

# MATEMATIKA BOILER PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA OTEC (OCEANS THERMAL ENERGY CONVERSION)

Andi Hendrawan<sup>1)\*</sup>, Lusiani<sup>2)</sup>, Sri Pramono<sup>3)</sup>

<sup>1,2</sup> Akademi Maritim Nusantara, <sup>3</sup> Universitas Ivet

email: <sup>1)</sup>[andi\\_hendrawan@amn.ac.id](mailto:andi_hendrawan@amn.ac.id), <sup>2)</sup>[lusiani@amn.ac.id](mailto:lusiani@amn.ac.id), <sup>3)</sup>[sri\\_pramono@ivet.ac.id](mailto:sri_pramono@ivet.ac.id)

## Abstrak

*An OTEC (Oceans Thermal Energy Conversion) power plant is a type of renewable energy that uses surface heat as a heating medium which can later drive a turbine and eventually generate electricity. using ammonia. This research is a library research that is embodied in a mathematical solution so that the output is a mathematical solution for an OTEC power plant. In this paper, what is discussed is mathematics in OTEC boilers or boilers. The results show that the mathematical equations in the OTEC boiler consider several variables, including seawater heat, changes in working fluid whose output is electrical power.*

**Kata Kunci:** Boiler, Math, OTEC

## PENDAHULUAN

Dihadapkan pada sederet masalah akibat konsumsi energi fosil, tion, banyak negara sedang giat mengembangkan energi alternatif baru. Teknologi konversi energi panas laut (OTEC) yang diusulkan oleh French D'Arsonval telah menarik banyak perhatian karena energi panas laut memiliki karakteristik cadangan yang besar, terbarukan, berkelanjutan dan tidak ada polusi. Claude berhasil melakukan percobaan OTEC pada tahun 1926. Kemudian banyak sarjana telah melakukan penelitian tentang OTEC, termasuk pilihan fluida kerja (WFs), optimasi parameter, analisis kinerja dan produksi hidrogen. Sistem OTEC di atas mengadopsi siklus Rankine organik tekanan tunggal (SPORC), yang memiliki banyak kehilangan eksergi karena suhu sumber panas (HST) dan suhu WF dalam proses penguapan tidak cocok (Wu et al., 2019).

Pada tahun 2015, emisi CO<sub>2</sub> akibat pembangkitan energi dan produksi panas mencapai 13.540 juta ton. Upaya yang harus dilakukan untuk menurunkan angka ini, terutama untuk

memenuhi tujuan Kesepakatan Paris untuk membatasi pemanasan global di bawah 2 C. Oleh karena itu, perlu dikembangkan energi terbarukan yang belum cukup terwakili dalam bauran energi saat ini. Kelemahan dari sebagian besar energi terbarukan yang diterapkan adalah intermittensinya, oleh karena itu, mereka tidak dapat digunakan untuk kebutuhan energi beban dasar tanpa terobosan sistem penyimpanan. Namun, untuk menghasilkan listrik, konversi energi panas laut (OTEC) menggunakan perbedaan antara suhu air laut permukaan dan suhu air laut dalam di daerah tropis. Karena daerah tersebut menyajikan perubahan suhu yang sangat rendah sepanjang tahun, pembangkit listrik yang stabil dapat dicapai. Apalagi OTEC memiliki potensi yang sangat besar, karena sumber dayanya diperkirakan maksimal 7 TW dari produksi energi bersih. Selain pembangkit listrik, dimungkinkan dengan sistem seperti itu untuk menghasilkan air tawar menggunakan air laut yang hangat (Fontaine et al., 2019).

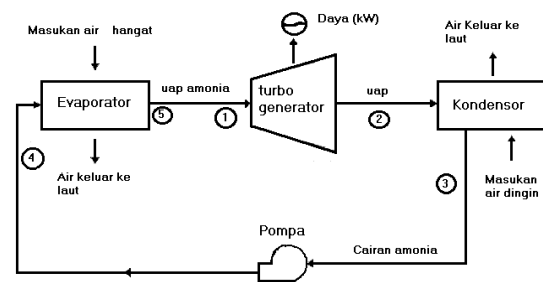
Pada OTEC, temperature merupakan yang terpenting karena distribusi temperature permukaan menjadi sumber energy. Energi Terbarukan Zalir kerja merupakan bagian terpenting dalam system pembangkit OTEC, Energi terbaru menjadi sangat tidak populer karena keberadaan yang dipandang kurang ekonomis dan teknologi yang digunakan kurang efisien. Energi yang laut yang melimpah dibiarkan begitu saja, hal ini bisa dimengerti karena keberadaan energi fosil yang masih mencukup hingga saat ini. Energi terbarukan menjadi sangat dibutuhkan mungkin jika energi fosil mencapai ambang kelangkaan (Hendrawan et al., 2018). Pada tahun 1981 OTEC di Nauru dibangun oleh Tokyo Electric Power Service Company dan Tokyo Electric Company. Sedangkan Kyusu Elektrik Company mengembangkan OTEC yang berdaya keluaran 50 kW. Pada Tahun 1985 Universitas Saga mengadakan percobaan dengan mengoperasikan OTEC yang berkekuatan 75 kW. Herue, Carmelo [1988] pada tahun 1988 Pilipina mengadakan penelitian tentang studi kelayakan pembangunan OTEC di Pilipina dan merancang OTEC dengan metoda daur terbuka. Khan, Kenneth [2003] mengatakan bahwa penggunaan zalir campuran antara propana dan amoniak meningkatkan efisiensi pembangkitan hingga 7 % (Andi Hendrawan, 2019b, 2020b).

Penentuan jenis dan rancang boiler menjadi masalah utama sehingga pada rancang pembangkit OTEC. Matematika boiler pada pembangkit listrik tenaga OTEC menjadi salah satu pertimbangan. Perhitungan secara matematis sebagai langkah awal untuk menjadi sebuah pemodelan matematika OTEC.

## KAJIAN LITERATUR

Teknologi OTEC, dalam prosesnya untuk menghasilkan energi listrik

menggunakan perbedaan suhu antara perairan hangat di permukaan laut dan perairan dingin yang dalam. Laut menyajikan perairan dengan suhu rendah pada kedalaman antara 800 m sampai dengan 1000 m dari permukaan laut. Umumnya, OTEC beroperasi dengan perbedaan suhu sekitar 20°C atau lebih. Suhu pada kedalaman 1000m relatif konstan, mencapai sekitar 4°C. Ini berarti bahwa OTEC sangat cocok untuk suhu lingkungan rata-rata sekitar 25°C (Tenorio et al., 2019). Pada Gambar 1 diperlihatkan Skema OTEC.



**Gambar 1.** Skema OTEC Daur Tertutup

Pembangkitan listrik adalah proses konversi energi yang mengubah energi panas dari pembakaran bahan bakar fosil atau fisi uranium menjadi listrik. Selama proses konversi energi, panas berpindah dari reservoir panas suhu tinggi ke reservoir panas suhu rendah. Konsep dasar OTEC adalah menggunakan air laut permukaan yang hangat dan DO dingin. Ini adalah dua reservoir panas yang diperlukan (Liu, 2018). Dalam sistem loop tertutup untuk menguapkan amonia, permukaan air laut yang hangat digunakan, dan uap mengalir melalui pipa untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan tenaga melalui generator listrik. (Andi Hendrawan, 2019c). Uap dari knalpot turbin diuapkan oleh kondensor menggunakan busa air pada suhu sekitar 5 oC. kemudian amonia cair dipompa kembali ke evaporator untuk diuapkan kembali menggunakan air permukaan laut yang hangat, dan seterusnya (Andi Hendrawan, 2019a).

Pilihan lainnya adalah menggabungkan kedua proses tersebut menjadi hibrida siklus terbuka / siklus tertutup, yang dapat menghasilkan listrik dan air desalinasi secara lebih efisien((Andi Hendrawan et al., 2018). Dalam sistem OTEC hibrida, air laut yang hangat dapat memasuki ruang hampa di mana ia akan diuapkan dengan cepat menjadi uap, dengan cara yang mirip dengan proses penguapan siklus terbuka. Uap atau air hangat kemudian mungkin melewati evaporator untuk menguapkan fluida kerja dari loop siklus tertutup. Cairan yang menguap kemudian akan menggerakkan turbin untuk menghasilkan listrik, sedangkan uap akan terkondensasi di dalam kondensor untuk menghasilkan air desalinasi(A Hendrawan, 2021).

**METODE PENELITIAN**

Metode penelitian yang dipergunakan adalah metode

kepuustakaan berdasarkan rekam jejak penelitian terdahulu. Penyelesaian matematis berdasarkan literature terdahulu yang berbasis pada teknologi OTEC.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Analisis matematika pada boiler ditentukan oleh variabel yang cukup banyak. Hal ini seperti bagian boiler terdiri dari:

1. *shell* (kulit) yang terdiri dari diameter dalam (*inside diameter*) ID, *Baffle space* dan *passes*.
2. tube: jumlah tube, OD (*out diameter*), BWG, pith.

Hal yang menentukan persamaan matematis antara lain neraca panas, suhu masuk dan keluar pada aliran panas dan aliran dingin. Langkah pertama dalam membuat persamaan matematis adalah dengan menentukan nilai LMTD (*Log Mean Temperature Difference*).

**Tabel 1.**

Aliran panas		Aliran dingin	Beda
T <sub>1</sub>	Suhu tinggi	t <sub>2</sub>	t <sub>d1</sub> = T <sub>1</sub> - t <sub>2</sub>
T <sub>2</sub>	Suhu rendah	t <sub>1</sub>	t <sub>d2</sub> = T <sub>2</sub> - t <sub>1</sub>
T <sub>1</sub> -T <sub>2</sub>	Perbedaan	t <sub>2</sub> -t <sub>1</sub>	t <sub>d1</sub> - t <sub>d2</sub>

$$LMTD = \frac{t_{d2} - t_{d1}}{2,3 \log t_{d2} / t_{d1}} \dots\dots\dots(1)$$

dengan:  
LMTD = Log Mean Temperature Difference;

t<sub>d2</sub> = beda temperatur pada suhu rendah (°F);

t<sub>d1</sub> = beda temperatur pada suhu tinggi (°F);

kemudian kita menghitung grup suhu(Andi Hendrawan, 2002):

$$R = \frac{\int_{T_1}^{T_2} TdT}{\int_{t_1}^{t_2} tdt} \dots\dots\dots(2)$$

R merupakan integral perbandingan suhu tinggi.

$$S = \frac{t_{-1} - t_{-2}}{T_1 - t_{-2}} \dots\dots\dots(3)$$

dengan:  
T<sub>1</sub> = temperatur pada suhu tinggi aliran panas (°F);  
T<sub>2</sub> = temperatur pada suhu rendah aliran panas (°F);

$t_{-1}$  = temperatur pada suhu rendah aliran dingin ( $^{\circ}\text{F}$ );  
 $t_{-2}$  = temperatur pada suhu tinggi aliran dingin ( $^{\circ}\text{F}$ );  
 Dengan nilai R dan S (temperatur Grup) ditentukan  $F_T$  untuk menghitung delta t.

$$\Delta t = F_T \times LMTD$$

$F_T$  berdasar pembacaan grafik (Kern, 1950).

Zalir panas pada shell (kulit) dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$a_s = \frac{ID \times C \times B}{144 \times P_t} \dots\dots(4)$$

dengan :

- $a_s$  = luas aliran pada (*shell*) kulit ( $\text{ft}^2$ );
- $ID$  = diameter dalam (*inside diameter*) (*in*);
- $C$  = rongga antar tube (*clereance*) (*in*);
- $B$  = Baffle spacing (*in*);
- $P_t$  = tube Pith (*in*);

$$\dots\dots G_t = \frac{W}{a_t} \dots\dots(5)$$

dengan :

- $G_s$  = kecepatan masa ( $\text{lbm}/\text{dt}$ );
  - $W$  = kecepatan aliran berat pada zalir panas ( $\text{lb}/\text{dt}$ );
- kemudian dihitung bilangan Reynold dengan rumus:

$$Re_s = \frac{D_e \times G_s}{\mu} \dots\dots(6)$$

dengan :

- $Re_s$  = bilangan Reynold;
- $D_e$  = diameter ekivelen ( $\text{ft}$ )
- $\mu$  = viskositas ( $\text{lb}/\text{ft}\cdot\text{hr}$ )

Hasil perhitungan bilangan Reynold ini digunakan untuk menghitung nilai  $J_H$  dengan membaca grafik (Kern, 1950). Kemudian ditentukan  $h_o$  dengan rumus:

$$h_o = J_H \frac{k}{D} \left( \frac{c\mu}{k} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \dots\dots(7)$$

dengan:

- $k$  = konduktivitas panas ( $\text{BTU}/\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^{\circ}\text{F}/\text{ft}$ )
- $h_o$  = koefisien film (*film coefficient outside bundle*) ( $\text{BTU}/\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^{\circ}\text{F}/\text{ft}$ )
- $D$  = diameter ( $\text{ft}$ )
- $c$  = panas jenis ( $\text{BTU}/\text{lb}\cdot^{\circ}\text{F}$ )
- $\mu$  = viskositas ( $\text{lb}/\text{ft}\cdot\text{hr}$ )
- $\mu_w$  = viskositas pada dinding tabung ( $\text{lb}/\text{ft}\cdot\text{hr}$ )
- $J_H$  = nilai pembacaan pada kurva perpindahan panas (Kern, 1955)

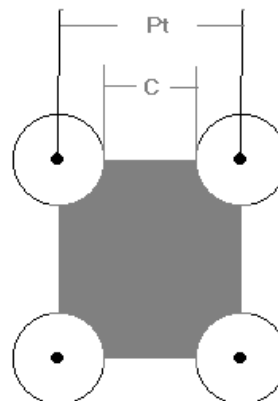
Untuk zalir dingin pada tube:

$$a_t = \frac{N_t \times a_t'}{144 \times n} \dots\dots(8)$$

dengan :

- $a_t'$  = luas aliran per tube ( $\text{ft}^2$ );
- $a_t$  = luas aliran per panjang  $\text{ft}^2$ ;
- $n$  = passes;

Kemudian ditentukan  $G_t$  dan bilangan Reynold sehingga seperti dalam zalir panas dapat ditentukan  $h_i$  dengan menggunakan rumus yang sama.



Gambar 2. Pith dan Clereance

$$G_t = \frac{W}{a_t} \dots\dots(9)$$

dengan:

$G_t$  = kecepatan massa pada tabung (lb/ft<sup>2</sup>.hr);

$W$  = kecepatan aliran berat pada zalir panas(lb/hr);

kemudian dihitung bilangan Reynold dengan rumus:

$$Re_t = \frac{D_e \times G_s}{\mu} \dots\dots\dots(10)$$

dengan:

$Re_s$  = bilangan Reynold;

$D_e$  = diameter ekivelen (ft)

$\mu$  = viskositas (lb/ft.hr)

Hasil perhitungan bilangan Reynold ini digunakan untuk menghitung nilai  $J_H$  dengan membaca grafik (Kern, 1950).

Kemudian mentukan  $h_o$  dengan rumus:

$$h_o = J_{Ht} \frac{k}{D} \left( \frac{c\mu}{k} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \dots\dots(11)$$

dengan:

$k$ = konduktivitas panas (BTU/hr.ft<sup>2</sup>.°F/ft)

$h_o$ = koefisien film (BTU/hr.ft<sup>2</sup>.°F/ft)

$D$ = diameter (ft)

$c$ = panas jenis (BTU/lb.°F)

$\mu$ = viskositas (lb/ft.hr)

$\mu_w$ = viskositas pada dinding tabung(lb/ft.hr)

Setelah  $h_o$  dan  $h_i$  diketahui kemudian menentukan  $h_{oi}$  dengan menggunakan rumus:

$$h_{oi} = \frac{h_i \times ID}{OD} \dots\dots(12)$$

Kemudian ditentukan faktor  $U_o$ :

$$U_o = \frac{h_{io} h_o}{h_{io} - h_o}$$

$$A = a'' \times L \times N \dots\dots\dots(13)$$

dengan:

$a''$  = luas permukaan per panjang (ft<sup>2</sup>);

$N$  = n jumlah tube;

$A$  = Luas permukaan pemindahan panas (ft<sup>2</sup>);

Untuk menghitung  $U_D$  digunakan persamaan sebagai berikut:

$$U_D = \frac{Q}{A \times \Delta t} \dots\dots\dots(14)$$

dengan :

$U_D$  = Overall Koefisien(BTU/ft<sup>2</sup>.°F);

$Q$  = keseimbangan panas (BTU);

$\Delta t$  = perbedaan suhu (°F).

Kemudian dihitung faktor Dirk:

$$R_D = \frac{U_C - U_D}{U_C \times U_D} \dots\dots\dots(15)$$

Harga faktor dirk inilah yang menentukan sebuah rancangan itu layak atau tidak, untuk OTEC nilai  $R_D$  yang dikehendaki < 0,0002 jam ft<sup>2</sup> °F/Btu. Faktor dirk sangat menentukan karena fakot inilah yang mementukan sebuah rancangan boiler layak atau tidak(Andi Hendrawan, 2017b).

1. Panas yang masuk pada Main uap

$$Q = W_1 (h_1 - h_2) \dots\dots\dots(16)$$

Keterangan :

$W_1$  = Aliran uap yang dihasilkan

$h_1$  = Enthalpi uap superheater outlet

$h_2$  = Enthalpi feedwater masuk economizer

Panas yang masuk pada aliran Reheat

$$Q = W_3 (h_3 - h_4) \dots\dots\dots(17)$$

Keterangan :

$W_3$  = Aliran reheater steam

$h_3$  = Enthalpi uap pada reheat outlet

$h_4$  = Enthalpi uap pada reheat inlet

Pada pengujian boiler yang dilakukan oleh (Andi Hendrawan et al., 2022) di hasilkan persamaan daya dan suhu sebagai berikut:

$$P = 0,321T + 12, \\ 246.....(18)$$

Dengan

$$P = \text{Daya output (watt)} \\ T = \text{suhu (}^{\circ}\text{C)}$$

Pada perubahan tekanan boiler menghasilkan persamaan seperti pada persamaan 19

$$P = 0,396Ps + \\ 20.146.....(19)$$

$P = \text{Daya output (watt)}$

## REFERENSI

- Fontaine, K., Yasunaga, T., & Ikegami, Y. (2019). OTEC maximum net power output using carnot cycle and application to simplify heat exchanger selection. *Entropy*, 21(12). <https://doi.org/10.3390/e21121143>
- Hendrawan, A. (2002). Model Program Aplikasi Pembangkit listrik Tenaga Panas Laut : Oceans thermal energy conversion. *TESIS S-2 UGM* <https://repository.ugm.ac.id/id/eprint/58007>.
- Hendrawan, A. (2017a). Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga OTEC (Ocean Thermal Energi Conversion) Wilayah Kalianget Donan Cilacap. *Bahari Jogja*, XV, 66–79.
- Hendrawan, A. (2017b). KAJIAN TEKNOEKONOMI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA OTEC (OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION). *Prosiding Seminar Nasional&CFP I IDRI*, 1–13.
- Hendrawan, A. (2019a). CALCULATION OF POWER PUMPS ON OTEC POWER PLANT OCEAN ( OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION ). *International Journal of Innovation, Creativity and Change.*, 5(3), 353=369.
- Hendrawan, A. (2019b). KONSEP KAPAL DENGAN TENAGA OTEC (OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION). *Seminar Nasional Maritim Politeknik Bumi Akpelni*, 1–5.
- Hendrawan, A. (2019c). Ocean thermal energy conversion. *SNATPIP 2019*, 1–9.
- Hendrawan, A. (2019d). Pertimbangan Lingkungan pada Pembangkit Listrik Tenaga OTEC (Ocean Thermal Energi Conversion). *The 10th University Research Colloquium 2019 Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Muhammadiyah Gombong Pertimbangan*, 2(2), 19–27.
- Hendrawan, A. (2020a). DAMPAK SOSIAL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA OTEC ( OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION ). *Seminar Nasioanl*

$P_s = \text{Tekanan (N)}$

Pada boiler daya yang keluar sangat bergantung pada suhu dan tekanan yang dihasilkan pada sistem(Andi Hendrawan, 2017a, 2019d). Dampak dari teknologi OTEC cenderung minim karena tidak mneghasilkan limbah dan aktivitasnya(Andi Hendrawan, 2020a)

## KESIMPULAN

Peramaan matematis merupakan langkah awal dalam desain pembangkit tenaga OTEC. Hasil dari persamaan ini masih bisa diperdebatkan karena setiap periset mempunyai sudut pandang yang berbeda. Nilai yang dihasilkan sangat bergantung pada variabel daya yang akan dihasilkan.

*Kemaritiman Peliteknik Bumi Akpelni Semarang Agustus 2020.*

- Hendrawan, A. (2020b). PERPINDAHAN PANAS PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA OTEC (OCEAN THERMAL ENERGI CONVERSION). *Seminar Nasional Kemaritimn Semarang, 18 Juli 2020 . Universitas Maritim AMNI 1.*
- Hendrawan, A. (2021). Sistem Hibrida Pada Pembangkit Listrik Tenga Panas Laut (Ocean Thermal Energy Conversion). *Proceeding of The URECOL, June, 1–5.* <http://repository.urecol.org/index.php/proceeding/article/download/1267/1234>
- Hendrawan, A., Lusiani, & Arissasongko. (2018). ANALISIS ZALIR KERA PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA OTEC (OCEAN THERMAL ENERGI CONVERSION). *Jurnal Sainlara, 2(2).*
- Hendrawan, A., Pratomo, L. H., Pramomo, S., & Lusiani, L. (2022). Pengujian Boiler untuk Pembangkit Listrik Tenaga Panas Laut. *Saintara : Jurnal Ilmiah Imu-Ilmu Maritim, 6(1).*
- Liu, C. C. K. (2018). Ocean thermal energy conversion and open ocean mariculture: The prospect of Mainland-Taiwan collaborative research and development. *Sustainable Environment Research, 28(6), 267–273.* <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.06.002>
- Tenorio, G. L., James, A., Ortega, M. D. L. A., & Jurado, F. (2019). OTEC alternative for the electric power generation in Panama. *Proceedings - 2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference, IESTEC 2019, 197–202.* <https://doi.org/10.1109/IESTEC46403.2019.00-76>
- Wu, Z., Feng, H., Chen, L., Xie, Z., Cai, C., & Xia, S. (2019). Optimal design of dual-pressure turbine in OTEC system based on constructal theory. *Energy Conversion and Management, 201(October), 112179.* <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112179>