkan gelombang laut digunakan persamaan berikut ini.

$$E_{WD} = \frac{E_W}{\lambda_W} = \frac{1}{2} \rho g a^2 \quad (\text{J/m}^2)$$

Energy density adalah besarnya kerapatan energi yang dihasilkan gelombang laut tiap 1 satuan luas permukaan. Untuk menentukan besarnya daya listrik (P_w) yang dihasilkan gelombang laut digunakan persamaan berikut ini.

$$P_w = \frac{E_w}{T} \quad (W)$$

Dimana *wave power* adalah besarnya daya listrik yang mampu dihasilkan oleh gelombang laut.

Untuk menentukan besarnya *power density* (P_{WD}) yang dihasilkan gelombang laut digunakan persamaan 2.11 berikut ini.

$$P_{WD} = \frac{P_w}{\lambda_w} = \frac{1}{2T} \rho g a^2 \quad (\text{W/m}^2)$$

3. METODE ANALISIS

Metode yang digunakan untuk analisis hasil penelitian ini adalah dengan langkah sebagai berikut:

1. Analisis pemetaan topografi perairan laut di kawasan Jimbaran.
2. Analisis besarnya energi dan yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC di lokasi yang direncanakan (laut yang ada di kawasan Jimbaran).
3. Analisis penggunaan PLTGL-OWC di lokasi yang direncanakan (laut yang ada di kawasan Jimbaran)

4. PEMBAHASAN

4.1. Gambaran Umum Pulau Bali

Provinsi Bali terdiri dari beberapa pulau, yakni Pulau Bali sebagai pulau terbesar dan pulau-pulau kecil lainnya yaitu Pulau Nusa Penida, Pulau Nusa Ceningan, Pulau Nusa Lembongan, Pulau Serangan dan Pulau menjangan. Secara geografis, Provinsi Bali terletak pada titik koordinat $8^{\circ}03'40'' - 8^{\circ}50'48''$ LS dan $114^{\circ}25'53'' - 115^{\circ}42'40''$ BT, dengan batas-batas wilayah sebagai berikut:

- Sebelah Utara adalah Laut Bali
- Sebelah Timur adalah Selat Lombok
- Sebelah Selatan adalah Samudra Hindia
- Sebelah Barat adalah Selat Bali

4.2 Lokasi Rencana Penempatan PLTGL-OWC

Lokasi rencana penempatan PLTGL-OWC adalah di laut yang ada di kawasan Jimbaran, yaitu pada kedalaman laut 50 m dan terletak $\pm 2,8$ km dari garis pantai. Sedangkan luas dari lokasi rencana penempatan PLTGL-OWC ini adalah ± 630 m² (sesuai dengan luas disain OWC)



Gambar 4. Lokasi rencana penempatan PLTGL-OWC (sumber: [Google Earth, 2008](#))

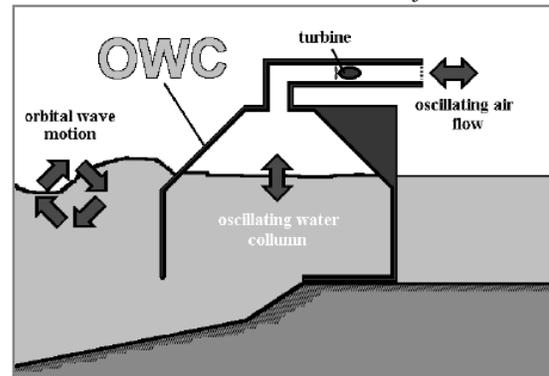
Gambar 4 menunjukkan lokasi yang direncanakan untuk penempatan PLTGL-OWC. Gambar ini diambil dari atas menggunakan google earth.

Laut di kawasan ini memiliki ketinggian gelombang laut mulai dari 0.2 m sampai 1.19 m dari permukaan air laut dengan kecepatan gelombang laut rata-rata perhari adalah sebesar 2.5 m/s. Sedangkan periode gelombang laut rata-rata perhari adalah sebesar 1.65 detik, dengan jarak gelombang pecah yaitu <20 m dari garis pantai pada saat gelombang laut pasang dan 20-50 m dari garis pantai pada saat gelombang laut surut.

Pola ketinggian gelombang laut yang terjadi di kawasan ini tergolong konstan dan cukup besar, hal ini dikarenakan laut yang ada di kawasan ini berhadapan langsung dengan laut lepas (Samudra Hindia). Oleh karena itu laut di kawasan ini sangat potensial untuk dikembangkan pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL).

4.3 Skema PLTGL-OWC

Pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan teknologi *oscilating water column* ini ditempatkan di tengah laut dan dibuat di atas sebuah ponton yang dipancangkan di dasar laut menggunakan kawat baja. Listrik yang dihasilkan dialirkan melalui kabel transmisi menuju ke daratan.



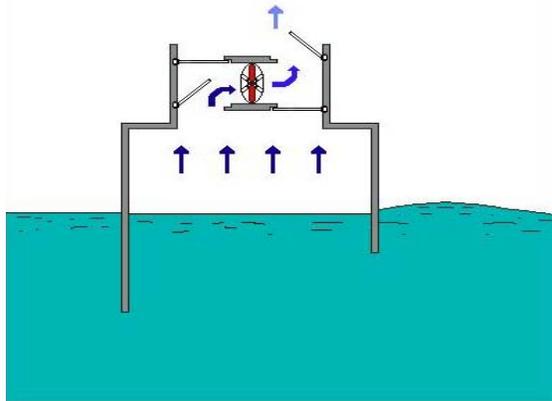
Gambar 5. Skema *oscilating water column* (Sumber: Graw, 1996)

Sistem pembangkit listrik ini terdiri dari *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.

Sistem yang berfungsi mengkonversi energi mekanik menjadi listrik (turbin, generator) diletakkan 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. Dengan sistem yang dimilikinya, pembangkit listrik ini bisa memanfaatkan efisiensi optimal dari energi gelombang dengan meminimalisir

gelombang-gelombang yang ekstrim. Efisiensi optimal bisa didapat ketika gelombang dalam kondisi normal.

Skema pergerakan gelombang laut dengan oscilating water column (OWC) terdiri dari 2 jenis aliran, yaitu aliran udara masuk dan aliran udara keluar.



Gambar 6. Skema pergerakan gelombang laut pada oscilating water column

Dari gambar 6 terlihat bahwa skema pergerakan gelombang laut dalam OWC terdiri dari 2 jenis aliran udara, yaitu:

- **Aliran udara keluar**

Pada aliran udara keluar ini, skema pergerakan gelombang laut dapat dijelaskan sebagai berikut: pertama diawali dari naiknya permukaan gelombang laut sehingga menyebabkan udara di dalam chamber bergerak naik karena ada tekanan dari gelombang laut (proses 1). Kemudian udara tersebut masuk melewati katub A menuju ke ruangan X (proses 2). Setelah itu udara ini mengalir menuju ruangan Y, dimana aliran udara ini menyebabkan turbin berputar (proses 3). Pada proses ini, energi kinetik yang dihasilkan oleh perputaran turbin dikopel dengan generator sehingga menghasilkan energi listrik. Kemudian setelah melewati turbin, udara bertekanan ini mengalir melewati katub D dan selanjutnya mengalir keluar dari OWC (proses 4).

- **Aliran udara masuk**

Pada aliran udara masuk ini, skema pergerakan gelombang laut dapat dijelaskan sebagai berikut: pertama diawali dari turunnya permukaan gelombang laut sehingga menyebabkan udara dari luar masuk melewati katub C (proses 1). Kemudian udara tersebut masuk melewati katub C menuju ke ruangan X (proses 2). Setelah itu udara bertekanan ini mengalir menuju ruangan Y, dimana aliran udara bertekanan ini menyebabkan turbin berputar (proses 3). Pada proses ini, energi kinetik yang dihasilkan oleh perputaran turbin dikopel dengan generator sehingga menghasilkan energi listrik. Kemudian setelah melewati turbin, udara bertekanan ini

mengalir melewati katub B dan selanjutnya mengalir menuju kedalam chamber diikuti dengan turunnya permukaan air laut.

4.4 Disain PLTGL-OWC

Melihat dari topografi dasar laut yang dimilikinya, serta ketinggian gelombang laut di lokasi yang direncanakan, maka disain pembangkit listrik tenaga gelombang laut yang ideal untuk digunakan digunakan di lokasi yang direncanakan adalah disain *energetech*. *Energetech* adalah salah satu disain PLTGL yang dirancang dengan menggunakan sistem *Oscilating water column* (OWC). Disain ini biasanya ditempatkan pada kedalaman laut mulai dari perairan dangkal hingga kedalaman 50 m (150 kaki). Disain *energetech* ini memiliki lebar 35 m dan panjang 18 m (EPRI,2007). Selain itu disain *energetech* ini menggunakan *parabolic focusing wall* yang lebarnya sama dengan lebar *chamber* yaitu sebesar 35 m, yang mana berfungsi untuk memfokuskan pergerakan gelombang laut menuju OWC. Dimana nantinya pada OWC, terjadi proses pengkonversian energi gelombang laut menjadi energi listrik. Disain ini dipasang dengan cara ditambatkan di dasar laut dengan menggunakan beberapa buah kaki (*piles*). Spesifikasi dari disain dapat dilihat pada tabel 1 berikut ini:

4.5. Analisis besarnya energi dan daya

Energi yang dihasilkan PLTGL-OWC ini berasal dari gerakan naik-turun gelombang laut yang terjadi. Untuk menghitung besarnya potensi energi gelombang laut pada lokasi yang direncanakan dilakukan dengan beberapa tahapan seperti berikut:

4.5.1 Perhitungan energi potensial

Untuk menghitung besarnya energi potensial yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan teknologi *oscilating water column* (OWC) digunakan persamaan 2.9. Berikut ini adalah besarnya energi potensial yang dihasilkan gelombang laut di lokasi yang direncanakan pada tanggal 1 Januari 2007.

➤ Untuk tanggal 1 Januari 2007, diketahui:

- Lebar chamber owc (w) = 35 m
- Massa jenis air laut (ρ) = 1030 kg/m³
- Besarnya gravitasi bumi (g) = 9,81 m/dt
- Ketinggian gelombang laut (H) = 1,1925 m
- Panjang gelombang (λ) = 262,1376 m

➤ Maka besarnya energi potensial yang dihasilkan gelombang dengan penggunaan PLTGL-OWC adalah sebagai berikut:

$$P.E. = \frac{1}{4} w \rho g^2 \lambda$$

$$P.E. = \frac{1}{4} \times 35 \times 1030 \times 9.81 \times (1.1925/2)^2 \times 262.1376$$

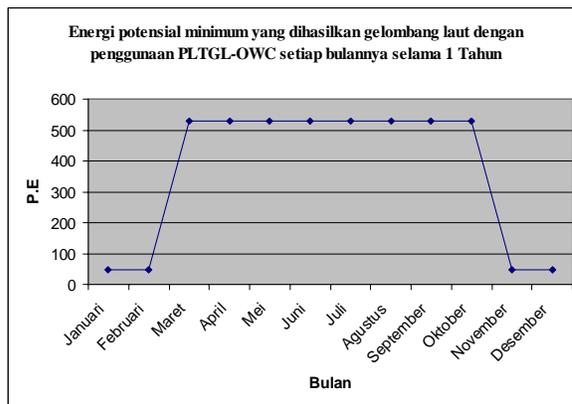
$$P.E. = 8.239.491,084 \text{ Joule} = 8.239,491 \text{ KJ}$$

Tabel 1. Energi potensial yang dihasilkan gelombang laut dengan PLTGL-OWC setiap bulannya selama 1 tahun.

Energetech Specifications	
Parabolic width	35 m
Structural Steel Weight	450 tons
Centerline Devices Spacing	60-90 m
Rated Power	Up to 2 MW (depending on wave climate and devices dimensions)
Power Take Off	Variable Pitch Air Turbine
Water Depth	shore based to 50 m

Besarnya energi potensial setiap bulannya yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC di lokasi yang direncanakan dapat dilihat pada tabel 1.

Melihat data di atas, dapat disimpulkan bahwa besarnya energi potensial yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC di lokasi yang direncanakan cukup konstan, seperti terlihat pada gambar 7.



Gambar 7. Grafik energi potensial minimum yang dihasilkan gelombang laut dengan PLTGL-OWC setiap bulannya selama 1 tahun.

Gambar 7 menunjukkan grafik besarnya energi potensial minimum yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC di lokasi yang direncanakan setiap bulannya mulai dari bulan Januari-Desember.

4.5.2. Perhitungan energi kinetik

Besarnya energi kinetik yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC adalah sebanding dengan besarnya energi potensial yang dihasilkan. Untuk menghitung besarnya energi kinetik yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC. Berikut ini adalah perhitungan besarnya energi kinetik yang dihasilkan

gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC di lokasi yang direncanakan pada tanggal 1 Januari 2007.

- Untuk tanggal 1 Januari 2007, diketahui:
 - Lebar chamber owc (w) = 35 m
 - Massa jenis air laut (ρ) = 1030 kg/m³
 - Besarnya gravitasi bumi (g) = 9,81 m/dt
 - Ketinggian gelombang laut (H) = 1,1925 m
 - Panjang gelombang (λ) = 262,1376 m
- Maka perhitungan besarnya energi kinetik yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC adalah sebagai berikut.

$$K.E. = \frac{1}{4} w \rho g a^2 \lambda$$

$$K.E. = \frac{1}{4} \times 35 \times 1030 \times 9.81 \times (1.1925 / 2)^2 \times 262.1376$$

$$K.E. = 8.239.491,084 \text{ Joule}$$

$$K.E. = 8.239,491 \text{ kJ}$$

Besarnya energi kinetik yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC setiap bulannya di lokasi yang direncanakan dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Energi kinetik yang dihasilkan gelombang laut dengan PLTGL-OWC setiap bulannya selama 1 tahun

Bulan	Tinggi Gelombang (m)		Energi Kinetik (Joule)	
	Min	Max	Min	Max
1	0.0212	1.1925	46,295	8239491,084
2	0.0212	0.5300	46,295	723357,242
3	0.0477	0.6413	527,327	1281471,479
4	0.0477	0.6413	527,327	1281471,479
5	0.0477	0.5300	527,327	723357,242
6	0.0477	0.6413	527,327	1281471,479
7	0.0477	0.6413	527,327	1281471,479
8	0.0477	0.6413	527,327	1281471,479
9	0.0477	0.6413	527,327	1281471,479
10	0.0477	0.6413	527,327	1281471,479
11	0.0212	0.7632	46,295	2159933,151
12	0.0212	1.1925	46,295	8239491,084

Tabel 2 menunjukkan besarnya energi kinetik yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC setiap bulannya mulai dari bulan Januari – Desember 2007. Dari tabel 2, dapat diketahui bahwa besarnya energi kinetik yang terendah yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC adalah sebesar 46,295 J. Sedangkan untuk energi kinetik yang tertinggi yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC adalah sebesar 8239491,084 J. Melihat data diatas, dapat disimpulkan bahwa besarnya energi kinetik yang dihasilkan gelombang

laut dengan penggunaan PLTGL-OWC di lokasi yang direncanakan cukup konstan

Besarnya energi kinetik maximum yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC di lokasi yang direncanakan setiap bulannya mulai dari bulan Januari-Desember 2007. Energi kinetik maximum tertinggi terjadi bulan Januari dan Desember, sedangkan energi kinetik maximum terendah terjadi pada bulan Februari dan Mei. Perbedaan ini disebabkan oleh perbedaan tinggi gelombang maximum yang terjadi saat itu.

4.5.3. Perhitungan total energi

Untuk menghitung besarnya total energi yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan teknologi *oscillating water column* (OWC) di lokasi yang direncanakan digunakan persamaan berikut:

$$P_{WD} = \frac{P_w}{\lambda_w} = \frac{1}{2T} \rho g a^2$$

Berikut ini adalah perhitungan besarnya total energi yang dihasilkan gelombang laut di kawasan tersebut pada tanggal 1 Januari 2007.

- Untuk tanggal 1 Januari 2007, diketahui:
 - Lebar chamber (w) = 35 m
 - Massa jenis air laut (ρ) = 1030 Kg/m³
 - Besarnya gravitasi bumi (g) = 9,81 m/dt
 - Ketinggian gelombang laut (H) = 1,1925 m
 - Panjang gelombang (λ) = 262,1376 m
- Maka besarnya total energi yang dihasilkan gelombang laut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$E_w = \frac{1}{2} w \rho g a^2 \lambda$$

$$E_w = \frac{1}{2} \times 35 \times 1030 \times 9.81 \times (1.1925/2)^2 \times 262.1376$$

$$E_w = 16.478.982,17 \text{ J}$$

$$E_w = 16.478,982 \text{ kJ}$$

Sedangkan untuk besarnya total energi yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan teknologi *oscillating water column* (OWC) setiap bulannya di kawasan tersebut seperti pada tabel 3.

4.5.4 Perhitungan *energy density* (E_{WD}) yang dihasilkan gelombang laut dengan PLTGL-OWC.

Setelah total energi diketahui, maka dapat dihitung besarnya *energy density* (E_{WD}) yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC di lokasi yang direncanakan. Untuk menghitung besarnya *energy density* (E_{WD}) yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC di laut di kawasan tersebut.

Tabel 3. Total Energi yang dihasilkan gelombang laut dengan PLTGL-OWC setiap bulannya selama 1 tahun

Bulan	Tinggi Gelombang (m)		Total Energi (Joule)	
	Min	Max	Min	Max
1	0.0212	1.192	92.5897	16,478,982.170
2	0.0212	0.53	92.5897	1,446,714.484
3	0.0477	0.641	1,054.654	2,562,942.958
4	0.0477	0.641	1,054.654	2,562,942.958
5	0.0477	0.530	1,054.654	1,446,714.484
6	0.0477	0.641	1,054.654	2,562,942.958
7	0.0477	0.641	1,054.654	2,562,942.958
8	0.0477	0.641	1,054.654	2,562,942.958
9	0.0477	0.641	1,054.654	2,562,942.958
10	0.0477	0.641	1,054.654	2,562,942.958
11	0.0212	0.763	92.5897	4,319,866.302
12	0.0212	1.192	92.5897	16,478,982.170

Berikut ini adalah perhitungan besarnya *energy density* pada tanggal 1 Januari 2007.

- Untuk tanggal 1 Januari 2007, diketahui:
 - Massa jenis air laut (ρ) = 1030 Kg/m³
 - Besarnya gravitasi bumi (g) = 9,81 m/dt
 - Ketinggian gelombang laut (H) = 1,1925 m
- Maka perhitungan besarnya *energy density* yang dihasilkan gelombang laut adalah sebagai berikut:

$$E_{WD} = \frac{E_w}{\lambda_w} = \frac{1}{2} \rho g a^2$$

$$E_{WD} = \frac{1}{2} \times 1030 \times 9.81 \times (1.1925/2)^2$$

$$E_{WD} = 1.796,110 \text{ J/m}^2$$

Energy density maximum yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC di lokasi yang direncanakan setiap bulannya mulai dari bulan Januari-Desember 2007.

4.5.5 Perhitungan daya listrik yang dihasilkan gelombang laut dengan PLTGL-OWC.

Untuk menghitung besarnya daya listrik yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC di laut di kawasan Jimbaran digunakan persamaan 2.13. Berikut ini adalah perhitungan besarnya daya listrik yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC di kawasan tersebut pada tanggal 1 Januari 2007.

- Untuk tanggal 1 Januari 2007, diketahui:
 - Besarnya total energi yang dihasilkan gelombang laut (E_w) = 16478982.17 J
 - Besarnya periode gelombang laut (T) = 1.8424 detik.

- Maka perhitungan besarnya daya listrik yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC adalah sebagai berikut:

$$P_w = \frac{E_w}{T}$$

$$P_w = \frac{16478982.17}{1.8424}$$

$$P_w = 4.174007.641 \text{ Watt}$$

$$P_w = 4.174.008 \text{ kW.}$$

Sedangkan untuk besarnya daya listrik yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan teknologi *oscilating water column* (OWC) setiap bulannya dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4 menunjukkan besarnya daya listrik yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC setiap bulannya mulai dari bulan Januari – Desember 2007.

Tabel 4. Daya listrik yang dihasilkan gelombang laut dengan PLTGL-OWC setiap bulannya selama 1 tahun

Bulan	Tinggi Gelombang (m)		Daya Listrik (W)	
	Min	Max	Min	Max
1	0,0212	1,1925	175,892339	4174007,6410
2	0,0212	0,53	175,892339	549663,5577
3	0,0477	0,6413	1335,682445	885238,6563
4	0,0477	0,6413	1335,682445	885238,6563
5	0,0477	0,53	1335,682445	549663,5577
6	0,0477	0,6413	1335,682445	885238,6563
7	0,0477	0,6413	1335,682445	885238,6563
8	0,0477	0,6413	1335,682445	885238,6563
9	0,0477	0,6413	1335,682445	885238,6563
10	0,0477	0,6413	1335,682445	885238,6563
11	0,0212	0,7632	175,892339	1367738,8240
12	0,0212	1,1925	175,892339	4174007,6410

Dari tabel 4 dapat diketahui bahwa besarnya daya listrik yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC yang tertinggi adalah sebesar 4174007,6410 Watt, sedangkan yang terendah adalah sebesar 175, 892339 Watt. Melihat data diatas, terlihat bahwa daya listrik yang dihasilkan gelombang laut di kawasan Jimbaran cukup besar.

4.5.6. Perhitungan *power density* (P_{WD}) yang dihasilkan gelombang laut Dengan PLTGL-OWC.

Setelah besarnya daya listrik diketahui, maka besarnya *power density* (P_{WD}) yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC di laut di kawasan Jimbaran dapat dihitung. Berikut ini

adalah perhitungan besarnya *power density* pada tanggal 1 Januari 2007.

Maka perhitungan besarnya *power density* yang dihasilkan gelombang laut dengan penggunaan PLTGL-OWC adalah sebagai berikut

$$P_{WD} = \frac{P_w}{\lambda_w} = \frac{1}{2T} \rho g a^2$$

$$P_{WD} = \frac{1}{2(1.8424)} \times 1030 \times 9.81 \times (1.1925/2)^2$$

$$P_{WD} = 454.942 \text{ W/m}^2$$

5. KESIMPULAN

Dari analisis pada bab sebelumnya, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

Dari analisis pada bab sebelumnya, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan penggunaan pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan dengan teknologi *oscilating water column* (PLTGL-OWC) di laut di kawasan Jimbaran dapat dihasilkan energi yang tertinggi adalah sebesar 16.478.982,17 Joule dan yang terendah adalah sebesar 92,5897 Joule. Sedangkan untuk daya listrik yang mampu dihasilkan dengan penggunaan pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan teknologi *oscilating water column* (PLTGL-OWC) di lokasi tersebut yang tertinggi adalah sebesar 4.174.007,641 Watt dan yang terendah adalah sebesar 175,892 Watt.
2. Dengan melihat potensi ketinggian gelombang laut yang cukup besar dan konstan serta besarnya energi dan daya listrik yang mampu dihasilkan, maka pembangkit listrik tenaga gelombang laut dengan penggunaan teknologi *oscilating water column* (PLTGL-OWC) cukup potensial dibangun di lokasi laut di kawasan Jimbaran, tepatnya pada kedalaman 50 m dari permukaan laut dan berjarak $\pm 2,8$ Km dari garis pantai Jimbaran.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arismunandar, W. 2004. **Penggerak Mula Turbin**. Bandung : ITB.
- [2] Arismunandar, W. 2004. **Teknik Tenaga Listrik Jilid 1**. Jakarta : Pradnya Paramitha.
- [3] Mandiharta, A. 2007. **Kajian Potensi Pengembangan Energi Pasang Surut Sebagai Energi Alternatif**. Bukit Jimbaran : Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Udayana.
- [4] Nafika, I. 2008. **Pemanfaatan Energi Ombak Sebagai Pembangkit Tenaga Listrik**. www.beritanet.com . diakses hari Rabu 10 September 2008.

-
- [5] Navarro, D, dkk. 2007. *California Ocean Wave Assessment*. California : Electric Power Research Institute.
- [6] Pontes, M.T. 2001. *Ocean Energies Resources and Utilisation*. Portugal : Instituto Superior Tecnico.
- [7] Pudjanarsa, A. 2006. **Mesin Konversi Energi**. Yogyakarta : ANDI.
- [8] Vining, J. 2005. *Ocean Wave Energi Conversion*. Madison : University of Wisconsin.
- [9] Waldopo, dkk. 2008. **Perairan Darat dan Laut**. www.google.com. Diakses hari Sabtu 20 september 2008.
- [10] -----, 2004. **Rencana Umum Ketenagalistrikan Daerah (RUKD) Provinsi Bali**. Bali: Bappeda Provinsi Bali.
- [11] -----, 2007. *Californian Ocean Wave Energy Assesment*. USA: EPRI (Electric Power Research Institute).
- [12] -----, 2008. **Bali Map Info**. www.support@baliaces.com. Diakses pada hari Kamis, 11 Desember 2008.
- [13] -----, 2008. *Wave Energy Conversions*. USA : Departement of Naval Architecture and Marine Engineering.