

Potensi OTEC Sebagai Sumber Energi Bersih Masa Depan IKN Menuju Pembangunan Berkelanjutan

Mirda Prisma Wijayanto* dan Zulfa Siti Zakia

*Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jenderal Soedirman
Jl. Dr. Soeparno no.61 Purwokerto, Jawa Tengah, 53122, Indonesia
Email: mirda.foundation@gmail.com*

Abstrak

Peningkatan suhu permukaan air laut telah membuka peluang inovasi bagi para peneliti untuk mengembangkan sumber energi bersih baru yang bersumber dari panas laut yang dikenal sebagai *Ocean Thermal Energy Conversion* (OTEC). Dalam penelitian ini dianalisis potensi OTEC sebagai energi bersih baru di Indonesia. Sebagai batasan penelitian, sasaran implementasi OTEC dipilih di wilayah perairan Kalimantan Timur yang merupakan lokasi terdekat dengan Ibu Kota Nusantara (IKN). Pembahasan dalam penelitian ini meliputi analisis karakteristik suhu permukaan laut, analisis pembangkit energi, dan analisis ekologi dari pembangunan OTEC. Berdasarkan karakteristik suhu permukaan laut, didapatkan bahwa nilai efisiensi rata – rata OTEC adalah 6,95%. Berdasarkan analisis pembangkitan energi didapatkan bahwa OTEC di perairan Kalimantan Timur berpotensi menghasilkan daya listrik sebesar 7.720 kW dengan total biaya produksi sebesar Rp526,29/kWh. Berdasarkan analisis ekologi, didapatkan bahwa salah satu dampak negatif pembangunan OTEC adalah pembuangan air laut yang kaya nutrisi dalam volume besar berpotensi menimbulkan fenomena ganggang mekar sehingga dapat menyebabkan kematian massal bagi ikan dan biota laut lainnya. Kedepannya, OTEC diharapkan dapat menjadi salah satu sumber energi bersih baru bagi IKN di masa depan menuju pembangunan berkelanjutan.

Kata kunci: OTEC, Energi Panas Laut, IKN

Abstract

The Potential of OTEC as the Future Clean Energy Source of IKN Towards Sustainable Development

The increase in sea surface temperature has opened up innovation opportunities for researchers to develop new clean energy sources derived from ocean heat known as Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). This study analyzes the potential of OTEC as a new clean energy in Indonesia. As a research limitation, the OTEC implementation target was chosen in the waters of East Kalimantan, which is the closest location to the Capital City of the Archipelago (IKN). The discussion in this study includes analysis of sea surface temperature characteristics, energy generation analysis, and ecological analysis of OTEC development. Based on the characteristics of sea surface temperature, it is found that the average efficiency value of OTEC is 6.95%. Based on the energy generation analysis, it is found that OTEC in East Kalimantan waters has the potential to produce 7,720 kW of electric power with a total production cost of Rp526.29/kWh. Based on ecological analysis, it is found that one of the negative impacts of OTEC development is the discharge of nutrient-rich seawater in large volumes, which has the potential to cause algal blooms, which can cause mass mortality of fish and other marine life. In the future, OTEC is expected to become one of the new clean energy sources for IKN in the future towards sustainable development goals.

Keywords: OTEC, Ocean Thermal Energy, IKN

PENDAHULUAN

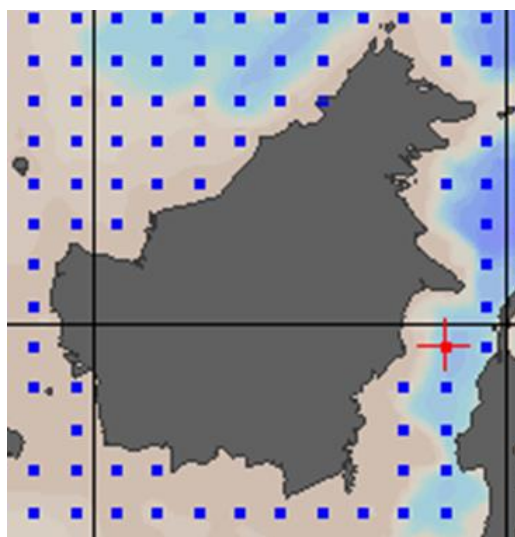
Dalam laporan yang dirilis *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) di Glasgow tahun 2021, disebutkan bahwa suhu bumi meningkat sangat signifikan dalam lima dekade terakhir, terutama karena faktor manusia (antropogenik). Peningkatan suhu bumi juga disertai dengan peningkatan emisi gas karbon dioksida (CO₂) yang merupakan faktor pendorong utama dibalik meningkatnya ancaman pemanasan global. Menurut Copernicus Uni Eropa (C3S) konsentrasi CO₂ di atmosfer mencapai 414,3 ppm pada tahun 2021, naik sekitar 2,4 ppm dari tahun 2020. Jika tren kenaikan konsentrasi CO₂ di atmosfer terus berlanjut, ancaman perubahan iklim akan menjadi lebih menakutkan di masa depan. Sebagai upaya preventif untuk menanggulangi dampak perubahan iklim, IKN yang terletak di Provinsi Kalimantan Timur berkomitmen untuk mencapai dan

mengelola berbagai indikator pembangunan berkelanjutan menuju net zero carbon dan 100 persen energi bersih di tahun 2060 (Agustina, 2024).

Sebagai negara maritim, Indonesia memiliki potensi energi bersih bersumber dari laut yang sangat besar. Menurut Asosiasi Energi Laut Indonesia (ASELI), terdapat beberapa jenis sumber daya energi yang berasal dari laut di antaranya energi pasang surut, energi gelombang laut, dan energi panas laut atau yang dikenal sebagai OTEC. Merujuk pada Abror *et al.* (2022), energi pasang surut memiliki potensi teoritis 160 GW, potensi teknis 22,5 GW, dan potensi praktis 4,8 GW. Energi gelombang laut memiliki potensi teoritis 510 GW, potensi teknis 2 GW, dan potensi praktis 1,2 GW (Nagifea *et al.*, 2022). Sedangkan OTEC memiliki potensi teoritis 57 GW, potensi teknis 52 GW, dan potensi praktis 43 GW (Fadlillah *et al.*, 2023). Berdasarkan data tersebut dapat disimpulkan bahwa OTEC merupakan sumber daya laut yang paling berpotensi untuk dikembangkan sebagai energi bersih karena memiliki potensi praktis yang lebih besar daripada sumber daya laut lainnya. Melihat tingginya potensi energi yang dapat dihasilkan, penelitian mengenai OTEC di Indonesia terus dilakukan diantaranya oleh Putri & Fadilah (2023), Andayani *et al.* (2020), Hammad *et al.* (2020), Julianto (2020), Aprilia *et al.* (2019), Andrawina *et al.* (2016), Koto & Negara (2016), dan berbagai penelitian didalamnya.

OTEC merupakan sistem pembangkit energi yang bekerja dengan memanfaatkan perbedaan suhu antara air hangat di permukaan laut dengan air yang lebih dingin di kedalaman laut tertentu (Rose, 1985). Merujuk pada Morales *et al.* (2014), nilai minimal dari selisih suhu permukaan laut dengan suhu pada kedalaman tertentu untuk membangkitkan energi listrik oleh sistem OTEC adalah 20 K. Perbedaan suhu tersebut dapat dicapai di wilayah perairan laut kawasan tropis maupun subtropis yang mendapatkan intensitas penyinaran matahari yang cukup besar, dimana semakin mendekati ekuator perbedaan suhu antara permukaan dan kedalaman laut akan semakin tinggi sehingga energi listrik yang dihasilkan akan semakin besar. Salah satu wilayah perairan Indonesia yang berada dekat dengan garis ekuator adalah wilayah perairan laut Provinsi Kalimantan Timur. Dengan demikian, dapat diberikan hipotesis bahwa wilayah perairan laut tersebut merupakan wilayah yang cukup berpotensi untuk mengimplementasikan OTEC.

Dalam penelitian ini akan dianalisis potensi energi listrik yang dapat dihasilkan oleh OTEC di wilayah perairan laut Kalimantan Timur. Novelti dalam penelitian ini meliputi kajian analisis praimplementasi, analisis implementasi, serta analisis pascaimplementasi OTEC. Dalam analisis praimplementasi akan dibahas karakteristik suhu perairan laut dan efisiensi OTEC, dalam analisis implementasi akan dibahas mekanisme pembangkitan energi listrik serta biaya produksi energi listrik. Terakhir, dalam analisis pascaimplementasi akan dibahas dampak lingkungan dari pembangunan OTEC. Hasil penelitian ini dapat menjadi bahan literasi ilmiah mengenai OTEC sebagai sumber energi bersih. Lebih lanjut, diharapkan OTEC dapat dikembangkan dan diimplementasikan sebagai sumber energi bersih bagi IKN di masa mendatang.



Gambar 1. Tampilan ODV di wilayah perairan laut Pulau Kalimantan. Titik warna biru menunjukkan lokasi stasiun yang dapat digunakan. Titik warna merah menunjukkan lokasi stasiun yang dipilih yaitu stasiun 22085.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini merupakan jenis penelitian kuantitatif di bidang energi. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kuantitatif. Penelitian ini menggunakan data suhu air laut pada permukaan serta pada kedalaman 450 meter pada bulan Januari hingga Desember yang didapatkan dari *World Ocean Atlas* (WOA) 2018 dengan resolusi spasial 1° dan resolusi temporal bulanan.

Berdasarkan penelitian terdahulu oleh Morales (2014), dijelaskan bahwa OTEC dapat dibangkitkan apabila selisih suhu minimal antara permukaan dengan kedalaman tertentu adalah 20 K. Agar memenuhi syarat tersebut, maka dipilih kedalaman 450 meter. Data suhu permukaan serta suhu pada kedalaman 450 meter tersebut diunduh dari <https://odv.awi.de/data/ocean/world-ocean-atlas-2018/> per tanggal 8 Juli 2024. Pengolahan data dilakukan menggunakan aplikasi ODV (*Ocean Data View*) versi 5.6.2.

Lokasi penelitian adalah perairan laut Kalimantan Timur. Sebagai batasan penelitian, titik pengambilan data dilakukan pada stasiun 22085 yang terletak pada koordinat $118,5^\circ\text{E}/0,5^\circ\text{S}$, dengan pertimbangan bahwa stasiun tersebut merupakan stasiun terdekat dari garis pantai Provinsi Kalimantan Timur. Lokasi stasiun 22085 ditunjukkan oleh titik warna merah seperti terlihat pada Gambar 1.

Tahapan dalam pemerolehan data terbagi menjadi tiga tahap yaitu menghitung efisiensi OTEC, menghitung nilai parameter pembangkit listrik tenaga OTEC, dan menghitung biaya produksi energi listrik oleh OTEC.

Perhitungan Efisiensi OTEC

Langkah – langkah menghitung efisiensi OTEC meliputi: Melakukan pencatatan data suhu permukaan laut (kedalaman 0 meter), serta suhu pada kedalaman 450 meter yang dapat dilihat pada aplikasi ODV. Merubah satuan data suhu (T) ke dalam satuan Kelvin. Menghitung selisih suhu permukaan dengan suhu pada kedalaman 450 meter dengan rumus:

$$\Delta T = T_p - T_h,$$

dimana ΔT = selisih suhu; T_p = suhu air laut di permukaan (kedalaman 0 meter) dalam satuan kelvin; T_h = suhu air laut pada kedalaman tertentu. Perhitungan selisih suhu dilakukan untuk menentukan syarat OTEC dapat dibangkitkan. Dalam penelitian terdahulu oleh Julianto (2020), dijelaskan bahwa OTEC dapat dibangkitkan apabila selisih suhu minimal antara permukaan dengan kedalaman tertentu adalah 20 K. Selanjutnya, menghitung efisiensi (η) OTEC dengan rumus:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_p} \times 100\%$$

Perhitungan Parameter Pembangkit Energi Listrik OTEC

Dalam penelitian ini ditinjau mekanisme pembangkit energi listrik oleh OTEC siklus terbuka. OTEC siklus terbuka merupakan OTEC yang menggunakan air laut sebagai fluida kerja. Merujuk pada Rose (1985), dalam OTEC siklus terbuka air laut hangat dari permukaan dipompa lalu dialirkan ke ruang hampa udara. Dalam ruang tersebut air laut hangat akan menguap karena tekanan yang rendah. Uap air dari hasil penguapan tersebut kemudian akan menggerakkan turbin dan turbin akan menggerakkan generator untuk menghasilkan energi listrik. Setelah uap air melewati turbin, ia akan diarahkan ke kondensator, dalam kondensator ini dapat dihasilkan produk sampingan berupa air tawar yang dapat digunakan untuk keperluan bagi masyarakat.

Langkah – langkah menghitung parameter pembangkit energi listrik oleh OTEC siklus merujuk pada penelitian Julianto (2020), Riyanto (2017), serta Kato & Negara (2016) terbuka adalah sebagai berikut. Perhitungan efisiensi siklus Rankine, Dalam siklus terbuka, fluida kerja yang digunakan adalah air laut. Sebagai langkah pertama, air laut dengan volume V , suhu permukaan T_1 , dan tekanan P_1 dipompa ke dalam evaporator hingga mencapai tekanan P_2 . Dengan demikian, dapat ditentukan besar energi pada pompa sebagai berikut.

$$W_{PS} = (P_2 - P_1) \times V.$$

Jika efisiensi *flash* evaporator η_1 maka untuk menggerakkan *flash* evaporator dibutuhkan energi sebesar,

$$W_p = \frac{W_{PS}}{\eta_1}.$$

Jika entalpi di permukaan laut adalah H_a , maka entalpi air laut sebelum dipompa ke dalam evaporator,

$$H_1 = H_a + W_{PS}.$$

Entalpi fluida setelah dipompa ke dalam evaporator,

$$H_2 = H_1 + W_p.$$

Jika diasumsikan bahwa 1 kg massa air laut memiliki kalor jenis c , maka suhu air laut sebelum masuk ke dalam evaporator,

$$T_2 = T_1 + \frac{W_p - W_{PS}}{mc}.$$

Jika entalpi air laut pada suhu T_2 dan tekanan P_2 adalah H_b , maka energi panas yang dipindahkan ke evaporator per satuan berat,

$$Q_b = H_b - H_2.$$

Didefinisikan kapasitas panas spesifik C_a, C_f, C_{fg} , dimana masing – masing mendeskripsikan kapasitas panas spesifik fluida di permukaan, kapasitas panas spesifik fluida pada keadaan jenuh, dan perbedaan kapasitas panas spesifik antara uap jenuh dan fluida jenuh. Sehingga didapatkan,

$$C_x = \frac{C_a - C_f}{C_{fg}},$$

Selanjutnya, didefinisikan entalpi fluida pada keadaan jenuh H_f , serta perbedaan entalpi antara uap jenuh dan fluida jenuh H_{fg} yang memenuhi,

$$H_x = H_f + C_x H_{fg}.$$

Kerja yang dihasilkan oleh turbin,

$$W_{ts} = H_b - H_x.$$

Jika efisiensi turbin adalah η_2 , maka didapatkan,

$$W_t = \eta_2 \times W_{ts},$$

dan

$$H_c = H_b - W_t.$$

Terakhir, didapatkan efisiensi siklus Rankine.

$$\eta_3 = \frac{W_t - W_p}{Q_b}.$$

Selanjutnya, menghitung efisiensi turbin uap. Perubahan entalpi air laut akan dikonversi menjadi tenaga untuk menggerakkan turbin dengan kecepatan,

$$v_t = 44,72 \times \sqrt{H_b - H_c}.$$

Sudut *nozzle* turbin yang dipilih adalah $\theta = 15^\circ$. Dengan demikian, untuk mendapatkan efisiensi maksimal, kecepatan sudut turbin,

$$v_s = v_t \cos 15^\circ,$$

dan setengah kecepatan sudut turbin,

$$v'_s = \frac{1}{2} v_t \cos 15^\circ.$$

Efisiensi turbin uap dapat dihitung dengan rumus.

$$\eta_4 = \frac{2 \times v_s \times v'_s}{v_t^2}.$$

Menghitung daya turbin, merujuk pada penelitian terdahulu oleh Aprillia *et al.* (2019) dan Morales *et al.* (2014), jika diasumsikan jarak antar pembangkit OTEC 100 MW yang dibangun adalah 10 km, maka estimasi potensi daya listrik (P) yang dapat dibangkitkan oleh OTEC adalah sebesar $P = \eta_{OTEC} \times JS \times \frac{100 \text{ MW}}{10 \text{ km}}$. Untuk membangkitkan energi listrik tersebut, digunakan generator arus bolak balik (AC). Jika efisiensi generator adalah η_5 , maka daya listrik yang dapat dibangkitkan oleh OTEC.

$$P' = \frac{P}{\eta_5}.$$

Massa uap jenuh yang dibutuhkan per satuan waktu untuk mentransfer energi dari turbin adalah sebesar,

$$M_t = \frac{P'}{\eta_4 \times (W_t - W_p)}.$$

Daya poros turbin dapat dihitung dengan rumus.

$$P_t = \eta_4 \times W_t \times M_t.$$

Menghitung kapasitas evaporator dan kondensor. Energi panas yang diperlukan oleh evaporator untuk mencapai uap jenuh,

$$Q_{in} = Q_b \times M_t.$$

Kapasitas evaporator didefinisikan sebagai massa air panas yang dibutuhkan oleh evaporator, dapat dihitung dengan rumus,

$$m_{in} = \frac{Q_{in}}{c\Delta T}.$$

Energi panas yang harus dilepaskan dalam kondensor untuk mencapai titik semula adalah sebesar,

$$Q_c = H_c - H_1.$$

Energi panas yang harus dilepaskan oleh evaporator per satuan waktu ke dalam kondensor sebesar,

$$Q_{out} = Q_c \times M_t.$$

Kapasitas kondensor didefinisikan sebagai massa air dingin yang dibutuhkan oleh kondensor, dapat dihitung dengan rumus.

$$m_{out} = \frac{Q_{out}}{c\Delta T}.$$

Menghitung daya pompa air laut. Pertama, pompa air laut hangat digunakan panjang pipa l_1 . Jika air laut hangat dengan masa jenis ρ dan memiliki debit $\frac{Q_{in}}{t} = \frac{m_{in}}{\rho}$, mengalir dengan kecepatan v_p di dalam pipa berdiameter D , dengan faktor gesekan f , maka dapat dihitung daya pompa air laut hangat.

$$P_{in} = \frac{\frac{Q_{in}}{t} \times f \times l_1 \times v_p^2}{2D}.$$

Kedua, pompa air laut dingin digunakan panjang pipa l_2 . Jika air laut dingin dengan masa jenis ρ dan memiliki debit $\frac{Q_{out}}{t} = \frac{m_{out}}{\rho}$, mengalir dengan kecepatan v_p di dalam pipa berdiameter D , dengan faktor gesekan f , maka dapat dihitung daya pompa air laut dingin,

$$P_{out} = \frac{\frac{Q_{out}}{t} \times f \times l_2 \times v_p^2}{2D}.$$

Daya total pompa air laut didefinisikan sebagai jumlah dari daya total pompa air laut hangat (P_{in}) dan pompa air laut dingin (P_{out}) adalah,

$$P_{total} = P_{in} + P_{out}.$$

Perhitungan efisiensi pompa, pertama dihitung terlebih dahulu daya pompa hampa udara. Daya pompa hampa udara bernilai 10% dari daya listrik yang akan dibangkitkan, sehingga didapatkan

$$P_h = 10\% \times P.$$

Daya total yang dibutuhkan untuk menjalankan (*starting*) pembangkit listrik adalah

$$P_{st} = P_{total} + P_h.$$

Dengan demikian didapatkan efisiensi pompa sebesar

$$\eta_6 = \frac{P}{P + P_{st}} \times 100\%.$$

Perhitungan Biaya Produksi Energi Listrik oleh OTEC

Merujuk pada Hendrawan (2016) dan Luhur *et al.* (2013), perhitungan biaya produksi energi listrik oleh OTEC di perairan Kalimantan Timur dapat dilakukan dengan rumus sebagai berikut. Pertama, Perhitungan biaya modal (*capital cost*). Untuk menghitung biaya modal, terlebih dahulu dihitung biaya pembangunan dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Biaya pembangunan} = \frac{\text{biaya investasi}}{\text{kapasitas investasi}}$$

Dalam penelitian ini diasumsikan bahwa biaya investasi OTEC adalah sebesar USD 6.000.000. Selanjutnya, dihitung *Capital Recovery Factor (CRF)* dengan rumus:

$$CRF = \frac{[i(1+i)^n]}{[(1+i)^n - 1]}$$

dimana i merupakan suku bunga (%) dan n merupakan umur pembangkit (tahun). Jika diasumsikan bahwa suku bunga 10%, dan umur pembangkit adalah 20 tahun, maka didapatkan $CRF = 0,11$. Jumlah tenaga listrik (kWh) yang digunakan selama 24 jam/hari selama 365 hari dapat dihitung sebagai berikut:

$$kWh = \text{daya terpasang} \times \text{faktor kapasitas} \times 24 \frac{\text{jam}}{\text{hari}} \times 365 \text{ hari}$$

Tabel 1. Data suhu dan efisiensi OTEC

Bulan	Temperature (°K)	ΔT (°K)	η (%)
-------	------------------	-----------------	------------

	0 m	450 m		
Januari	302,11	281,04	21,07	6,97
Februari	301,26	280,97	20,29	6,74
Maret	302,05	281,12	20,93	6,93
April	302,37	281,09	21,28	7,04
Mei	302,07	281,11	20,96	6,94
Juni	302,33	281,22	21,11	6,98
Juli	301,96	281,18	20,78	6,88
Agustus	301,64	280,98	20,66	6,85
September	302,18	281,18	21,00	6,95
Oktober	302,42	280,97	21,45	7,09
November	302,08	280,86	21,22	7,02
Desember	302,12	280,96	21,16	7,00
Rata – rata	302,05	281,06	20,99	6,95

Dengan demikian, biaya modal (*capital cost*) atau *CC* dapat dihitung dengan rumus:

$$CC = \frac{\text{Biaya pembangunan} \times \text{kapasitas pembangkit} \times CRF}{\text{Jumlah pembangkit netto tenaga listrik}}$$

Kedua, Perhitungan total biaya pembangkit. Total biaya produksi pembangkit listrik dapat dihitung dengan rumus:

$$TC = CC + FC + OMC$$

dengan *CC*, *FC*, *OMC* masing-masing merupakan biaya modal (*capital cost*), biaya bahan bakar (*fixed cost*), dan biaya operasi serta perawatan. Dalam penelitian ini diasumsikan bahwa nilai *FC* adalah sebesar USD 0,0009/*kWh*, dan nilai *OMC* adalah sebesar USD 0,0003/*kWh*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan mengenai potensi OTEC meliputi analisis praimplementasi, analisis implementasi, dan analisis pascaimplementasi OTEC. Pada analisis praimplementasi akan dijelaskan karakteristik suhu dan analisis efisiensi OTEC di perairan laut Kalimantan Timur. Pada analisis implementasi akan dijelaskan mekanisme pembangkitan energi dan analisis biaya produksi energi listrik. Pada analisis pascaimplementasi akan dijelaskan dampak pembangunan OTEC terhadap lingkungan perairan laut Kalimantan Timur.

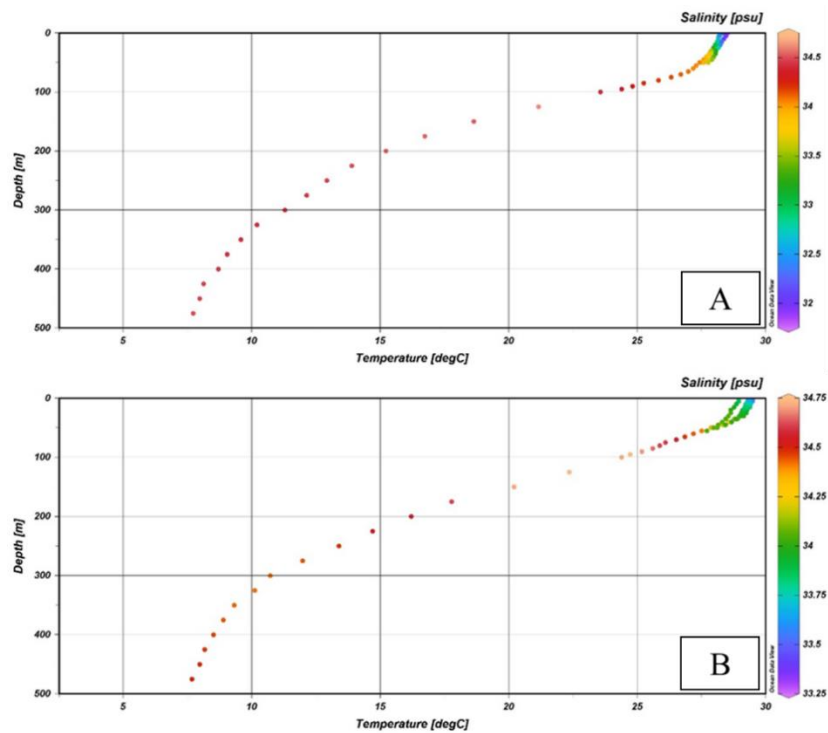
Analisis Karakteristik Suhu Perairan Laut dan Efisiensi OTEC

OTEC bekerja seperti mesin kalor yaitu dengan memanfaatkan perbedaan suhu permukaan laut dan suhu pada kedalaman tertentu untuk kemudian dikonversi menjadi energi listrik. Merujuk pada penelitian Morales (2014), sistem ini hanya dapat bekerja apabila selisih antara suhu permukaan dan kedalaman bernilai $\geq 20^{\circ}\text{C}$. Untuk memenuhi syarat tersebut, dipilih suhu pada kedalaman 450 m. Penelitian ini diawali dengan pengambilan data suhu permukaan laut dan suhu pada kedalaman 450 m pada stasiun 22085. Data suhu permukaan laut dan suhu pada kedalaman 450 m, serta nilai efisiensi OTEC di perairan laut Kalimantan Timur ditunjukkan pada Tabel 1.

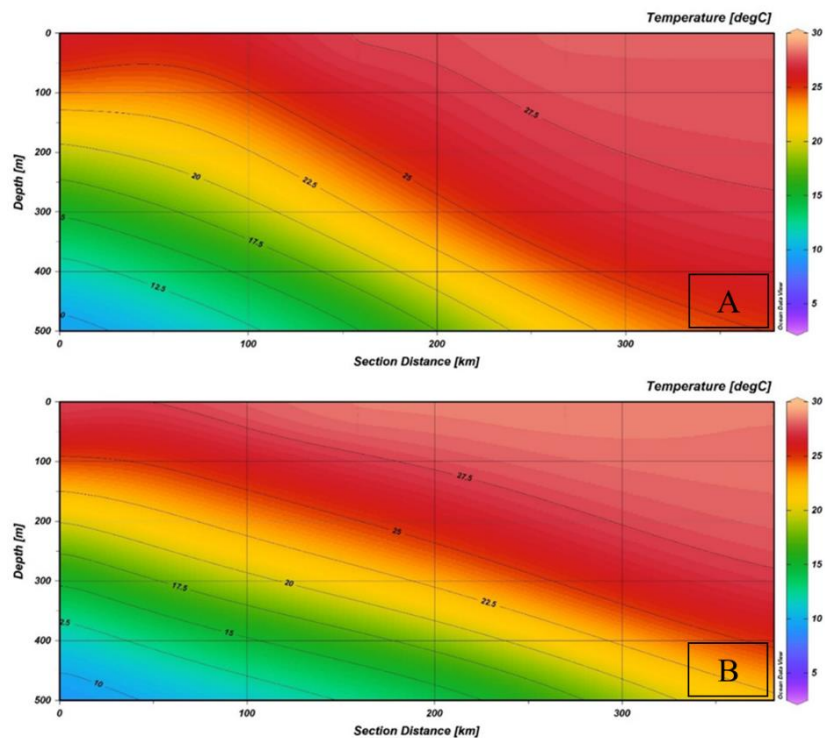
Berdasarkan pengolahan data pada Tabel 1, didapatkan bahwa nilai suhu permukaan laut terendah di perairan laut Kalimantan Timur dicapai pada bulan Februari yaitu sebesar 301,26 K dan tertinggi dicapai pada bulan Oktober yaitu sebesar 302,42 K. Profil sebaran menegak dan melintang rata-rata suhu terhadap kedalaman pada bulan Februari dan Oktober di perairan Kalimantan Timur masing-masing dapat dilihat pada gambar berikut.

Tingginya suhu permukaan laut pada bulan Oktober disebabkan karena pada bulan ini Provinsi Kalimantan Timur memasuki puncak musim timur dan peralihan II (pancaroba akhir tahun). Pada musim ini matahari bergerak mendekati wilayah ekuator sehingga radiasi matahari yang diterima oleh perairan laut Kalimantan Timur meningkat. Lebih lanjut, pada musim ini angin berembus dari belahan dunia bagian barat dengan membawa arus dari belahan bumi selatan menuju perairan laut Kalimantan Timur. Arus ini membawa massa air laut panas akibat pemanasan terus - menerus dari radiasi matahari selama perjalanan menuju perairan

laut Kalimantan Timur, sehingga suhu permukaan laut yang berada di perairan laut Kalimantan Timur relatif tinggi. Di lain pihak, rendahnya suhu permukaan laut pada bulan Februari disebabkan karena bulan ini berada pada periode musim barat dan musim peralihan I (pancaroba awal tahun). Pada musim ini posisi matahari berada pada Bumi Bagian Selatan (BBS), sehingga intensitas radiasi matahari yang diterima di perairan laut Kalimantan Timur berkurang dan menyebabkan suhu permukaan laut bernilai relatif rendah.



Gambar 2. Profil menegak suhu dan kedalaman: (a) Februari, (b) Oktober.



Gambar 3. Profil melintang suhu dan kedalaman: (a) Februari, (b) Oktober.

Analisis Mekanisme Pembangkitan Energi Listrik

Selanjutnya akan dianalisis mekanisme pembangkitan energi listrik oleh OTEC. Sistem pembangkit listrik tenaga OTEC bekerja seperti mesin Carnot dengan memanfaatkan perbedaan suhu permukaan laut dan suhu pada kedalaman tertentu. Berdasarkan hasil perhitungan, didapatkan bahwa nilai rata – rata tahunan suhu permukaan laut dan suhu pada kedalaman 450 m di perairan laut Kalimantan Timur masing – masing adalah 302,05 K dan 281,05 K. Dengan menggunakan rumus perhitungan efisiensi mesin Carnot, didapatkan nilai efisiensi rata – rata OTEC per tahun di perairan laut Kalimantan Timur adalah sebesar 6,95%. Berdasarkan data WOA tahun 2018, sistem OTEC di perairan laut Kalimantan Timur menghasilkan efisiensi terkecil pada bulan Februari yaitu sebesar 6,74%, dan efisiensi terbesar pada bulan Oktober yaitu sebesar 7,09%. Secara fisis, semakin menuju laut dalam, suhu air laut akan semakin rendah. Pada kedalaman yang sama, semakin tinggi suhu permukaan laut, maka perbedaan suhu yang dihasilkan akan semakin tinggi. Jika perbedaan suhu semakin tinggi, maka nilai efisiensi yang dihasilkan juga semakin tinggi.

Sebagai batasan masalah, dalam penelitian ini digunakan pembangkit listrik tenaga OTEC siklus terbuka yang merujuk pada Harrison (2010). OTEC siklus terbuka menggunakan fluida kerja berupa air laut. Nilai-nilai parameter mesin serta metode perhitungan pembangkit listrik tenaga OTEC siklus terbuka merujuk pada penelitian Morales (2014), Aprilia *et al.* (2019), Julianto (2020) dan penelitian terkait didalamnya. Sistem kerja OTEC siklus terbuka dapat dimodelkan sebagai berikut. Pada tahap pertama, air laut hangat (*warm seawater*) dengan massa 23.984,50 kg, volume 0,001004 m³/kg, suhu permukaan 302,05 K, dan tekanan 1 atm = 0,1013 MPa dipompa ke dalam evaporator hingga mencapai tekanan 1,088 MPa. Pada pompa air laut hangat digunakan panjang pipa 15 m. Jika air laut hangat dengan masa jenis 1.026 kg/m³ dan memiliki debit 23,38 m³/s, mengalir dengan kecepatan 1,004 m/s di dalam pipa berdiameter 5 m, dengan faktor gesekan 0,05, maka daya pompa air laut hangat adalah sebesar 1,77 kW.

Pada evaporator, air laut akan dikonversi menjadi uap jenuh bertekanan rendah dibawah nilai saturasi sesuai dengan suhunya yang kemudian dilewatkan melalui turbin. Energi panas yang diperlukan oleh evaporator untuk mencapai uap jenuh adalah 250.997,79 kJ/s. Uap jenuh bertekanan rendah yang diperoleh dari evaporator akan masuk ke turbin. Untuk menggerakkan sudu turbin dengan kecepatan sudut 195,03 m/s, dan menghasilkan efisiensi sudut 93%, diperlukan massa uap jenuh sebesar 103,576 kg/s. Energi mekanik dari pergerakan sudu turbin kemudian akan diteruskan ke generator arus bolak balik (AC) untuk membangkitkan energi listrik. Jika efisiensi generator adalah 90%, seperti merujuk pada penelitian Aprilia *et al.* (2019) dan Morales (2014), maka daya listrik yang dapat dibangkitkan oleh OTEC di perairan Kalimantan Timur dengan efisiensi 6,95% adalah 7.720 kW. Jika rata – rata konsumsi listrik rumah tangga sebesar 1000 watt, maka sebuah pembangkit listrik tenaga OTEC dapat digunakan oleh 7.720 rumah tangga.

Setelah melewati turbin, air laut hangat (*warm seawater*) akan diteruskan menuju kondenser. Dalam kondenser, air laut hangat (*warm seawater*) akan bertemu dengan air laut dingin (*cold seawater*) dengan massa 23.188,95 kg yang dipompa oleh pompa air laut dingin. Pada pompa air laut dingin digunakan panjang pipa 900 m. Jika air laut dingin dengan masa jenis 1.026 kg/m³ dan memiliki debit 22,60 m³/s, mengalir dengan kecepatan 1,004 m/s di dalam pipa berdiameter 5 m, dengan faktor gesekan $f = 0,05$, maka dapat dihitung daya pompa air laut dingin adalah sebesar 102,52 kW.

Pertemuan air laut hangat (*warm seawater*) dengan air laut dingin (*cold seawater*) akan menyebabkan terjadinya perpindahan panas dan terjadinya proses kondensasi oleh fluida kerja. Energi panas yang harus dilepaskan oleh evaporator ke dalam kondensor agar terjadi proses kondensasi adalah sebesar 242.672,35 kJ/s. Berdasarkan perhitungan, didapatkan massa air dingin (*cold seawater*) yang dihasilkan oleh kondensor melalui proses desalinasi adalah 23.188,95 kg. Jika diasumsikan massa jenis air laut $\rho = 1.026 \text{ kg/m}^3$, maka volume air bersih yang dihasilkan adalah 22.601 liter/hari. Hasil air yang sudah terdesalinasi ini dapat dimanfaatkan oleh masyarakat sebagai air minum, irigasi, serta keperluan pertanian.

Analisis Biaya Produksi Energi Listrik

Berikutnya akan diuraikan analisis terkait biaya produksi listrik oleh OTEC yang merujuk pada Hendrawan (2016) dan Luhur *et al.* (2013). Berdasarkan perhitungan analisis pembangkitan, didapatkan bahwa daya listrik yang dapat dibangkitkan oleh OTEC di perairan laut Kalimantan Timur adalah 7.720 kW. Jika diasumsikan bahwa biaya investasi pembangunan OTEC adalah sebesar USD 6.000.000, maka biaya pembangunan OTEC adalah sebesar USD 777,202 /kW. Selanjutnya, dengan mengasumsikan bahwa suku

bunga 10%, dan umur pembangkit adalah 20 tahun, maka didapatkan *Capital Recovery Factor (CRF)* sebesar 0,11. Jika diasumsikan bahwa faktor kapasitas (kWh terpasang/kWh terpakai) OTEC adalah 30%, dan energi listrik yang dihasilkan oleh OTEC terus digunakan selama 24 jam/hari selama 365 hari, maka jumlah pembangkit tenaga listrik (kWh) adalah 20.288.160 kWh. Dengan demikian, biaya modal (*capital cost*) adalah sebesar USD 0,0325/kWh. Jika diasumsikan bahwa biaya bahan bakar atau *fixed cost (FC)* adalah sebesar USD 0,0009/kWh, serta biaya operasi dan perawatan (*OMC*) adalah sebesar USD 0,0003/kWh, maka total biaya pembangkit tenaga listrik oleh OTEC adalah USD 0,0337/kWh. Dengan menggunakan konversi 1 USD = Rp16.264 (per tanggal 8 Juli 2024), maka total biaya produksi pembangkit listrik oleh OTEC adalah Rp548,09/kWh.

Merujuk pada data statistik PLN tahun 2018-2022, biaya rata-rata produksi pembangkit listrik untuk PLTA adalah sebesar Rp 432/kWh, PLTU berbasis batu bara adalah Rp 705/kWh, PLTP adalah Rp975/kWh, PLTG adalah Rp1.611,79/kWh, PLTGU adalah Rp1.322,23/kWh, dan PLTD berbasis BBM adalah Rp4.746,32/kWh (Laoli, 2023). Dapat disimpulkan bahwa biaya produksi energi listrik oleh OTEC jauh lebih murah dari banyak pembangkit listrik lainnya seperti PLTU, PLTP, PLTG, PLTGU, dan PLTD.

Analisis Dampak Lingkungan Pembangunan OTEC

Bangunan untuk OTEC dapat didesain sebagai bangunan terapung jenis anjungan semi-submersibel. Anjungan ini diikat ke dasar laut menggunakan tali *mooring* dan jangkar agar posisinya tetap di permukaan. Jenis anjungan ini biasanya digunakan untuk stasiun pengeboran minyak pada laut yang dalam karena karakteristiknya stabil dan tahan terhadap ombak besar dan cuaca buruk. Anjungan ini cocok untuk diterapkan dalam pembangunan OTEC di perairan laut Kalimantan Timur. Salah satu ciri khas dari anjungan semi-submersibel adalah adanya pipa - pipa besar yang berfungsi untuk memompa fluida kerja sistem OTEC. Seiring berjalannya waktu, pipa - pipa tersebut dapat mengalami korosi yang berdampak pada perubahan tingkat keasamaan air laut. Kondisi tersebut berpotensi menimbulkan kerusakan ekosistem laut di sekitarnya. Lebih lanjut, dalam pembangunan OTEC siklus terbuka, selain dihasilkan energi listrik juga dihasilkan pembuangan air laut yang kaya nutrisi dalam volume besar. Kelimpahan nutrisi yang dihasilkan oleh OTEC, berpotensi menimbulkan fenomena ledakan populasi alga (*Harmful Algal Blooms*) yaitu pertumbuhan fitoplankton dengan sangat pesat yang mengakibatkan penurunan kadar oksigen di perairan laut melalui proses eutrofikasi sehingga dapat menimbulkan kematian massal bagi ikan dan biota laut lainnya. Menurut Comfort & Vega (2011) salah satu upaya preventif terhadap potensi kerusakan lingkungan yang ditimbulkan oleh OTEC adalah dengan melakukan pengukuran nutrisi air laut pada kedalaman 20 m, 600 m dan pada kedalaman pipa pembuangan, pengukuran kelimpahan plankton menggunakan MOCNESS secara berkala, pemantauan entrainment dari pipa air dingin, serta pemantauan akustik.

KESIMPULAN

Dalam penelitian ini telah dianalisis potensi OTEC di wilayah perairan Kalimantan Timur. Berdasarkan analisis data penelitian, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut. Pertama, Nilai suhu permukaan laut terendah berdasarkan data WOA 2018 dicapai pada bulan Februari yaitu sebesar 301,26 K dan tertinggi dicapai pada bulan Oktober yaitu sebesar 302,42 K. Berdasarkan perhitungan efisiensi, didapatkan nilai efisiensi rata - rata OTEC adalah 6,95%. Kedua, Potensi daya listrik yang dapat dibangkitkan oleh satu stasiun OTEC dengan siklus terbuka dan efisiensi generator 90%, di perairan laut Kalimantan Timur adalah 7,72 MW. Ketiga, Estimasi total biaya produksi pembangkit energi listrik oleh OTEC di perairan Kalimantan Timur adalah sebesar Rp526,29/kWh. Biaya ini jauh lebih murah dari banyak pembangkit listrik lainnya seperti PLTU, PLTP, PLTG, PLTGU, dan PLTD. Dan terakhir, Selain menghasilkan daya listrik, OTEC juga berpotensi menghasilkan air bersih sebanyak 22.601 liter/hari yang dapat membantu memenuhi kebutuhan air bersih masyarakat di Kalimantan Timur jika musim kemarau datang. Salah satu dampak negatif pembangunan OTEC sistem terbuka adalah pembuangan air laut kaya nutrisi dalam volume besar yang berpotensi menimbulkan fenomena ledakan populasi alga (*Harmful Algal Blooms*) sehingga dapat menyebabkan kematian massal bagi ikan dan biota laut lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

Abror, R., Wicaksono, I. & Izzuddin, A. 2022. Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Pasang Surut (PLTPS) Portabel Menggunakan Kaki Statis. *Jurnal Energy*, 12(1): 39-46. <https://doi.org/10.51747/energy.v12i1.1105>.

- Agustina, C. D. 2024. Keberadaan Energi Baru Terbarukan di Ibu Kota Nusantara. Diakses pada 8 Juli 2024, dari <https://zonaebt.com/regulasi-energi/keberadaan-energi-baru-terbarukan-di-ibu-kota-nusantara/>.
- Andayani, N. K. S., Ilahude, D., Satriadi, A. & Purwanto. 2020. Studi Potensi OTEC Berdasarkan Distribusi Suhu, Salinitas dan Densitas di Perairan Timur – Utara Pulau Bali. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(4): 386-395. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v2i4.9346>.
- Andrawina, Y. O., Sugianto, D. N. & Alifdini, I. 2017. Initial Study of Potency Thermal Energy Using OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) As A Renewable Energy for Halmahera Indonesia. *2nd International Conference on Tropical and Coastal Region Eco Development 2016*, Bali, 25–27 October 2016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/55/1/012032>.
- Aprilia, E., Aini, A., Frakusya, A. & Safril, A. 2019. Potensi Panas Laut Sebagai Energi Baru Terbarukan di Perairan Papua Barat dengan Metode Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). *Jurnal Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*, 6(2): 7-14.
- Asosiasi Energi Laut Indonesia (ASELI). 2011. *Potensi Sumber Daya Energi Laut di Indonesia*. ASELI, Bandung, p.14.
- Comfort, C.M. dan Vega, L. 2011. Environmental assessment for ocean thermal energy conversion in Hawaii: Available data and a protocol for baseline monitoring. *OCEANS'11 MTS/IEEE KONA*, Waikoloa, USA, 19-22 September 2011. <https://doi.org/10.23919/OCEANS.2011.6107210>.
- Fadlillah, A. A. Z., Sanjaya, K. V. K., Arkananta, M. Z. & Darmawan, Y. 2024. Potensi Panas Laut Sebagai Energi Baru Terbarukan Di Perairan Kepulauan Nusa Tenggara Timur Dengan Metode Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 5(1): 70-84. <https://doi.org/10.14710/jebt.2024.22080>.
- Hammad, F. K., Rochaddi, B., Purwanto & Susmoro, H. 2020. Identifikasi Potensi Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) di Selat Makassar Utara. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(2): <https://doi.org/10.14710/ijoce.v2i2.8058>.
- Harrison S. 2010. Ocean Thermal Energy Conversion. Diakses pada 8 Juli 2024, dari <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/harrison2/>.
- Hendrawan, A. 2016. Kajian Teknoekonomi Pembangkit Listrik Tenaga OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion). *Prosiding Seminar Nasional & CFP IIDRI*, Cilacap, 26 Oktober 2017.
- Julianto, C. 2020. Studi Potensi Pemanfaatan OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) Menggunakan Siklus Terbuka untuk Mengatasi Krisis Listrik dan Air Bersih di Pulau Lembata, Nusa Tenggara Timur. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan”*, Yogyakarta, 14-15 Juli 2020.
- Koto, J. & Negara, R. B. 2016. 10 MW Plant Ocean Thermal Energy Conversion in Morotai Island, North Maluku, Indonesia. *Journal of Subsea and Offshore*, 8: 7-14.
- Laoli, N. 2023. PLN Ungkap Biaya Pokok Penyediaan (BPP) Listrik EBT Masih Mahal. Diakses pada 8 Juli 2024, dari <https://industri.kontan.co.id/news/pln-ungkap-biaya-pokok-penyediaan-bpp-listrik-ebt-masih-mahal?page=1>.
- Luhur E. S., Muhartono R. & Suryawati S. H. 2013. Analisis Finansial Pengembangan Energi Laut Di Indonesia. *Jurnal Sosial Ekonomi Kelautan dan Perikanan*, 8(1): 25-37. <http://doi.org/10.15578/jsekp.v8i1.1192>.
- Morales, A. D., Sánchez, R. A. M., Osorio, A. F. & Díaz, L. J. O. 2014. Ocean thermal energy resources in Colombia. *Renewable Energy*, 66: 759-769. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.010>.
- Nagifea, F. Y., Sudarti & Yushardi. 2022. Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) Sebagai Energi Alternatif Di Indonesia. *Jurnal Technopreneur*, 10(2): 17–24. <https://doi.org/10.30869/jtech.v10i2.968>.
- Putri, F. M. & Fadilah, N. 2023. Penerapan Panas Laut Sebagai Energi Terbarukan Pada Lokasi Selat Makassar dengan Menggunakan Metode Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). *Sensistek*, 6(2): 157-161. <https://doi.org/10.62012/sensistek.v6i2.31710>.
- Riyanto, S. 2017. Kajian Pemanfaatan Potensi Suhu Air Laut sebagai Sumber Energi Terbarukan Menghasilkan Energi. *Jurnal Inovtek Polbeng*, 7(1): 20-28.
- Rose, R. E. 1985. *Ocean Thermal Energy Conversion Power Plants: My Role in The NOAA/NMFS Preliminary Fishery Impacts Study*, Corvallis, Oregon State University.
- World Ocean Atlas. 2018. Ocean Data View. Diakses pada 8 Juli 2024, dari <https://odv.awi.de/data/ocean/world-ocean-atlas-2018/>.