

Analisis Potensi Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) di Wilayah Geografis Laut Barat Sumatera

Kevin Sahat Parsaulian*, Afif Asykar Amir, Andit Zelly Gunawan

Institut Teknologi Bandung (ITB), Bandung, Indonesia

*sahatkevin@gmail.com

Abstract

Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) is an emerging marine renewable energy technology that exploits the natural temperature gradient between warm surface seawater and cold deep-sea water to generate electricity. This thermal energy potential is especially significant in tropical regions such as Indonesia, where oceanographic conditions are favorable. The West Sumatra Sea, bordering the Indian Ocean, is identified as a promising site for OTEC development due to its consistently high surface temperatures and considerable bathymetric depth. This study aims to assess the monthly vertical and horizontal temperature distributions, evaluate the seasonal variations, and calculate the theoretical efficiency of OTEC systems in the region. Ocean temperature data were sourced from the Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) and analyzed using Ocean Data View (ODV) software. Results indicate that surface water temperatures range between 29.3°C and 30.57°C, while deep-sea temperatures at 600 meters depth remain around 8.96°C. The average vertical temperature difference (ΔT) throughout the year is approximately 21°C, satisfying the minimum threshold for OTEC viability. The thermocline layer is located between 40 and 77 meters, while deep water extends beyond 900 meters. The calculated average Carnot efficiency is 0.70, indicating a strong theoretical potential for energy conversion. Seasonal analysis also shows stable ΔT values during transitional monsoon periods, suggesting year-round operational feasibility. These findings confirm that the oceanographic characteristics of the West Sumatra Sea support the sustainable development of OTEC technology and highlight its strategic potential in contributing to Indonesia's renewable energy transition.

Keywords: OTEC; Ocean Temperature; Carnot Efficiency; Thermocline; West Sumatra Sea

Abstrak

Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) merupakan teknologi energi terbarukan kelautan yang memanfaatkan perbedaan suhu alami antara air laut permukaan yang hangat dan air laut dalam yang dingin untuk menghasilkan listrik. Potensi energi termal ini sangat menjanjikan, khususnya di wilayah tropis seperti Indonesia yang memiliki kondisi oseanografis mendukung. Laut Barat Sumatera, yang berbatasan langsung dengan Samudra Hindia, diidentifikasi sebagai lokasi potensial untuk pengembangan OTEC karena memiliki suhu permukaan laut yang tinggi secara konsisten serta kedalaman laut yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi distribusi suhu laut secara horizontal dan vertikal tiap bulan, menilai pengaruh variasi musiman, serta menghitung efisiensi teoritis konversi energi pada sistem OTEC di wilayah tersebut. Data suhu laut diperoleh dari Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) dan dianalisis menggunakan perangkat lunak Ocean Data View (ODV). Hasil menunjukkan suhu permukaan laut berkisar antara 29,3°C hingga 30,57°C, sedangkan suhu laut dalam pada kedalaman 600 meter berkisar 8,96°C.

Perbedaan suhu vertikal (ΔT) rata-rata mencapai 21°C sepanjang tahun, melebihi ambang batas minimum untuk kelayakan OTEC. Lapisan termoklin berada pada kedalaman 40 hingga 77 meter, dan lapisan laut dalam melampaui 900 meter. Nilai efisiensi sistem berdasarkan rumus Carnot rata-rata sebesar 0,70, menandakan potensi konversi energi yang tinggi. Analisis musiman menunjukkan kestabilan nilai ΔT selama musim peralihan, memungkinkan operasional sepanjang tahun. Temuan ini menegaskan bahwa Laut Barat Sumatera merupakan wilayah yang layak untuk pengembangan teknologi OTEC secara berkelanjutan di Indonesia.

Kata Kunci: OTEC; Suhu Laut; Efisiensi Carnot; Termoklin; Laut Barat Sumatera

Pendahuluan

Indonesia saat ini menghadapi tantangan besar dalam sektor energi, yang ditandai dengan ketergantungan tinggi terhadap sumber energi tak terbarukan seperti batu bara dan bahan bakar fosil. Kondisi ini telah memicu berbagai dampak negatif, baik dari aspek lingkungan seperti peningkatan emisi CO_2 dan krisis iklim, maupun dari aspek ekonomi seperti ketidakstabilan pasokan dan fluktuasi harga energi. Meskipun Indonesia memiliki potensi Energi Baru dan Terbarukan (EBT) yang sangat besar, bauran energi primer nasional masih didominasi oleh energi fosil, dan capaian aktual EBT baru sekitar 12,3% pada tahun 2022, jauh dari target 23% yang ditetapkan dalam Kebijakan Energi Nasional (KEN) untuk tahun 2025 (Santoso, 2024). Untuk itu, transisi menuju sistem energi bersih menjadi suatu kebutuhan strategis guna mewujudkan ketahanan energi nasional dan mendukung agenda *green economy*. Salah satu potensi EBT yang belum banyak dieksplorasi adalah energi laut, khususnya melalui teknologi Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). Teknologi ini memanfaatkan perbedaan suhu antara lapisan permukaan laut yang hangat dan lapisan laut dalam yang dingin untuk menghasilkan listrik dengan prinsip kerja siklus Carnot atau Rankine, menggunakan fluida kerja bertitik didih rendah seperti amonia. Negara Indonesia, sebagai negara maritim tropis, memiliki karakteristik suhu permukaan laut yang tinggi sepanjang tahun dan kedalaman laut yang cukup dalam, menjadikannya sangat potensial untuk pengembangan OTEC. Salah satu wilayah yang memenuhi syarat teknis OTEC adalah Laut Barat Sumatera, yang berbatasan langsung dengan Samudra Hindia dan diketahui memiliki gradien suhu vertikal (ΔT) $\geq 20^{\circ}\text{C}$ serta kedalaman laut lebih dari 900 meter. Beberapa studi sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Octaviani et al. (2016) dan Syamsuddin et al. (2015), telah mengidentifikasi potensi OTEC di wilayah ini, namun masih terbatas pada pemetaan makro berbasis data tahunan, tanpa analisis spasial dan musiman yang rinci.

Penelitian ini dilakukan untuk mengisi gap tersebut dengan memanfaatkan Indonesia sebagai negara kepulauan dan juga negara maritim dengan menggunakan data suhu laut resolusi tinggi dari *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS) yang dianalisis menggunakan perangkat lunak *Ocean Data View* (ODV), guna mengevaluasi distribusi suhu laut secara horizontal dan vertikal tiap bulan, karakteristik termoklin, dan menghitung efisiensi konversi energi menggunakan rumus efisiensi Carnot. Dengan pendekatan ini, penelitian ini menawarkan kebaruan dalam tiga aspek utama yaitu, lokasi studi spesifik yang belum banyak diteliti, penggunaan data suhu spasial-musiman resolusi tinggi, dan evaluasi kelayakan teknis OTEC berbasis efisiensi teoritis. Salah satu sumber energi terbarukan yang belum banyak dikembangkan tetapi memiliki potensi besar, khususnya di wilayah tropis, adalah energi laut. *Teknologi Ocean Thermal Energy Conversion* (OTEC) menawarkan pendekatan unik dalam pemanfaatan energi panas laut dengan menggunakan perbedaan suhu antara lapisan permukaan laut yang hangat dan lapisan laut dalam yang dingin untuk menghasilkan listrik. Teknologi

ini bekerja berdasarkan prinsip termodinamika siklus Rankine atau Carnot, menggunakan fluida kerja dengan titik didih rendah yang diuapkan oleh suhu permukaan laut dan dikondensasikan kembali oleh suhu laut dalam.

Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) merupakan teknologi energi terbarukan kelautan yang memanfaatkan energi matahari yang diserap laut untuk menghasilkan listrik. Panas matahari menghangatkan air permukaan laut sehingga menciptakan gradien suhu alami yang disediakan laut, atau energi panas. OTEC menggunakan air hangat di permukaan laut dengan suhu sekitar 25 °C untuk menguapkan fluida kerja yang memiliki titik didih rendah, seperti amonia. Uap panas memutar turbin yang terhubung ke generator untuk menghasilkan listrik. Uap tersebut kemudian didinginkan oleh air laut yang dipompa dari lapisan laut yang lebih dalam, yang bersuhu sekitar 5 °C. Fluida kerja yang mengembun kembali menjadi cair, sehingga dapat digunakan kembali (Koto, 2016).

Siklus proses ekstraksi energi panas dari lautan pada OTEC ini, yaitu Siklus Terbuka (*Open Cycle*) dimana air permukaan laut yang lebih hangat dimasukkan melalui katup di kompartemen bertekanan rendah dan diuapkan secara kilat. Uap tersebut menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik, kemudian dikondensasikan oleh air laut dingin yang dipompa dari laut dalam. Air yang terkondensasi dapat dikumpulkan karena merupakan air tawar (Koto, 2016). Adapun Siklus Tertutup (*Close Cycle*) dimana air permukaan, dengan suhu lebih tinggi, digunakan untuk memberikan panas pada fluida kerja dengan suhu didih rendah, sehingga memberikan tekanan uap lebih tinggi. Uap tersebut menggerakkan generator yang menghasilkan listrik. Uap fluida kerja tersebut kemudian dikondensasikan oleh air dingin dari laut dalam dan dipompa kembali dalam sistem tertutup.

Indonesia sebagai negara kepulauan yang berada di jalur khatulistiwa memiliki keunggulan geografis dan oseanografis dalam pengembangan OTEC. Sekitar 77% wilayah Indonesia merupakan perairan laut tropis yang memiliki suhu permukaan relatif tinggi sepanjang tahun dan kedalaman laut yang mencapai ribuan meter di beberapa lokasi. Hal ini menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara dengan potensi OTEC terbesar di dunia. Salah satu kawasan yang memiliki karakteristik oseanografi ideal untuk teknologi OTEC adalah Laut Barat Sumatera, yang berbatasan langsung dengan Samudera Hindia. Wilayah ini dikenal memiliki gradien suhu vertikal yang cukup besar ($\Delta T \geq 20^\circ\text{C}$) dan kedalaman laut lebih dari 500 meter, dua syarat utama dalam pengembangan OTEC secara teknis (Octaviani et al., 2016; Syamsuddin et al., 2015).

Namun demikian, kajian ilmiah mengenai profil vertikal suhu laut, distribusi termoklin, serta analisis efisiensi energi di wilayah tersebut masih sangat terbatas. Sebagian besar studi terdahulu hanya bersifat pemetaan awal potensi atau menggunakan data suhu tahunan tanpa analisis musiman yang mendalam. Untuk itu, penelitian ini dilakukan guna mengisi celah tersebut dengan pendekatan berbasis data *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS) yang memiliki resolusi spasial dan temporal tinggi. Data tersebut diolah menggunakan perangkat lunak *Ocean Data View* (ODV) untuk mengevaluasi distribusi suhu laut secara horizontal dan vertikal, baik bulanan maupun musiman, serta menghitung efisiensi konversi energi dengan rumus efisiensi Carnot.

Dengan pendekatan ini, artikel ini berkontribusi dalam memberikan gambaran yang lebih detail dan kuantitatif terkait kelayakan pengembangan OTEC di Laut Barat Sumatera. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi teknis awal dalam upaya integrasi energi laut sebagai bagian dari transisi energi bersih nasional, khususnya dalam kerangka Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) dan kebijakan percepatan EBT di Indonesia.

Metode

Penelitian ini termasuk dalam jenis kuantitatif deskriptif, karena menekankan pengukuran dan pemaparan variabel suhu laut secara numerik. Pendekatan penelitian dan sumber data menggunakan data sekunder dari *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS). Platform ini menyediakan data suhu laut resolusi tinggi yang dihasilkan dari asimilasi data in situ seperti profili Argo, XBT, CTD, *moorings*, *gliders*, dan satelit, sehingga menghasilkan dataset kelautan global dan regional yang konsisten. Dikarenakan penelitian ini berbasis data kelautan, data informasi diartikan sebagai data suhu laut dan lapisan air laut yang dipilih berdasarkan kriteria teknis wilayah kajian di Laut Barat Sumatera dengan kedalaman > 500 m dan perbedaan suhu vertikal (ΔT) $\geq 20^\circ\text{C}$ dimana kriteria ini digunakan untuk memilih titik data representatif dari grid CMEMS. Instrumen utama penelitian ini bertajuk pada data suhu laut dalam format NetCDF yang diperoleh dan pengoperasian numerik tematik perangkat lunak *Ocean Data View* (ODV) untuk visualisasi distribusi suhu dan identifikasi zona termal. Lokasi penelitian mencakup wilayah Laut Barat Sumatera pada koordinat $93,583^\circ\text{E} - 97,083^\circ\text{E}$ dan $0,417^\circ\text{S} - 4,333^\circ\text{S}$. Data dianalisis untuk mendapatkan distribusi suhu secara vertikal dan horizontal setiap bulan. Efisiensi energi dihitung berdasarkan rumus efisiensi Carnot. Lapisan termoklin dianalisis dengan mengidentifikasi gradien suhu signifikan ($G_j > 0.1^\circ\text{C}/\text{m}$) dan dibagi ke dalam tiga zona utama: *mix layer*, termoklin, dan *deep water*. Teknik pengumpulan data melibatkan pengumpulan data dari berbagai sumber data satelit dan data historis yang tersedia secara publik. Data ini kemudian diimpor ke dalam ODV untuk diolah dan divisualisasikan, memungkinkan analisis dan interpretasi data kelautan.

Hasil dan Pembahasan

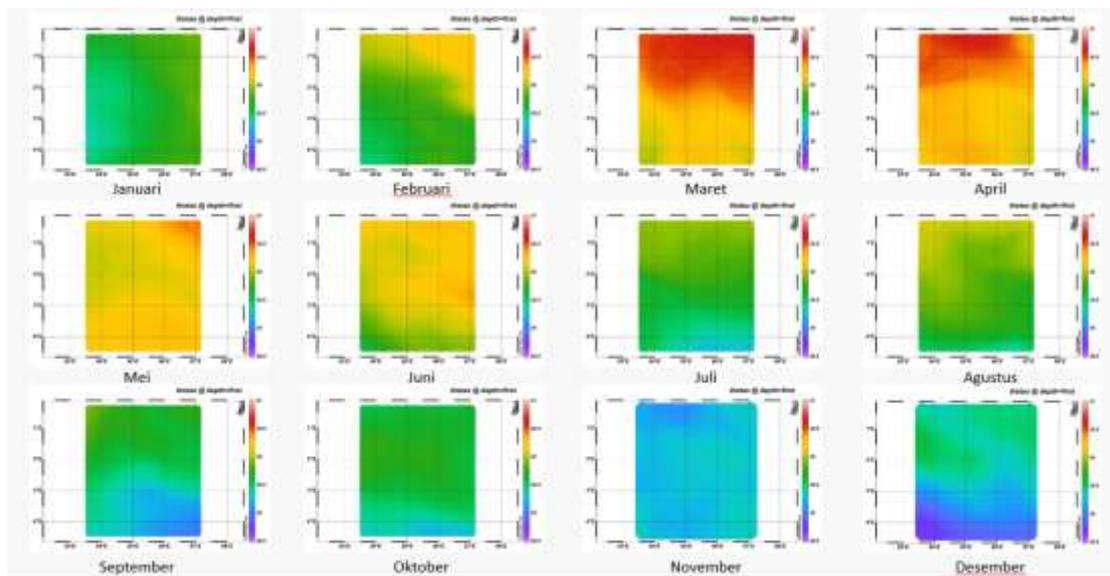
1. Distribusi Suhu Bulanan

Analisis suhu permukaan laut di wilayah Laut Barat Sumatera menunjukkan fluktuasi musiman yang signifikan. Suhu permukaan laut (Sea Surface Temperature/SST) berkisar antara $29,28^\circ\text{C}$ hingga $30,57^\circ\text{C}$, sedangkan suhu perairan dalam (kedalaman ≥ 600 m) mencapai sekitar $8,74^\circ\text{C}$ hingga $9,25^\circ\text{C}$. Suhu tertinggi terpantau pada musim peralihan I (Maret–Mei), dengan puncaknya pada bulan Maret ($30,57^\circ\text{C}$), sedangkan suhu permukaan terendah terjadi pada musim peralihan II (September–November), yaitu pada bulan November ($29,28^\circ\text{C}$). Pola ini konsisten dengan pengamatan oleh Alkatiri et al. (2011), yang menyatakan bahwa suhu permukaan laut di wilayah Indonesia umumnya meningkat pada transisi monsun barat ke timur akibat intensitas radiasi matahari yang tinggi.

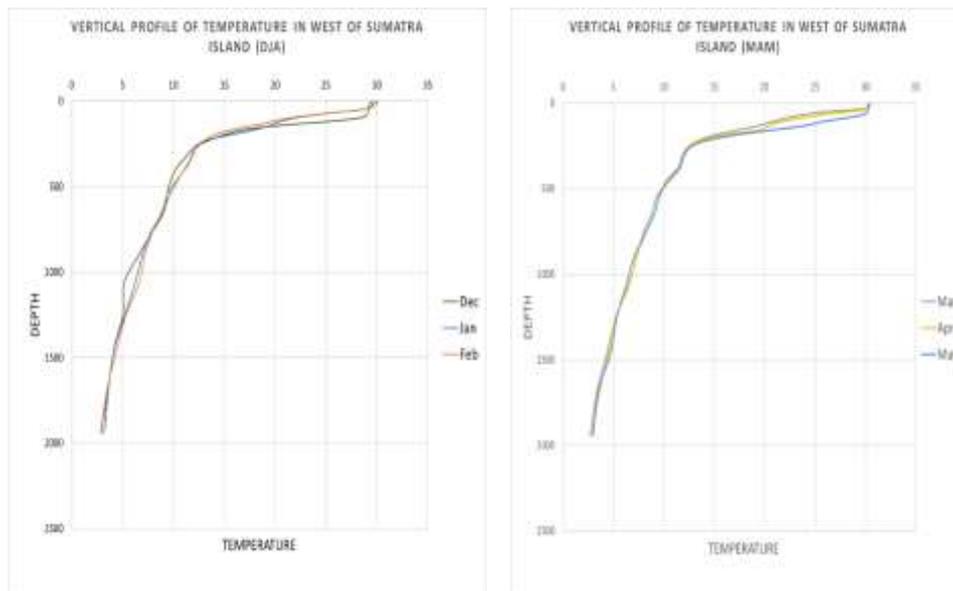
Secara vertikal, suhu laut mengalami penurunan tajam mulai dari kedalaman 40 m hingga 700 m. Penurunan drastis ini menunjukkan adanya lapisan termoklin yang kuat di wilayah studi. Pada Gambar 2. menunjukkan peta distribusi horizontal suhu laut untuk tiap bulan, hasil pengolahan data ODV (Ocean Data View), sedangkan Gambar 3 dan Gambar 4 merupakan grafik distribusi suhu vertikal per musim (DJF, MAM, JJA, SON). Penelitian oleh Wahyudi et al. (2018) menggunakan data SST dari satelit MODIS dan pengamatan in situ oleh pelampung Argo selama periode 2010–2016 di wilayah barat Sumatra. Hasilnya menunjukkan tren kenaikan SST yang konsisten selama rentang waktu tersebut, dengan laju peningkatan rata-rata sebesar $\pm 0,132^\circ\text{C}$ per tahun untuk data MODIS, dan $\pm 0,093^\circ\text{C}$ per tahun berdasarkan data Argo. Meskipun pola musiman yang serupa terlihat pada kedua sumber data, ditemukan adanya perbedaan nilai antara kedua metode, yaitu SST dari Argo cenderung lebih tinggi. Kesesuaian antara MODIS dan data Argo cukup baik dengan nilai RMSE sekitar $0,555^\circ\text{C}$, menunjukkan tingkat akurasi yang memadai meskipun masih terdapat bias satelit terhadap pengukuran lapangan.

Penelitian oleh Cao et al. (2019) dalam *Journal of Geophysical Research: Oceans* mengungkap bahwa variabilitas intramusiman (ISV) dari suhu permukaan laut (SST) di sepanjang pantai selatan Sumatra–Java jauh lebih kuat selama musim panas–gugur (Juni–Oktober) dibandingkan musim dingin–semi (November–Mei). Analisis komposit menunjukkan bahwa pada musim panas–gugur, dominasi adveksi horizontal laut (oceanic advection) dan fenomena Kelvin waves lebih signifikan dalam mempengaruhi fluktuasi SST, sementara kontribusi proses atmosfer seperti fluks panas radiasi menurun hingga sekitar 67% dibandingkan musim lainnya. Selain itu, pola ISV SST secara kuat berkorelasi dengan proses dinamika laut lokal, seperti downwelling/upwelling pantai, serta mekanisme transportasi Ekman onshore/offshore yang dipicu oleh anomali angin musiman. Temuan ini semakin memperkuat analisis mengenai fluktuasi musiman SST di Laut Barat Sumatra, khususnya pengaruh musiman terhadap variabilitas vertikal suhu laut dan ketebalan termoklin.

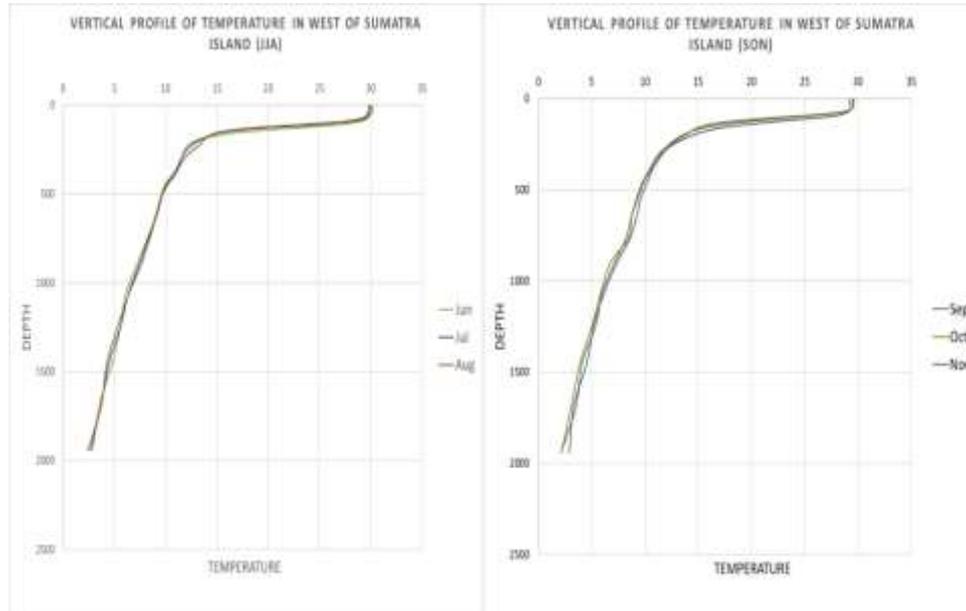
Walaupun beberapa studi bagian barat Sumatera fokus pada SST permukaan dan ISV, sebagian besar belum mengeksplorasi keterkaitan langsung antara ketebalan termoklin serta mix layer dengan dinamika oseanik seperti yang diukur secara vertikal hingga ≥ 600 m. Di sinilah kontribusi penelitian ini menjadi penting. Penelitian ini mengungkap struktur termoklin yang tajam antara kedalaman 40–700 m dan memetakan mix layer di setiap musim, memberikan wawasan langsung mengenai ketersediaan gradient suhu vertikal (ΔT) yang kritis bagi aplikasi OTEC. Studi terdahulu umumnya menggunakan data satelit dan Argo untuk analisis SST permukaan, namun kurang menyoroti distribusi vertikal suhu yang berkaitan langsung dengan efisiensi OTEC. Kombinasi pengamatan vertikal suhu hingga kedalaman > 600 m dengan analisis termal mendalam memberi nilai tambah terhadap literatur yang belum menjelaskan struktur termoklin secara musiman di kawasan tersebut. Analisis potensi ini diharapkan menambal celah pengetahuan mengenai dampak struktur vertikal suhu laut terhadap potensi energi OTEC. Sinergi antara hasil dan studi sebelumnya memperkuat argumen bahwa Laut Barat Sumatera bukan hanya kaya SST permukaan yang tinggi, tetapi juga memiliki perbedaan suhu vertikal (ΔT) yang stabil dan mendalam, yang menjadi indikator kesiapan untuk pemanfaatan OTEC secara komersial dan operasional.



Gambar 1. Distribusi Suhu Laut Permukaan Secara Spasial Visualisasi Bulanan Hasil ODV



Gambar 2. Profil Vertikal Bulanan Suhu Laut untuk Musim DJF dan MAM



Gambar 3. Profil Vertikal Bulanan Suhu Laut untuk Musim JJA dan SON

2. Karakteristik Termoklin dan Analisis Vertikal

Lapisan termoklin yang diamati pada profil vertikal suhu laut memperlihatkan perubahan suhu yang signifikan pada kedalaman antara 30–80 m hingga ±1000 m. Hal ini mengindikasikan keberadaan zona transisi termal yang penting dalam sistem OTEC karena menciptakan perbedaan suhu vertikal (ΔT) yang besar. Menurut Amalia (2019), lapisan awal termoklin ditentukan saat gradien suhu (G_j) mencapai $0,1^\circ\text{C}/\text{m}$, sementara batas bawah ditentukan melalui grafik vertikal. Rangkuman rentang kedalaman termoklin dan mix layer ditunjukkan dalam tabel 1. Berikut merupakan range setiap lapisan vertikal Laut Barat Sumatera:

Tabel 1. Rentang Termoklin dan Kedalaman

Bulan	Mix Layer (m)	Lapisan Termoklin (m)	Kedalaman (m)
Januari	0 – 40,344	40,344 – 700	>700
Februari	0 – 40,344	40,344 – 700	>700
Maret	0 – 29,445	29,445 – 700	>700

April	0 – 34,434	34,434 – 700	>700
Mei	0 – 65,807	65,807 – 800	>800
Juni	0 – 77,854	77,854 – 1000	>1000
Juli	0 – 65,807	65,807 – 1000	>1000
Agustus	0 – 65,807	65,807 – 1300	>1300
September	0 – 55,764	55,764 – 1000	>1000
Oktober	0 – 65,807	65,807 – 1000	>1000
November	0 – 77,854	77,854 – 1000	>1000
Desember	0 – 77,854	77,854 – 1000	>1000
Rata-rata	0 – 58,093	58,093 – 908,33	>908,33

(Sumber: Hasil Olah Data ODV)

Pada musim peralihan I (Maret–Mei), rata-rata ketebalan mix layer laut permukaan hanya sekitar 43,2 m, sedangkan termoklin mencapai 690,1 m. Sebaliknya, pada musim peralihan II (September–November), mix layer menebal menjadi 66,5 m, dan termoklin memanjang hingga 933,5 m. Perbedaan ini mencerminkan dinamika kombinasi antara gaya angin, curah hujan, fenomena iklim, dan letak geografis. Faktor pertama ialah perbedaan pola angin muson. Pada peralihan II, kelembapan dan angin southeast monsoon (bulan JJA-SO aktivitasnya menurun namun transfer momentum horizontal masih kuat) cenderung menimbulkan upwelling pantai dan perkuatan arus ITF ke arah selatan, yang secara oceanik mendorong subsurface water yang lebih dingin dan salinitas lebih tinggi, mempertebal lapisan termoklin, sementara mix layer tetap dangkal karena gradient stabil (Putra et al., 2023). Sebaliknya, peralihan I memiliki angin lebih lembut, sehingga proses pencampuran mekanik tidak sekuat peralihan II.

Faktor kedua adalah curah hujan tinggi yang muncul akut, terutama akibat Madden–Julian Oscillation (MJO). Di wilayah pantai barat Sumatra, fase aktif MJO sering menyebabkan hujan deras dalam waktu singkat, menghasilkan lapisan haloklin stabil di permukaan dan penebalan barrier layer hingga puluhan meter dalam 24 jam saja—yang secara langsung menekan pertumbuhan mix layer dan menyebabkan isothermal layer mendalam (Moteki et al., 2018). Faktor ketiga melibatkan karakteristik wilayah geografis, dengan pantai barat Sumatra yang rentan terhadap interaksi land–sea breeze serta konvergensi massa udara dari Teluk Benggala, Laut Jawa, dan Samudra Hindia. Ini menciptakan variasi salinitas dan penyebaran massa air ke laut dalam, tergantung musim dan arah angin muson, yang selanjutnya mempengaruhi struktur vertikal suhu laut.

Dengan memperhatikan interaksi ketiga faktor ini, terjalin pemahaman bahwa lapisan mix layer yang lebih tebal dan termoklin yang lebih dalam pada peralihan II disebabkan oleh dominasi dinamika mekanik angin dan ITF, sementara pada peralihan I, dominasi hidrologi atmosfer (hujan/MJO) dan stabilisasi permukaan menyebabkan mix layer lebih tipis meskipun gradient termoklin tidak setajam peralihan II. Studi lain juga mengungkap bahwa kedalaman mix layer di perairan Indonesia sangat sensitif terhadap pola angin monsun musiman, dengan mix layer lebih dalam pada angin monsun yang kuat, dan termoklin lebih tebal ketika upwelling berperan besar.

3. Efisiensi Energi Sistem OTEC

Menurut Kenneth J. Bell (2011) pada artikel *Ocean Thermal Energy Conversion*, efisiensi Carnot maksimum dari siklus OTEC dengan perbedaan suhu sekitar dua puluh derajat Celsius hanya sekitar tujuh persen, sedangkan efisiensi neto praktikalnya dalam kondisi laboratorium atau pembangkit percobaan berkisar antara satu koma lima hingga

dua persen. Analisis historis menunjukkan bahwa sistem OTEC generasi awal mencatat efisiensi termal rata-rata satu hingga tiga persen, jauh di bawah batas teoritis enam hingga tujuh persen yang diprediksi oleh siklus Carnot. Perbedaan ini mencerminkan realitas teknis: kerugian di pompa air laut, hambatan pada pertukaran panas, dan beban parasitik sistem yang masih tinggi pada skala kecil.

Dalam konteks penelitian di Laut Barat Sumatra, angka efisiensi Carnot sebesar 0,70 atau 70 % yang dikombinasikan dengan asumsi temperatur dalam Celsius sebaiknya diluruskan bahwa ini bukanlah efisiensi Carnot mutlak dalam skala Kelvin. Efisiensi maksimum sekitar tujuh persen baru bisa dicapai ketika menggunakan selisih suhu sebagai proporsi terhadap skala absolut (Kelvin), dan efisiensi net aktual bahkan bisa jauh lebih rendah dari tiga persen apabila memperhitungkan faktor parasitik pada instalasi riil.

Efisiensi memiliki aspek teoritis untuk menentukan hubungan antar variabel teknologi mesin uap yang menghasilkan energi dari potensi panas laut yang dikembangkan dengan cepat dengan efisiensi yang membantu dalam produksi (Sinuhaji, 2015). Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa efisiensi energi Pengembangan OTEC di Laut Barat sumatera rata-rata sebesar 0,70, yang berarti bahwa jika dibutuhkan daya masukan sebesar 100 KW dan efisiensi Carnot sebesar 0,70 maka daya bersih menjadi 70 KW. Perhatikan Tabel 2. menunjukkan nilai efisiensi energi berdasarkan perhitungan efisiensi Carnot:

Tabel 2. Efisiensi Nilai Carnot (η) Periode Bulanan

Bulan	T_w (°C)	T_c (°C)	ΔT	Kedalaman (m)	Efisiensi Carnot (η)
Januari	29,86	8,96	20,90	600	0,70
Februari	30,17	8,88	21,29	600	0,71
Maret	30,57	8,82	21,75	600	0,71
April	30,36	9,09	21,27	600	0,70
Mei	30,36	9,08	21,28	600	0,70
Juni	30,21	8,90	21,31	600	0,71
Juli	29,90	8,99	20,91	600	0,70
Agustus	30,01	8,98	21,03	600	0,70
September	29,66	8,74	20,92	600	0,71
Oktober	29,64	8,81	20,83	600	0,70
November	29,28	9,25	20,03	600	0,68
Desember	29,48	9,06	20,42	600	0,69
Rata-rata	29,96	8,96	21,00	600	0,70

(Sumber: Hasil Olah Data Penelitian)

Kesimpulan

Kondisi suhu laut di wilayah Laut Barat Sumatera—rata-rata permukaan 29,3 °C hingga 30,57 °C dan suhu perairan dalam (≥ 600 m) sebesar 8,74 °C hingga 9,25 °C—menghasilkan selisih suhu vertikal (ΔT) rata-rata sekitar 21 °C, yang berada di atas batas ambang minimal ~ 20 °C yang diperlukan untuk operasional sistem OTEC sesuai dengan perhitungan Carnot dan standar desain sistem OTEC. Pada kondisi tropis laut, ΔT semacam ini dikategorikan baik secara teknis untuk konversi energi. Studi oleh Syamsuddin et al. (2015), yang melakukan survei suhu laut tahun 2009 di beberapa perairan Indonesia, melaporkan ΔT sebesar 21,11 °C di Kalimantan Selatan (depth ~ 500 m) dan 21,78 °C di Sulawesi Utara, dengan efisiensi Carnot (η) tertinggi sekitar 0,74. Wilayah pantai barat Sumatra dicantumkan sebagai lokasi potensial utama OTEC, dengan ΔT dan kedalaman yang memenuhi syarat teknis sistem OTEC. Temuan riset di Barat Sumatra memiliki karakteristik ΔT dan kedalaman yang konsisten dengan hasil-

hasil tersebut. Secara keseluruhan, hasil pengukuran ΔT stabil 21 °C, kedalaman air laut >600 m, ketebalan termoklin konsisten, dan efisiensi Carnot teoritis 0,70 selaras dengan potensi yang diidentifikasi dalam studi OTEC nasional dan desain pembangkit terapung di sekitar Siberut/Mentawai. Condongnya karakteristik ini membuat Laut Barat Sumatra sangat cocok sebagai kandidat situs implementasi OTEC skema pilot maupun potensi komersial jangka menengah. Dengan menutup gap data jangka panjang dan integrasi atmosfer-laut, data Anda sudah cukup kuat untuk mendukung Bab Kesimpulan ini sebagai pondasi argumen teknis pengembangan OTEC di Indonesia.

Daftar Pustaka

- Achiruddin, D. (2015). Strategy to Develop Indonesian OTEC Resources. *Renewable Energy and Energy Conversion Conference, Bali*.
- Alkatiri, A. I. M., Sutrisno, A., & Karwandy, R. (2011). Seasonal Variability of Sea Surface Temperature in Indonesian Waters: Influence of Monsoon Transitions. *Jurnal Oseanologi Nasional*, 6(2), 45–55.
- Amalia, D. (2019). Karakteristik Termoklin di Laut Arafura. *Jurnal Ilmu Kelautan*, 24(2), 85–91.
- Avery, W. H., & Wu, C. (1994). *Renewable Energy From the Ocean: A Guide to Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)*. New York, NY: Oxford University Press.
- Bernardoni, C., Binotti, M., & Giostri, A. (2019). Techno-Economic Analysis of Closed-Cycle OTEC Systems for Power Generation. *Renewable Energy*, 132, 1018–1033.
- Cao, G., Xu, T., He, Y., Wang, L., Wang, D., Wei, Z., & Zhu, Y. (2019). Seasonality in Intraseasonal Sea Surface Temperature Variability Along the Sumatra–Java Southern Coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124, 5138–5157.
- Ikegami, Y., Bejan, A., Yasunaga, T., Morisaki, T., & Others. (2018). Ocean Thermal Energy Conversion Using a Double-Stage Rankine Cycle. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(21), 1–21.
- Kim, A. S., Kim, H.-J., Lee, H.-S., & Cha, S. (2016). Dual-Use Open Cycle OTEC Using Multiple Condensers for Adjustable Power Generation and Seawater Desalination. *Renewable Energy*, 85, 344–358.
- Koto, J. (2016). Potential of Ocean Thermal Energy Conversion in Indonesia. *International Journal of Environmental Research & Clean Energy*, 4(1), 1–7.
- MDPI. (2021). Ocean Thermal Energy Conversion and Other Uses of Deep Sea Water. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 356.
- Nakib, T. H., Hasanuzzaman, M., Rahim, N. A., Habib, M. A., Adzman, N. N., & Amin, N. (2025). Global Challenges of Ocean Thermal Energy Conversion and Its Prospects: A Review. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 11(1), 197–231.
- Octaviani, F., Muslim, B. M., Faturachman, C. D., & Buwono, D. A. (2016). Study of Ocean Thermal Energy Conversion Generation as a Power Plant in West Sumatera–Indonesia. *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, 10, 65–69.
- Potemra, J. T., & Schneider, N. (2007). Influence of Low-Frequency Indonesian Throughflow Transport on Temperatures in the Indian Ocean in a Coupled Model. *Journal of Climate*, 20(7), 1339–1357.
- Putra, D. R., Natih, N. M. N., & Purwandana, A. (2023). Seasonal Variation of Mixed Layer Depth and Thermocline Thickness From CTD/Argo Float Data in the Southern Makassar Strait. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1137, 012010.

- Rachman, G. F., Wirasatriya, A., & Setiyono, H. (2023). Implications of ENSO and IOD on Thermocline Thickness in the Southern Indonesian Waters. *Indonesian Journal of Oceanography*, 5(1), 57–68.
- Radjawane, I. M., Nurdjaman, S., & Apriansyah, A. (2015). Seasonal Variability of Mixed Layer Depth in Indonesian Seas. *AIP Conference Proceedings*, 1677(1), 060010.
- Rajagopalan, K., & Nihous, G. (2013). Assessment of Global OTEC Resources. *Journal of Energy Resources Technology*, 135(4), 041202.
- Syamsuddin, M. L., Attamimi, A., Nugraha, A. P., Gibran, S., Afifah, A. Q., & Oriana, N. (2015). OTEC Potential in the Indonesian Seas: Temperature Gradient and Carnot Efficiency. *Energy Procedia*, 65, 215–222.
- Wahyudi, A., Susilo, S. B., & Panjaitan, J. P. (2018). Seasonal-Temporal Variability of Sea Surface Temperature Derived From Satellite and In Situ Data: Case Study of Indian Ocean Western Part of Sumatera Island. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 135, 012016.
- Wijaya, A., Zakiyah, U., Sambah, A. B., & Setyohadi, D. (2020). Spatio-Temporal Variability of Sea Surface Temperature and Chlorophyll-a in Bali Strait, Indonesia. *Biodiversitas*, 21(11), 5283–5290.
- Yasunaga, T., Noguchi, T., Morisaki, T., & Ikegami, Y. (2018). Basic Heat Exchanger Performance Evaluation Method on OTEC. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6, 32.