

## PEMBANGKIT LISTRIK DENGAN SISTEM *OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION*

Syerly Klara & Abd. Latief Had

Jurusan Perkapalan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin  
Jl. Perintis Kemerdekaan Km. 10 Tamalanrea – Makassar, 90245  
Telp./Fax: (0411) 585637  
E-mail: [syerlyklara@yahoo.co.id](mailto:syerlyklara@yahoo.co.id)

### Abstrak

Pemanfaatan sumber daya alam laut Indonesia sudah cukup baik diantaranya dibidang perikanan, pertambangan dan perindustrian, namun apabila ditinjau lebih jauh, Sumber daya alam laut Indonesia juga dapat digunakan sebagai pembangkit energi listrik dengan memanfaatkan panas laut seperti perairan Sulawesi Barat. Penelitian ini bertujuan mengetahui hubungan antara diameter pipa, debit aliran fluida, temperatur permukaan dan daya listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik panas laut (OTEC). Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya maksimum sebesar 23,628.62 Watt didapatkan pada diameter pipa air laut 3.2 m dengan kecepatan aliran sebesar 2.03 m/s. Daya output maksimum lebih besar dapat diperoleh pada temperatur permukaan air laut yang lebih besar yaitu pada pertengahan tahun antara bulan Mei sampai September.

**Kata Kunci:** OTEC, Condenser, Evaporator, Turbin Uap

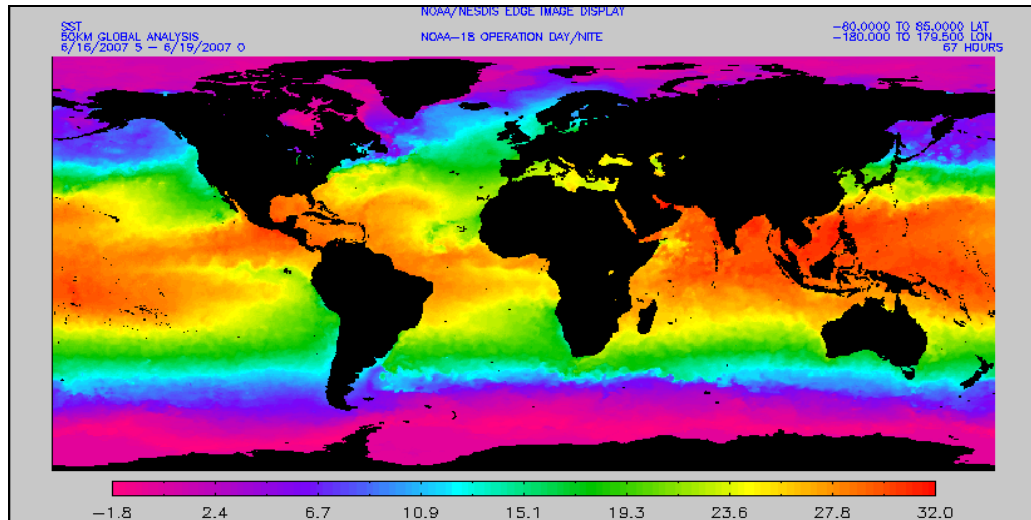
### PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara kepulauan yang sebagian besar wilayahnya terdiri dari lautan yaitu kedua didunia setelah Kanada. Pemanfaatan sumber daya alam laut Indonesia sudah cukup baik diantaranya dibidang perikanan, pertambangan dan perindustrian, namun apabila ditinjau lebih jauh. Sumber daya alam laut Indonesia masih dapat dimanfaatkan untuk banyak kegunaan lagi diantaranya sebagai pembangkit energi listrik. Sinar matahari yang jatuh di lautan diserap oleh air laut secara efektif dan energi tersebut tertahan pada lapisan permukaan laut pada kedalaman 35-100 m, dimana gaya angin dan gelombang menyebabkan temperatur dan kadar garam mendekati uniform. Pada wilayah lautan tropis yang terletak kira-kira diantara 15° lintang utara dan 15° lintang selatan, energi panas yang diserap dari matahari memanasi air laut pada *mixed layer* dengan suhu sekitar 28 °C (82 °F) yang konstant siang dan malam setiap bulan (Avery and Wu.1994).

Dibawah *mixed layer*, air laut menjadi semakin dingin seiring dengan penambahan kedalaman hingga mencapai kedalaman 800 sampai 1000 m (2500 to 3300 ft), temperatur air berubah menjadi 4.4 °C (40 °F). Pada kedalaman 900 m keatas terdapat reservoir air dingin yang sangat besar. Air dingin ini merupakan akumulasi dari air dan es yang mencari dari daerah kutub. Hasil yang terjadi 2 hal diatas adalah adanya reservoir air panas yg besar di permukaan dan reservoir air dingin dibawah dengan perbedaan suhu sekitar 22 °C sampai 25 °C. Temperatur ini tak berubah drastis sepanjang tahun, dengan variasi beberapa derajat akibat adanya perubahan cuaca dan musim, dan perbedaan suhu antara pergantian siang dan malam hanya berefek sekitar 1 derajat (Rahman.2008).

OTEC merupakan singkatan dari *Ocean Thermal Energy Conversion* adalah salah satu teknologi terbaru yang menggunakan perbedaan suhu antara permukaan laut dan dasar laut untuk mengoperasikan generator yang menghasilkan energi listrik.

Sistem kerja OTEC mempunyai kemiripan dengan mesin uap yaitu fluida di evaporasi dan di kondensasi, perbedaan tekanan yang terjadi inilah yang memutar turbine dan kemudian menghasilkan listrik. namun, pada OTEC menggunakan air laut yang tak terbatas jumlahnya sehingga OTEC dapat menjadi salah satu sumber energi terbaharukan (Avery and Wu.1994).



Gambar 1. Citra satelit temperature permukaan laut (NASA.2009)

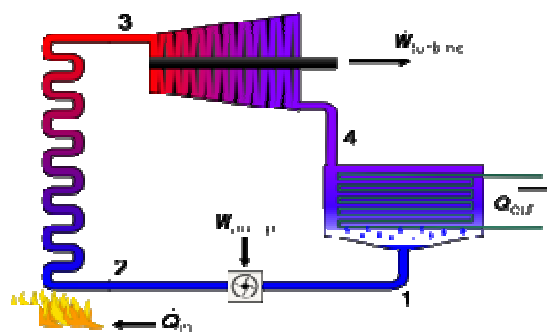
### Perumusan Masalah

Permasalahan yang diselesaikan melalui penelitian ini:

1. Bagaimana hubungan antara diameter pipa, debit aliran fluida, temperatur permukaan, dan daya net yang dihasilkan.
2. Berapa ukuran diameter pipa air laut yang sesuai untuk pembangkit listrik OTEC 100 MW
3. Menentukan daya yang dihasilkan setiap bulan akibat adanya siklus suhu rata – rata bulanan.

### TINJAUAN PUSTAKA

OTEC atau *Ocean Thermal Energy Conversion* adalah sebuah sistem yang memungkinkan terjadinya konversi energi dari panas matahari yang diserap oleh permukaan lautan menjadi energi listrik. Sistem kerja OTEC ini terbagi menjadi dua sistem yang menggunakan siklus yang berbeda, yaitu siklus terbuka dan siklus tertutup. Siklus terbuka dan siklus tertutup ini merupakan pengembangan dari siklus Rankine atau siklus termodinamika yang biasanya menggunakan air sebagai fluida kerja. Siklus Rankine ini digunakan untuk memproduksi 80% dari kebutuhan listrik dunia.

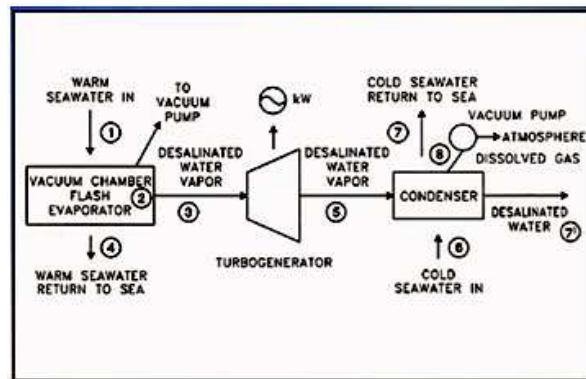


Gambar 2. Layout siklus Rankine

### Siklus Terbuka (*Open Cycle*) pada OTEC

Siklus terbuka atau *Claude Cycle* adalah pelopor dari berbagai macam variasi siklus OTEC. Siklus terbuka menggunakan air laut sebagai fluida kerja. Sebuah siklus kerja yang terdiri dari sebuah flash evaporator, Expansi turbin uap dan generator, condenser uap, alat-alat pemisah zat non kondensable, dan deaerator. Siklus tersebut merupakan dasar dari siklus Rankine yang mengkonversi energi panas dari air hangat permukaan menjadi energi listrik. Dalam siklusnya, air laut yang hangat di deaerasi dan dilewatkan ke dalam ruang evaporasi, dimana bagian dari air laut di konversi menjadi uap bertekanan rendah. Uap tersebut melalui

turbin, yang kemudian mengekstraksi energi darinya, lalu kemudian keluar kedalam sebuah kondenser. (Avery and Wu.1994).

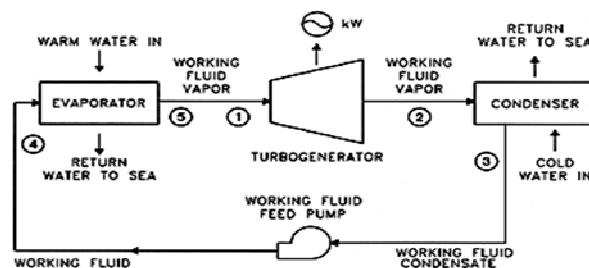


Gambar 3. Skema siklus terbuka pada OTEC

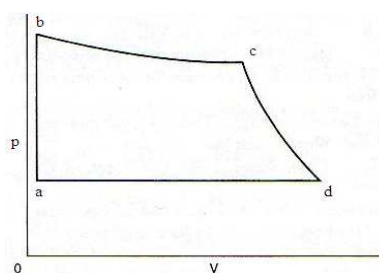
Kekurangan utama pada sebuah OTEC yang menggunakan siklus terbuka adalah rendahnya tekanan yang ada untuk memutar turbin yaitu sebesar 2.8 kPa dibandingkan dengan sistim tertutup sebesar 270 kPa yang menggunakan ammonia sebagai fluida kerja, dan dibutuhkan volume fluida kerja yang sangat besar pada turbin uap. Siklus dengan efisiensi yang rendah dikombinasikan dengan jumlah besar volume fluida yang dibutuhkan membutuhkan turbine yang sangat besar. Kerugian lainnya yang tidak kalah penting adalah penyediaan pompa vakum untuk memisahkan gas campuran pada fluida kerja, yang apabila tidak dipisahkan akan terakumulasi pada kondenser, gas campuran ini akan mengurangi fungsi kerja kondenser. Energi yang dibutuhkan untuk mengoperasikan pompa vakum dapat mengurangi output listrik secara signifikan.

**Siklus Tertutup (Closed Cycle) pada OTEC**

Siklus Rankine tertutup adalah sebuah proses yang mula-mula mengevaporasi fluida pada tekanan konstant dalam sebuah boiler atau evaporator, yang kemudian uap tersebut memberikan daya kerja pada mesin piston atau turbin. Uap buangan kemudian masuk kedalam sebuah tempat dimana panas tersebut ditransfer pada cairan pendingin, mengakibatkan perubahan bentuk dari uap menjadi cairan, yang kemudian dipompa kembali kedalam evaporator dan membentuk sebuah siklus.



Gambar 4. Skema siklus tertutup pada OTEC



Gambar 5. Diagram siklus tertutup Rankine

Dimana :

1. Titik awal a, penambahan panas pada fluida kerja pada boiler sampai temperatur mencapai titik didih pada tekanan rencana yang di tunjukkan pada titik b.
2. Dengan sedikit penambahan panas, cairan menguap pada temperatur dan tekanan konstan sehingga mengalami perubahan volume di titik c.
3. Uap bertekanan tinggi kemudian memasuki piston atau turbin di titik d.
4. Uap bertekanan rendah masuk kedalam kondenser dan dengan pelepasan panas pada tekanan konstan mengalami pendinginan dan mengembun, kembali ke volume awal pada titik a.

**Sistem OTEC**

**Daya Pompa Air Laut**

Sesuatu yang tidak dapat dipisahkan pada konsep OTEC adalah penggunaan air dingin yang diambil dari kedalaman sekitar 1000 m untuk mendinginkan dan menglikuifikasi uap fluida kerja pada sistem. CWP harus cukup besar untuk mengatasi aliran air yang dibutuhkan dengan loss drag yang rendah, juga harus terbuat dari material yang memiliki ketahanan di dalam air laut dan tidak mudah untuk terkorosi.

Panjang dari CWP ditentukan oleh kebutuhan untuk menarik air dari kedalaman dimana temperatur mendekati 4,4° C. Laju aliran air ditentukan oleh output power dan efisiensi OTEC power plant dalam mengkonversi energi heat menjadi mekanis lalu berubah menjadi energi listrik.

Perhitungan Diameter pipa air dingin tergantung pada power yang dibutuhkan untuk memompa *cold water* ke sistem kondenser OTEC diberikan oleh produk dari aliran massa air dan total head hidrolis.

Perhitungan *flow rate* atau besarnya fluida yang dipindahkan dengan menggunakan persamaan :

$$\dot{m}_{ws} = \rho AV = \rho D^2(\pi/4)V \dots\dots\dots (1)$$

sedangkan untuk menghitung tekanan yang hilang akibat gaya gesekan yang terjadi antara air laut dan dinding pipa digunakan persamaan:

$$P_s = f V^2L/(2gD)\dots\dots\dots (2)$$

Dengan mempertimbangkan adanya gesekan pada inti, maka untuk menghitung tekanan yang turun pada saat air laut melewati evaporator atau kondensator digunakan persamaan:

$$P_h = \rho V^2 (f_h/2) (D_h/A_h) (L_h/g) \dots\dots\dots (3)$$

Jadi daya total yang dibutuhkan untuk memompa air hangat dari permukaan maupun air dingin dari dasar laut dihitung menggunakan persamaan:

$$W_s = (P_s + P_h)\dot{m}_{ws}g/\eta_s \dots\dots\dots (4)$$

**Daya Pompa Fluida Kerja (Ammonia)**

Panas yang ditransfer ke amonia di evaporator pertama-tama menaikkan temperatur hingga vaporisasi dimulai dan diserap sebagai panas dari evaporisasi pada temperatur konstan, maka pertama dilakukan perhitungan jumlah panas yang ditransfer pada evaporator dengan persamaan

$$Q = \dot{m}_{ws} c_{pw} (T_i - T_o)\dots\dots\dots (5)$$

kemudian setelah jumlah panas yang ditransfer ditemukan kemudian perpindahan fluida kerja dapat dikalkulasi dengan persamaan:

$$\dot{m}_a = Q_e/(h_{eo} - h_{ei})\dots\dots\dots (6)$$

Setelah itu dapat dihitung daya yang dibutuhkan oleh pompa fluida kerja dengan menggunakan persamaan:

$$W_a = \dot{m}_a [(T_e - T_c) c_{pa} + H_v] \dots \dots \dots (7)$$

Atau dengan menggunakan persamaan:

$$W_a = \dot{m}_a V_a [(P_{ei} - P_{eo}) + (\alpha + \beta)(P_{ei} - P_s)] / \eta_p \dots \dots \dots (8)$$

**Sistem Turbin**

Untuk menentukan jumlah daya yang dihasilkan oleh turbin sebelumnya perlu dihitung kualitas uap fluida kerja yang keluar dari turbin dengan menggunakan persamaan:

$$x = (s_{to} - s_{co}) / (s_{ci} - s_{co}) \dots \dots \dots (9)$$

setelah kualitas uap fluida kerja ditemukan maka dapat dihitung entalpi fluida kerja setelah keluar dari turbin dengan menggunakan

$$h_{to} = (1 - x)h_{ci} + xh_{co} \dots \dots \dots (10)$$

maka daya yang dihasilkan oleh turbin dapat dihitung dengan persamaan:

$$W_t = \dot{m}_a (h_{eo} - h_{to}) \eta_t \eta_g \dots \dots \dots (11)$$

**Daya Ouput Net OTEC**

Sekitar 35% dari gross power dibangkitkan oleh OTEC plant beroperasi dengan total delta T sekitar 20° C akan dibutuhkan untuk kebutuhan operating plant. Maka dari itu, efisiensi operasi didefinisikan sebagai net power/gross power akan menjadi 65%. Perhitungan daya keseluruhan yang dihasilkan oleh pembangkit dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$W_n = W_t - W_s - W_a \dots \dots \dots (12)$$

**METODE PENELITIAN**

Metode yang dipakai dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan siklus tertutup sebagai sistem pada sebuah OTEC power plant dan menghitung Variasi dimensi pipa sehingga ditemukan Power yang diperlukan untuk menjalankan siklus ini dan efisiensi Power pada sebuah OTEC power plant dapat dihitung.

**PENYAJIAN DATA**

1. Kondensor, dengan konfigurasi cangkang dan tube, titanium tubes 25 mm pada sebuah cangkang baja dengan permukaan clad titanium.

**Tabel 1.** Spesifikasi Kondensator

Condenser (per 25 MW net module)	
Tubes length,	13 m
Tubes diameter	1.5 inch
Number of tubes	65,378
Tubes flow velocity	1.35 m/s
Heat transfer area	98.189 m <sup>2</sup>
Overall U	417
Tc, in F	39.6 (4.22 °C)
Tc, out F	44.4 (6.89 °C)
Twf, in F	50.1 (10.056 °C)
Twf, out F	49.0 (9.44 °C)
Delta p, psig	1.33

2. Evaporator, dengan konfigurasi cangkang dan tube, titanium tubes 25 mm pada sebuah cangkang baja dengan permukaan clad titanium.

**Tabel 2.** Spesifikasi Evaporator

<b>Evaporator (per 25 MW net module)</b>	
Tubes length	13 m
Tubes diameter	1.5 inch
Jumlah tabung	75,894
Tubes flow velocity,	1.4 m/s
Heat transfer area,	113.183 m <sup>2</sup>
Overall U	415
Th, in	26.11 °C
Th, out	23.83 °C
Twf, in	21.33 °C
Twf, out	20.72 °C
Delta P psig	1.32

### 3. Turbine /Generator

Turbine digunakan dalam pembangkitan listrik dengan efisiensi 89%, sedangkan generator mempunyai efisiensi 96%.

**Tabel 3.** Spesifikasi Turbin

<b>Turbine performance requirements</b>	
Horsepower	41,700 Hp
Working fluid	NH3
Inlet Temperature	20.3 °C
Inlet pressure	125.7 psi
Outlet temperature	10 °C
Outlet pressure	89.4 psi
Quality	98%
<b>OTEC Ammonia Vapor Turbine Characteristics</b>	
Shaft power	44.236 hp
Shaft speed	1.800 rpm
Ammonia flow rate	879.02 kg/sec
Specific speed	109
Overall efficiency	0,896
Inlet total pressure	122.1 psi
Inlet temperature	19.4 °C

**Tabel 4.** Spesifikasi Generator

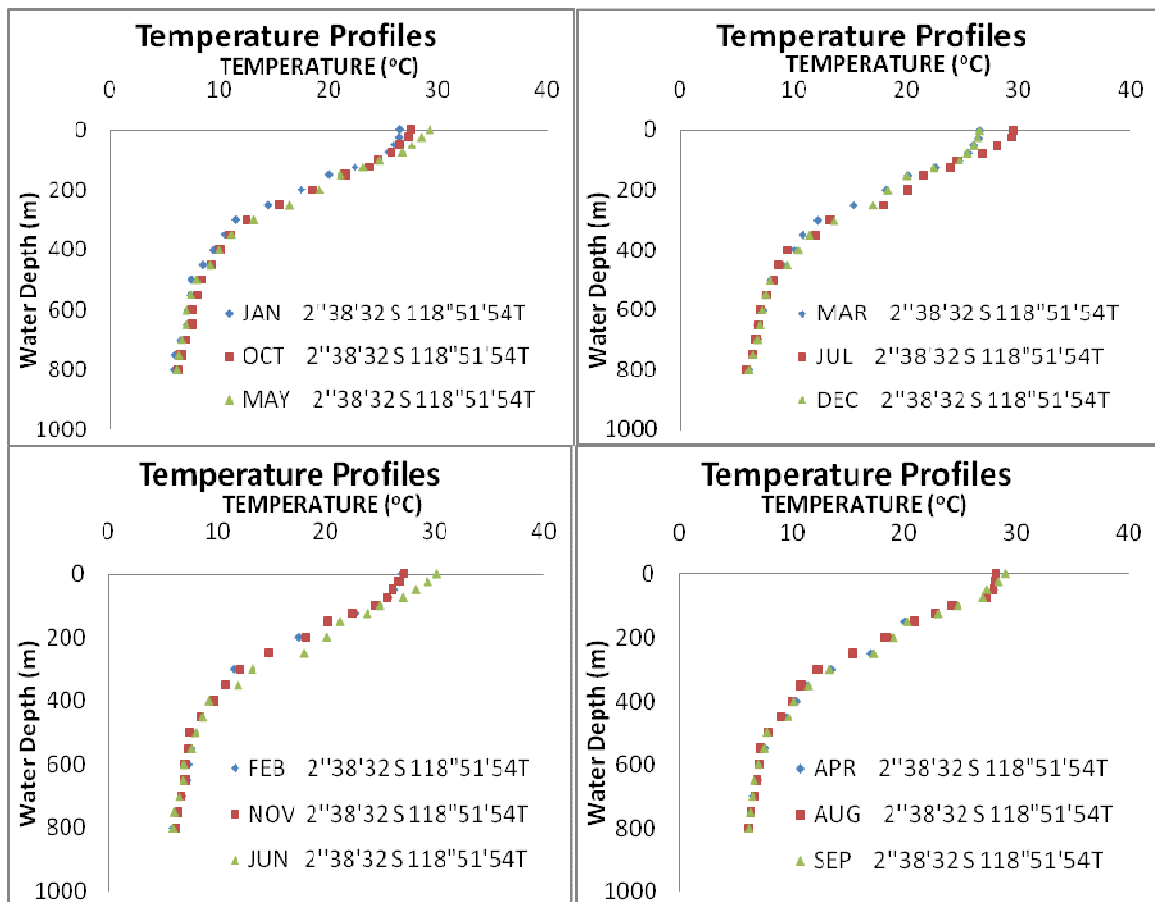
<b>Number of units</b>	<b>Components</b>
4	Generators-37 MVA, 0.9pf-1800rpm
4	2000 A generator circuit breakers
2	1000 A generator circuit breakers
2	Auxiliary transformer units
4	Station service transformers
12	Motor control centers
1	Diesel generators
1	Starting battery 125 V
2	Battery chargers 37.5 KW

1	Inverter 60 KVA 120 V
12	480 V distribution panels
8	208/120 V distribution panels
1	DC power distribution panel

**ANALISA DAN BAHASAN**

**Profil Temperatur Permukaan Laut.**

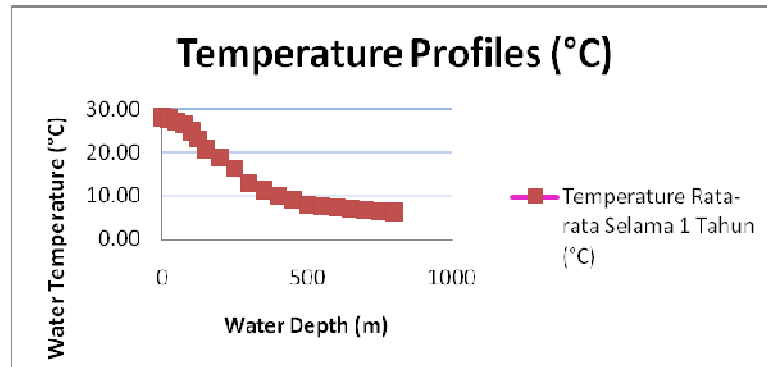
Profil Temperatur laut pada lokasi dapat dilihat pada gambar 6. Profil menunjukkan bahwa temperatur perairan laut berada pada range 26°C – 31°C. Temperatur pada kedalaman 800 m adalah 4°C - 7°C.



**Gambar 6.** Profil temperatur laut pada perairan Sulawesi Barat

Karena, temperatur pada dasar laut pada kenyataannya tetap sama sepanjang tahun, maka sangatlah penting untuk menentukan variasi temperatur setiap bulan pada permukaan laut. Selain penentuan profil temperatur, sangatlah penting untuk mengenal karakteristik lingkungan lokasi OTEC power plant.

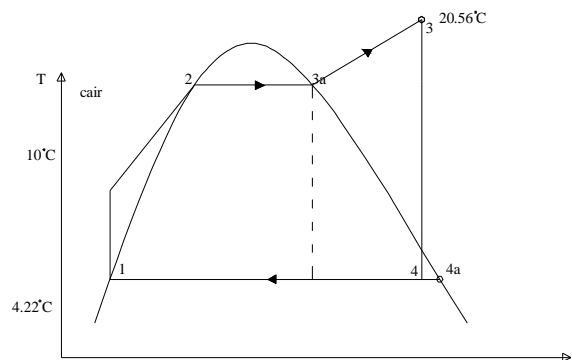
*Thermal Resources* – Sumber daya thermal di Indonesia cukup besar yang membuat negara ini adalah suatu lokasi yang ideal dalam pengembangan OTEC. Desain OTEC sangat menekankan pada perbedaan temperatur sebesar 20°C untuk memenuhi kondisi desain, hal ini disebabkan karena perbedaan suhu ini sangat berpengaruh besar pada net power output yang dapat mempengaruhi harga listrik yang dihasilkan. Variasi perbedaan 2°C dapat berpengaruh besar.



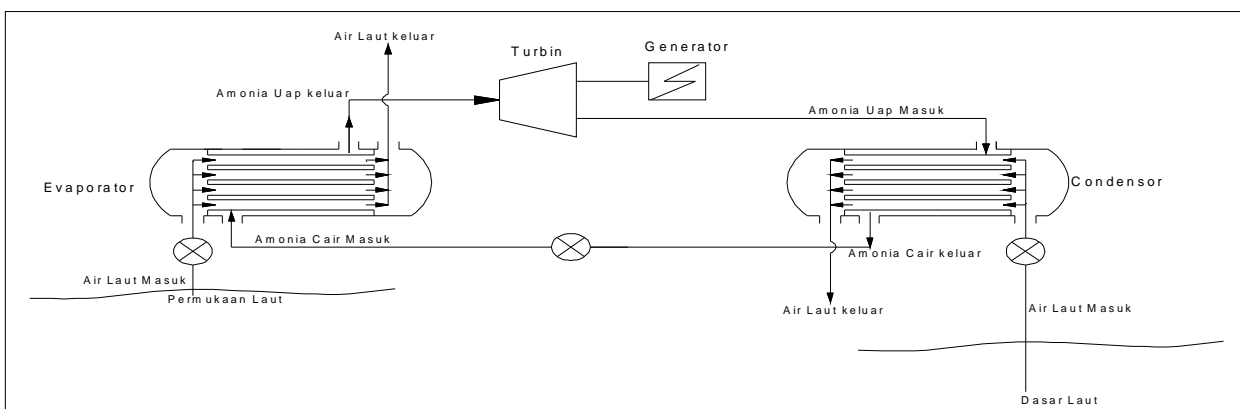
Gambar 7. Variasi temperatur bulanan pada permukaan dan kedalaman 800 m di Mamuju - Sulawesi Barat.

**OTEC Land Based System.**

OTEC land based sistem merupakan salah satu sistem yang terintegrasi dengan sistem pendinginan, sistem desalinisasi air, aquaculture dan agriculture. Land-based sistem memiliki keunggulan yang tidak dimiliki oleh sistem offshore *floating* sebab dapat dihubungkan dengan usaha aquaculture dan mariculture pada daerah dibangunnya *power plant*. Terdapat tiga pipa dengan ukuran besar memompa air dari laut dalam dan permukaan laut yang dialirkan ke pusat pengelola. Sistem kerja *Closed Cycle* digunakan untuk menggerakkan turbin sehingga menghasilkan listrik.



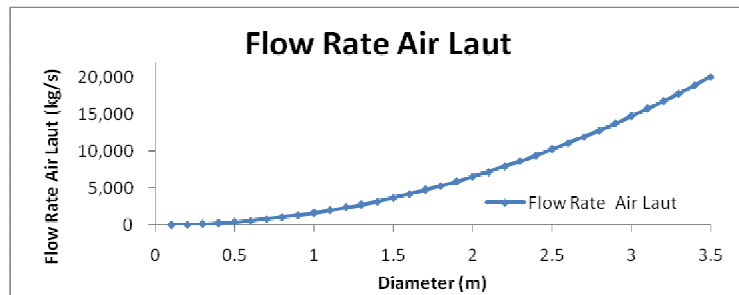
Gambar 8. Diagram termodinamika pada siklus rankine tertutup (OTEC)



Gambar 9. Perencanaan design diagram OTEC land-based



Flow Rate Air Laut



Gambar 10. Hasil perhitungan hubungan diameter pipa dengan flow rate air laut.

Dari grafik diatas dapat terlihat bahwa peningkatan besar diameter pipa berpengaruh terhadap jumlah debit air laut yang mengalir. Analisa dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.1 dengan asumsi kecepatan fluida tetap pada 2,03 m/s dan mendapatkan hasil bahwa semakin besar diameter yang di rancang maka jumlah flow rate air akan meningkat. Maka hasil dari flow rate air laut yang didapat dibagi menjadi 4 modul.

Daya Output Net

Perhitungan daya out put net pada diameter pipa 0.1 m

➤ Daya yang dibutuhkan untuk memompa fluida kerja (Watt)

$$W_a = \dot{m}_a V_a [(P_{ei} - P_{eo}) + (\alpha + \beta)(P_{ei} - P_s)] / \eta_p$$

$$= 29.25 \times 3 [(1.32) + (0.125 + 0.125) \times (127 - 1126)] / 0.85$$

$$= 345.59 \text{ Watt}$$

➤ Daya total yang dihasilkan turbin (Watt)

$$W_t = \dot{m}_a (h_{eo} - h_{to}) \eta_t \eta_g$$

$$= 29.25 (1462.6 - 1454.3) \times 0.89 \times 0.95$$

$$= 30,371.96 \text{ Watt}$$

Dimana;

$$P_s = f V^2 L / (2gD)$$

$$= 0.0094 \times (2.03^2) \times 1219 / (2 \times 9.81 \times 0.1)$$

$$= 24.07 \text{ N/m}^2$$

$$P_h = \rho V^2 (f_h / 2) (D_h / A_h) (L_h / g)$$

$$= 1025 \times (2.03^2) \times (0.94 / 2) \times (0.0381 / 1.76) \times (13 / 9.81)$$

$$= 56.72 \text{ N/m}^2$$

➤ Daya yang dibutuhkan untuk memompa air laut (Watt)

$$W_s = (P_s + P_h) \dot{m}_{ws} g / \eta_s$$

$$= (56.72 + 24.07) \times 4.08 \times 9.81 / 0.87$$

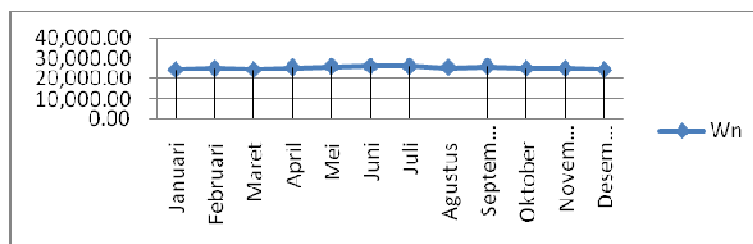
$$= 3,723.30 \text{ Watt}$$

➤ Daya total yang dihasilkan sistem OTEC (Watt)

$$W_n = W_t - W_s - W_a$$

$$= 30,371.96 - 3723.30 - 345.59$$

$$= 23,628.62 \text{ Watt}$$



Gambar 11. Daya net yang dihasilkan dalam setahun

Grafik diatas menunjukkan sekitar 20% dari daya yang dihasilkan turbin dipergunakan untuk menjalankan sistem pada pembangkit listrik. Berdasarkan data temperatur yang digunakan diperoleh hasil pada bulan May, Juni, Juli, September dapat dibangkitkan listrik dengan daya paling maksimal.

## SIMPULAN

1. Ukuran diameter pipa mempengaruhi besaran maksimum daya yang dihasilkan namun penambahan ukuran diameter pipa air laut akan berpengaruh signifikan terhadap daya yang dibutuhkan untuk memindahkan air laut ke generator sehingga secara keseluruhan daya yang dihasilkan akan terus berkurang drastis.
2. Diameter pipa yang efektif untuk membangkitkan daya pada modul pembangkit listrik OTEC 25 MW adalah 3.2 m.
3. Rata – rata daya yang dihasilkan per bulan adalah 100.700 MW/bulan , untuk *multiple pipe* dengan diameter 3.5 m maka rata – rata daya yang dihasilkan adalah 96.5 MW/bulan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Avery, W. H. and Wu, Chih. 1994. *Renewable energy from the ocean : a guide to OTEC*. Oxford University Press, Inc. New York.
2. General Electric. 1983. *Closed cycle OTEC power plant final report*. General Electric Co., Schenectady, N.Y.
3. Google.com. 2009. "Tabel Property Ammonia". Diakses pada tanggal 1 November 2009. [www.engineeringtoolbox.com/ammonia-d\\_971.html](http://www.engineeringtoolbox.com/ammonia-d_971.html).
4. Kaye&Laby.2009. "Seawater Properties". Diakses pada tanggal 1 November2009.[www.kayelaby.npl.co.uk/general\\_physics/2\\_7/2\\_7\\_9.html](http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_7/2_7_9.html)
5. NASA. 2009. "Seawater Temperature Distribution". Diakses pada tanggal 1 November 2009. Google Earth.
6. OCEES. 2002. *Carilec Ocean Energy Conference.*"OTEC : Status Of Systems Technology"
7. PT. Colano Energy. 2009. "Spesifikasi Pembangkit Listrik OTEC". Jakarta.
8. Rahman, Y. 2008. *OTEC : Ocean Thermal Energy Conversion*. Institut Teknologi Bandung Press. Bandung.
9. Talley, Lynne. 2000. "SIO 210 Talley Topic 2: Properties of seawater". Diakses pada tanggal 1 Desember 2009. [sam.ucsd.edu/sio210/lect\\_2/lecture\\_2.html](http://sam.ucsd.edu/sio210/lect_2/lecture_2.html).
10. Sims, Calvin. 1986. *Steam System May Improve Power Plant*. Cambridge University Press. Cambridge.
11. Wu, Chih. 1987. "A performance bound for real OTEC heat engines". *Ocean engineering*, 24,349.
12. [Wikipedia. 2009](http://en.wikipedia.org/wiki/2009). "Rankine Cycle" Diakses 10 November 2009. [http://en.wikipedia.org/wiki/Rankine\\_cycle](http://en.wikipedia.org/wiki/Rankine_cycle).
13. Yeh, Rong-Hua and Su, Tar-Zen. 2004. "Maximum output of an OTEC power plant." Marine Engineering Department. National Taiwan Ocean University. Taiwan.