



Tersedia daring di Portal Jurnal UNSRAT

Jurnal Ilmiah PLATAX

Beranda jurnal: <https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/platax>

ARTIKEL PENELITIAN / RESEARCH ARTICLE

e-ISSN 2302-3589

Potensi Termal Perairan Laut Sulawesi Utara sebagai Sumber Energi Terbarukan

The Thermal Potential of North Sulawesi Sea Waters as a Renewable Energy Source

Judul singkat (running title): Potensi Termal Perairan Laut Sulawesi Utara

Patrice N.I. Kalangi^{1*}, Kakaskasen A. Roeroe², Vivanda O.J. Modaso¹, Hosea F. Tapahing¹¹Program Studi Pemanfaatan Sumberdaya Perikanan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Sam Ratulangi, Kota Manado, 95115, Indonesia²Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Sam Ratulangi, Kota Manado, 95115, Indonesia

Abstract

Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) is a promising renewable energy technology that utilizes the temperature difference between warm surface water and cold deep-layer water to generate electricity continuously. This study examines the spatial potential for OTEC development in North Sulawesi based on water column temperature characteristics and the distance from the coastline to the required depth. Temperature profiles were derived from field measurements and the Copernicus Marine Data dataset, then used to characterize the thermal gradient between surface and deep water layers. Surface water temperatures at depths of 2–60 m ranged from 26.61 to 30.21 °C, while temperatures at depths of 700–800 m ranged from 4.99 to 7.03 °C. The resulting temperature difference (ΔT) ranged from 20.38 to 24.80 °C, indicating favorable thermal condition for OTEC operations. Four sites, i.e. Manado Tua Island, Bangka Island, Inobonto, and Beniha, were identified as potential OTEC locations. Preliminary estimates of power generation potential were calculated using available ΔT conditions, estimated cold-water pipe lengths ranging from 3.0 to 12.4 km, and standard OTEC design parameters. Manado Tua Island showed the highest estimated average power potential at 87.83 ± 3.85 MW, followed by Bangka Island, while Inobonto showed the lowest value at 85.77 ± 3.77 MW. Considering thermal resources and cold-water pipe requirements, Manado Tua Island and Bangka Island emerge as prime locations for further OTEC development. These findings provide an initial spatial assessment of OTEC resource in North Sulawesi and serve as a foundation for subsequent techno-economic feasibility and engineering studies to support marine-based renewable energy development in Indonesia.

Keywords: bathymetry, OTEC, renewable energy, Maluku Sea, Sulawesi Sea

Abstrak

Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) merupakan teknologi energi terbarukan potensial yang memanfaatkan selisih suhu air hangat di permukaan dengan suhu air dingin di lapisan dalam untuk menghasilkan listrik secara kontinu. Studi ini mengkaji potensi spasial pembangunan OTEC di Sulawesi Utara berdasarkan karakteristik suhu kolom air dan jarak dari garis pantai ke kedalaman yang dibutuhkan. Profil suhu diperoleh dari pengukuran lapangan dan kumpulan data Copernicus Marine Data, kemudian digunakan untuk mengkarakterisasi selisih termal antara lapisan air permukaan dan air dalam. Suhu air lapisan permukaan pada kedalaman 2–60 m berkisar antara 26,61 dan 30,21 °C, sedangkan suhu pada kedalaman 700–800 m berkisar antara 4,99 dan 7,03 °C. Selisih suhu (ΔT) yang dihasilkan berkisar dari 20,38 hingga 24,80 °C, menunjukkan kondisi termal yang menguntungkan untuk operasi OTEC. Empat lokasi, yakni Pulau Manado Tua, Pulau Bangka, Inobonto, dan Beniha, diidentifikasi sebagai lokasi potensial OTEC. Estimasi awal potensi daya listrik dilakukan dengan menggunakan kondisi ΔT yang tersedia, perkiraan kebutuhan panjang pipa air dingin berkisar antara 3,0 dan 12,4 km, serta parameter desain OTEC standar. Pulau Manado Tua menunjukkan estimasi potensi daya rata-rata tertinggi sebesar $87,83 \pm 3,85$ MW, diikuti Pulau Bangka, sementara Inobonto menunjukkan nilai terendah sebesar $85,77 \pm 3,77$ MW. Dengan mempertimbangkan sumber daya termal dan kebutuhan pipa air dingin, Pulau Manado Tua dan Pulau Bangka muncul sebagai lokasi pengembangan OTEC lebih lanjut. Temuan ini memberikan penilaian spasial awal mengenai sumber daya OTEC di Sulawesi Utara dan menjadi dasar bagi studi kelayakan teknis-ekonomi serta rekayasa selanjutnya guna mendukung pengembangan energi terbarukan berbasis laut di Indonesia.

Kata kunci: batimetri, OTEC, energi terbarukan, Laut Maluku, Laut Sulawesi

1. Pendahuluan

Indonesia sebagai negara kepulauan dengan luas lautan (termasuk ZEE) sebesar 6.4 juta km² yang mencakup 77% dari luas wilayah Indonesia (DJPR, 2022) mempunyai sumber daya energi laut yang sangat potensial (ESDM, 2017; Presiden Republik Indonesia, 2017). Ada tiga teknologi energi listrik terbarukan yang dapat dihasilkan dari perairan laut yang telah dikembangkan, yakni energi yang dihasilkan dari gerakan pasang surut, gelombang, dan

perbedaan termal antara lapisan permukaan dan lapisan di kedalaman (Speight, 2022). Konversi energi dari perbedaan termal laut (*ocean thermal energy conversion*, OTEC) merupakan teknologi menghasilkan listrik secara tidak langsung dari energi matahari dengan memanfaatkan perbedaan suhu antara permukaan laut yang dihangatkan matahari dan air pada kedalaman sekitar 1000 m yang lebih dingin (Kempener & Neumann, 2014; Masutani & Takahashi, 2018; Speight, 2022).

Diterima (Received): 16 Agustus 2026 Direvisi (Revised): 30 Agustus 2026 Disetujui (Accepted): 7 September 2026

*Penulis korespondensi (Corresponding author): Patrice N.I. Kalangi

Program Studi Pemanfaatan Sumberdaya Perikanan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Sam Ratulangi, Kota Manado, 95115, Indonesia

Tel: [+62-XXXXXXX], E-mail: patrice.kalangi@unsrat.ac.id<https://doi.org/10.35800/jip.v14i2.69628>

Artikel ini merupakan artikel Open Access yang didistribusikan di bawah ketentuan Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), yang mengizinkan penggunaan, distribusi, dan reproduksi non-komersial dalam media apa pun, selama karya asli disitasi dengan benar.

Hak Cipta © [Tahun] Penulis. Diterbitkan oleh Jurnal Ilmiah PLATAX, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Sam Ratulangi.

<https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/platax>

Sistem OTEC mengandalkan perbedaan suhu minimum (ΔT) setidaknya 20 °C antara permukaan dan perairan dalam untuk konversi energi yang efektif (Aresti dkk., 2023; Ghaedi dkk., 2024; Ilahude dkk., 2020). Suhu permukaan laut Indonesia berkisar antara 25,3 °C dan 31,32 °C. Variasi suhu terbesar terjadi saat musim angin timur laut yang mendorong terjadinya upwelling (Purba & Khan, 2019). Pada kedalaman 1000 m, suhu relatif stabil pada sekitar 4 °C. Dengan demikian, kisaran perbedaan suhu air permukaan dan suhu air di kedalaman 1000 m adalah 21–26 °C.

Di wilayah perairan Indonesia banyak lokasi potensial untuk pembangkit listrik menggunakan OTEC, baik di pantai maupun di lepas pantai. Perairan utara Bali mempunyai nilai ΔT mulai dari 22 °C hingga 25 °C dekat dengan pantai (Ilahude dkk., 2020). Sementara itu, di ujung utara Selat Makassar, selisih suhu air permukaan dan suhu air dalam di atas 20 °C yang berada di atas 18 km dari pantai cocok untuk pembangkit lepas pantai (Hammad dkk., 2020).

Kedalaman air secara signifikan berdampak pada pasokan air dingin yang diperlukan untuk operasi OTEC. Perairan yang dalam mempunyai pasokan air dingin yang besar (Kempener & Neumann, 2014), sehingga dapat mempertahankan kondisi yang dingin (H.-J. Kim dkk., 2021).

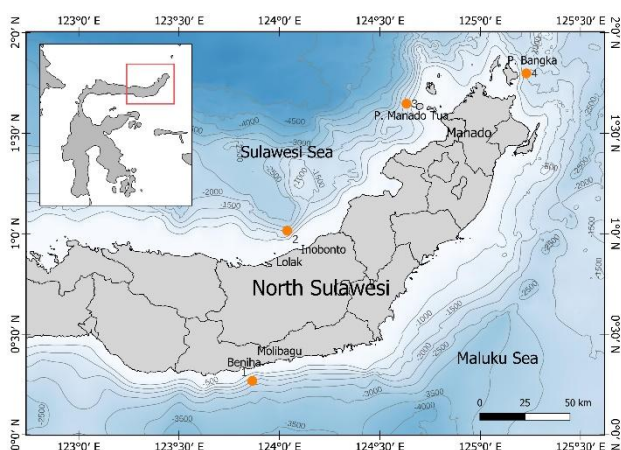
Selain itu, batimetri perairan juga menjadi faktor penting. Situs ideal sering menampilkan topografi bawah air yang curam yang memungkinkan akses yang lebih mudah ke air dingin (Gumede, 2021). Pipa air dingin (*cold-water pipe*, CWP) dapat mengalami pemindahan panas yang selanjutnya dapat mengurangi perbedaan suhu efektif sebesar 1–3 °C karena pemanasan dari air di sekitarnya (Firmansyah dkk., 2024). Untuk bangunan OTEC yang terletak di daratan pantai, perairan yang landai akan membutuhkan lebih panjang pipa air dingin dan hal ini akan memperburuk masalah pemindahan panas.

Perairan Sulawesi Utara yang terletak di daerah tropis memiliki suhu air permukaan yang hangat. Namun demikian, informasi sebaran selisih suhu potensial yang dibutuhkan oleh OTEC belum cukup tersedia. Di samping itu, dalam penentuan untuk lokasi pembangkit di darat perlu mempertimbangkan jarak ke sumber termalnya. Artikel ini memaparkan potensi perairan laut Sulawesi Utara untuk pembangunan pembangkit listrik OTEC berdasarkan selisih suhu lapisan permukaan dan lapisan kedalaman, dan jarak garis kontur batimetri 1000 m dari garis pantai.

2. Bahan dan Metode

2.1. Waktu dan lokasi penelitian

Penelitian ini difokuskan di wilayah perairan laut Sulawesi Utara yang meliputi Laut Sulawesi di sebelah utara, dan Laut Maluku di sebelah timur dan selatan (Gambar 1). Pengambilan data lapangan dilakukan pada bulan Oktober–November 2025.



Gambar 1. Area penelitian di perairan laut Sulawesi Utara dan titik-titik lokasi pilihan.

Figure 1. Research area in North Sulawesi sea waters and selected site spots.

2.2. Pengumpulan data

Data yang dikumpulkan meliputi data suhu kolom air *in situ* dan data suhu 4D (ruang dan waktu). Data suhu kolom air diukur di dua stasiun, yakni di sebelah barat laut Pulau Manado Tua (1°44'33,9" LU – 124°35'06,1" BT), dan di sebelah timur Pulau Bangka (1°47'50,3" LU – 125°13'48,1" BT). Pengukuran profil suhu dilakukan hingga kedalaman 50 m dari atas perahu dengan OpenCTD profiler. Stasiun pengukuran ditentukan dengan GPS genggam Garmin GPS Map 64S. Data suhu 4D untuk seluruh wilayah perairan laut Sulawesi Utara periode tahun 2010–2024 diambil dari data Global Ocean Physics Reanalysis (CMEMS, 2025) di portal Copernicus Marine Data Store, E.U. Copernicus Marine Service (<https://data.marine.copernicus.eu/products>). Selain itu, data batimetri diunduh dari situs General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO Compilation Group, 2025).

2.3. Analisis data

Data CTD dan Copernicus dipetakan untuk mendapatkan profil suhu vertikal, secara berurut, masing-masing di dua dan empat lokasi. Keempat lokasi tersebut adalah perairan sebelah barat laut P. Manado Tua, perairan sebelah timur P. Bangka, perairan Inobonto/Lolak, dan perairan Benih/Molibagu. Untuk data Copernicus, profil suhu vertikal dipetakan hingga kedalaman 1000 m. Validitas pengukuran di lapisan permukaan antara data CTD dan Copernicus diuji secara statistik berdasarkan *root mean square of error* (RMSE) dan *mean bias error* (MBE) (Bordone dkk., 2020). Selain profil suhu vertikal, data Copernicus dipakai untuk mendapatkan peta sebaran horizontal suhu permukaan perairan laut Sulawesi Utara.

Estimasi potensi daya listrik yang dapat dihasilkan oleh suatu pembangkit OTEC dapat dilakukan dengan dua cara, yakni pendekatan heuristik (Rasgianti dkk., 2024) dan perhitungan pembangkit aktual (Nihous, 2007). Langkah heuristik memanfaatkan nilai-nilai estimasi untuk berbagai nilai dari suatu sistem yang kompleks dan membutuhkan perhitungan yang rumit. Sedangkan sistem perhitungan berdasarkan pembangunan pembangkit, semua aspek teknis dihitung secara detail. Dalam penelitian ini, analisis dilakukan menggunakan pendekatan heuristik berdasarkan perbedaan suhu air laut lapisan permukaan dan air laut lapisan dalam. Tahapan analisis meliputi penentuan efisiensi Carnot, perhitungan daya bruto dan daya bersih, serta estimasi potensi total.

Efisiensi Carnot (η_{Carnot}) digunakan sebagai batas teoritis maksimum konversi energi termal menjadi kerja dan dihitung dengan (Avery & Wu, 1994):

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_{warm} - T_{cold}}{T_{warm}} = \frac{\Delta T}{T_{warm}}$$

Suhu absolut air laut hangat dihitung dengan $T_{warm} = T$ (°C) + 273,15. Efisiensi aktual OTEC lebih rendah dari efisiensi teoritis Carnot karena perpindahan panas yang tidak dapat balik, efisiensi turbin dan pompa, serta kerugian-kerugian hidrolik (Liu dkk., 2020; National Research Council (U.S.), 2013).

Daya bruto OTEC dihitung menggunakan (Nihous, 2007)

$$P_{gross} = \dot{V}_c \frac{3\rho c_p \eta_{tg} \gamma (\Delta T)^2}{16(1 + \gamma) T_w},$$

dengan $\dot{V}_c$ adalah debit air dingin sebagai fungsi dari kecepatan aliran dalam pipa, ρ adalah densitas air laut (1025 kg/m³), c_p adalah kapasitas panas spesifik (4000 J/(kg K)), η_{tg} adalah efisiensi turbo-generator (0,75), dan γ adalah rasio aliran air hangat terhadap air dingin (1,5).

Kerugian hidrolik pada CWP dihitung menggunakan persamaan Darcy-Weisbach (White, 2016),

$$h_f = f \frac{L v^2}{D 2g},$$

dengan faktor gesekan f ditentukan dari bilangan Reynolds, L (m) adalah panjang pipa air dingin, v adalah kecepatan aliran air dingin dalam pipa (m/s), D adalah diameter pipa, dan g adalah percepatan gravitasi (9,81 m/s²). Daya pompa untuk mengatasi kehilangan gesekan kemudian dihitung mengikuti

$$P_{\text{pump}} = \frac{\rho g \dot{V}_c h_f}{\eta_p},$$

dengan efisiensi pompa $\eta_p = 0,80$. Daya bersih sistem selanjutnya didefinisikan sebagai

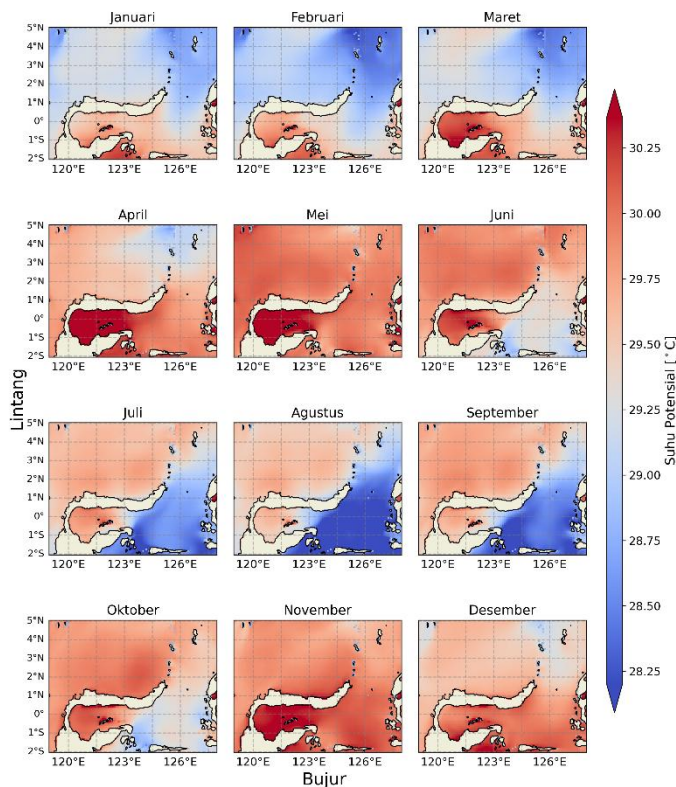
$$P_{\text{net}} = P_{\text{gross}} - P_{\text{pump}}.$$

Uji sensitivitas dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari perubahan nilai parameter. Simulasi sesuai skenario lokasi dilakukan untuk membandingkan potensi daya listrik dari keempat lokasi. Perangkat lunak utama yang digunakan dalam memetakan dan menganalisis data adalah Python dengan paket antara lain Pandas, Xarray, Matplotlib, dan Cartopy; dan QGIS 3.40.2.

3. Hasil

3.1. Sebaran suhu permukaan dan profil suhu vertikal

Sebaran suhu potensial permukaan atas rata-rata periode 2010–2024 bervariasi menurut bulan dan sangat kontras antara Laut Sulawesi dan Laut Maluku (Gambar 2). Suhu permukaan atas berkisar antara 28,0 °C dan 30,5 °C. Suhu yang hangat mendominasi pada bulan-bulan Mei–Juni dan Oktober–Desember. Suhu hangat maksimum terjadi hampir sepanjang tahun di Teluk Tomini. Suhu yang dingin terjadi pada bulan-bulan Januari–April dan lebih nyata pada bulan-bulan Juli–September. Suhu terdingin terjadi terutama di Laut Maluku.

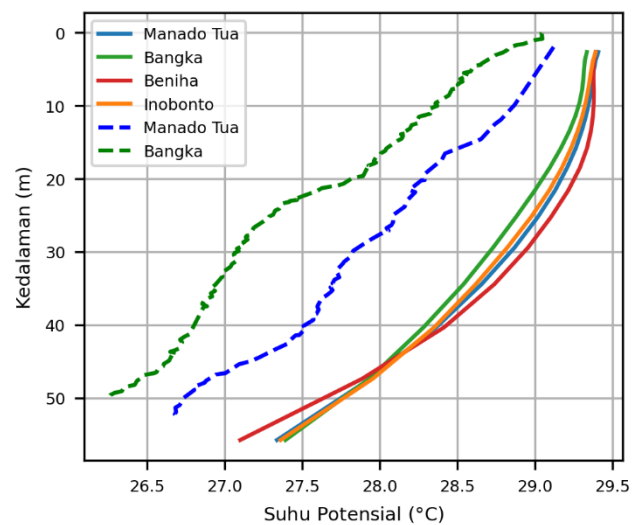


Gambar 2. Sebaran suhu permukaan atas rata-rata bulanan periode 2010–2024. Sumber: CMES (2025).

Figure 2. Monthly average top-surface temperature distribution for the 2010–2024 period. Source: CMES (2025).

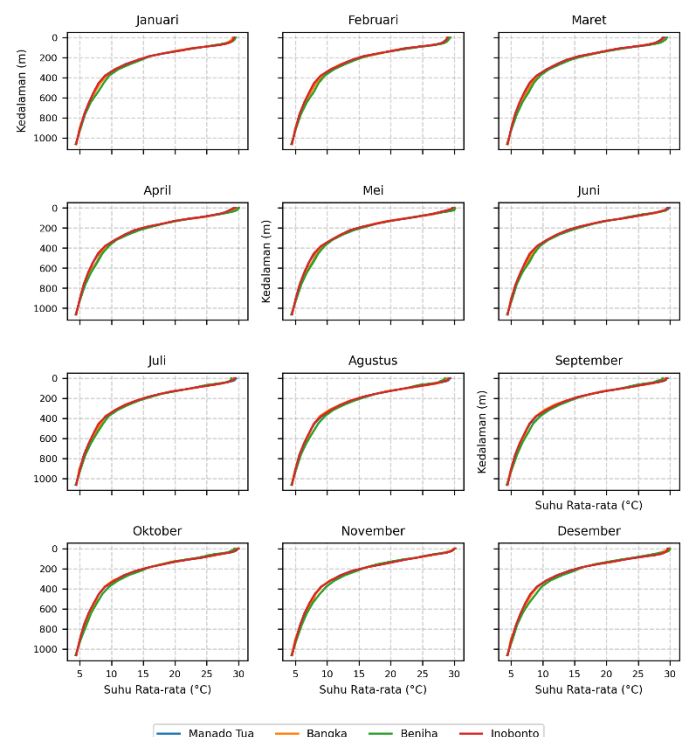
Profil suhu potensial vertikal lapisan permukaan berdasarkan data Copernicus untuk empat stasiun dan data CTD untuk dua stasiun ditunjukkan pada Gambar 3. Suhu permukaan atas pada kedalaman <2 m yang relatif lebih tinggi telah diabaikan untuk keperluan perhitungan OTEC. Membandingkan data pengukuran CTD dengan data Copernicus, suhu pengukuran CTD lebih rendah, dan perbedaan semakin besar di bagian bawah lapisan. Hasil uji validasi statistik mendapatkan RMSE = 1,11 °C dan MBE = 1,06 °C untuk perairan P. Manado Tua pada bulan Oktober, untuk perairan P. Bangka pada bulan November didapatkan RMSE = 1,53 °C dan MBE = 1,51 °C. Selain suhu lebih hangat, data Copernicus lebih smooth.

Secara umum, profil vertikal suhu rata-rata bulanan pada kedalaman hingga 1000 m periode 2010–2024 di empat stasiun memiliki kemiripan (Gambar 4). Ketebalan lapisan permukaan (*mixed layer depth*) mencapai sekitar 60 m pada bulan-bulan Desember sampai Maret. Lapisan termoklin berada pada lapisan 60–400 m. Variasi suhu antar lokasi terjadi di sekitar dasar lapisan termoklin. Lapisan dingin (<8 °C) berada pada kedalaman di bawah 400 m.



Gambar 3. Suhu potensial di lapisan permukaan. Garis-garis solid adalah data Copernicus, sedangkan garis putus-putus adalah data CTD.

Figure 3. Potential temperature in the surface layer. Solid lines represent Copernicus data, while dashed lines represent CTD data.



Gambar 4. Suhu vertikal rata-rata bulanan periode 2010–2024. Sumber: CMES (2025).

Figure 4. Monthly average vertical temperature for 2010–2024 period. Source: CMES (2025).

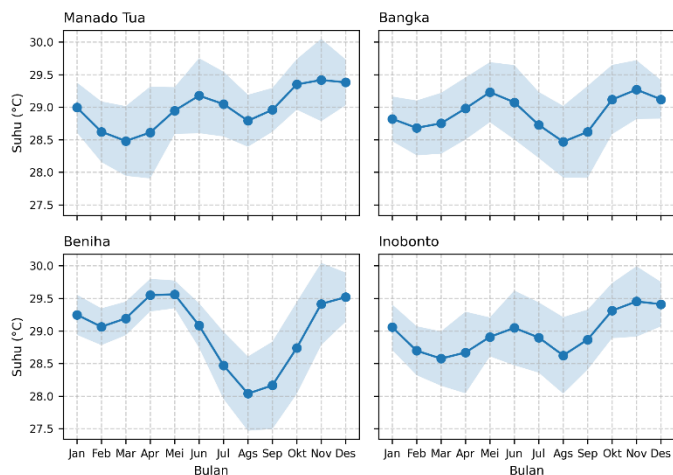
3.2. Selisih suhu lapisan permukaan dengan lapisan dalam

Gambar 5 memperlihatkan fluktuasi suhu lapisan permukaan rata-rata bulanan. Dalam setahun, suhu rendah dan suhu tinggi terjadi dua kali. Di stasiun Beniha dan P. Bangka, suhu rendah musiman rata-rata terjadi pada bulan Februari dan Agustus. Suhu

terendah yang mencapai 28 °C terjadi pada bulan Agustus di stasiun Beniha. Di stasiun Inobonto dan P. Manado Tua, suhu rendah musiman terjadi pada bulan April dan Agustus dengan suhu lebih rendah pada bulan April.

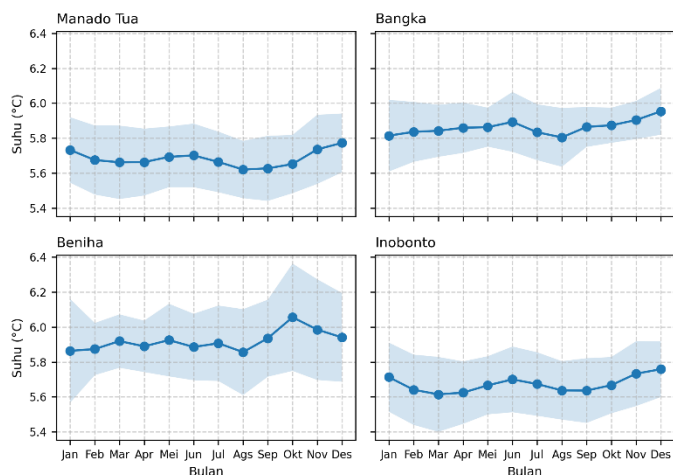
Suhu rata-rata bulanan lapisan kedalaman 700–800 m tidak berfluktuasi sejalas pada lapisan permukaan dan cenderung konstan (Gambar 6). Suhu rata-rata lapisan dalam berkisar antara 5,8 °C dan 6,1 °C.

Gambar 7 memperlihatkan selisih suhu (ΔT) lapisan permukaan dengan lapisan dalam. Seperti pada Gambar 5, selisih suhu berfluktuasi secara periodik. Selisih suhu yang rendah terjadi pada bulan-bulan Februari–Maret dan Agustus–September. Stasiun Beniha mempunyai perubahan selisih suhu rata-rata yang paling besar (mencapai 1,4 °C), dan selisih suhu rata-rata terendah ($22,2 \pm 0,66$ °C) terjadi pada bulan Agustus–September.



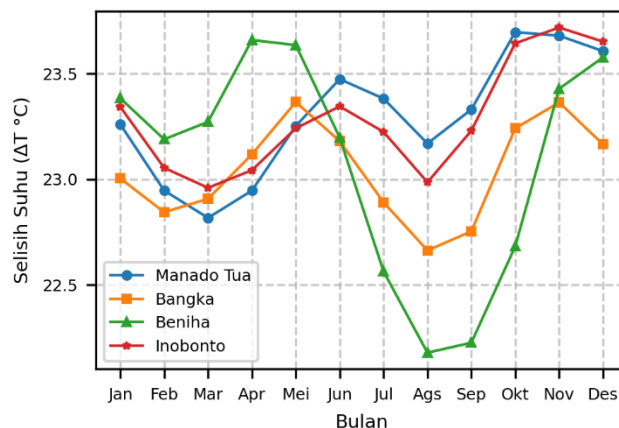
Gambar 5. Suhu rata-rata dan standar deviasi ($\pm 1\sigma$) bulanan pada lapisan permukaan. Sumber: CMES (2025).

Figure 5. Monthly average temperature and standard deviation ($\pm 1\sigma$) at the surface layer. Source: CMES (2025).



Gambar 6. Suhu rata-rata dan standar deviasi ($\pm 1\sigma$) bulanan pada lapisan 700–800 m. Sumber: CMES (2025).

Figure 6. Monthly average temperature and standard deviation ($\pm 1\sigma$) in the 700–800 m layer. Source: CMES (2025).



Gambar 7. Selisih suhu rata-rata bulanan lapisan permukaan dengan lapisan dalam. Sumber: CMES (2025).

Figure 7. Difference in average monthly temperature between the surface layer and the deep layer. Source: CMES (2025).

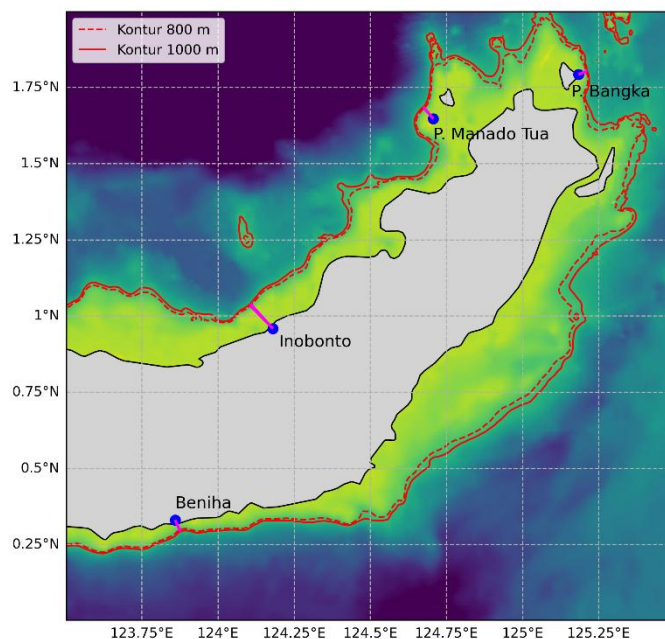
Tabel 1. Kisaran suhu lapisan permukaan (2–60 m) dan lapisan kedalaman (700–800 m) serta selisih suhu ΔT antara kedua lapisan di empat stasiun.

Table 1. Temperature ranges of the surface layer (2–60 m) and the deep layer (700–800 m), and the temperature difference ΔT between the two layers at four stations.

Stasiun	Suhu Lapisan Permukaan (°C)		Suhu Lapisan Dalam (°C)		Delta T (°C)	
	Kisaran	Rata-Rata	Kisaran	Rata-Rata	Kisaran	Rata-Rata
P. Manado Tua	27,75–30,05	29,04 $\pm$ 0,40	5,10–6,05	5,68 $\pm$ 0,18	22,13–24,70	23,35 $\pm$ 0,40
P. Bangka	27,68–29,87	28,96 $\pm$ 0,35	5,42–6,30	5,86 $\pm$ 0,14	21,86–24,06	23,10 $\pm$ 0,34
Beniha	26,61–30,21	29,05 $\pm$ 0,36	5,04–7,03	5,92 $\pm$ 0,22	20,38–24,13	23,13 $\pm$ 0,41
Inobonto	27,69–30,04	29,02 $\pm$ 0,39	4,99–6,01	5,67 $\pm$ 0,18	22,05–24,80	23,34 $\pm$ 0,40

3.3. Batimetri

Gambar 8 menyajikan analisis spasial batimetri di perairan pesisir Sulawesi Utara, dengan fokus pada kedekatan kontur kedalaman (*isodepth*) 800 m dan 1000 m terhadap titik-titik pantai strategis yang telah diidentifikasi.



Gambar 8. Batimetri perairan laut Sulawesi Utara. Garis magenta menunjukkan rentang dari lokasi di pinggir pantai ke garis kontur kedalaman 800 dan 1000 m. Sumber: GEBCO (2025).

Figure 8. Bathymetry of the waters off North Sulawesi. The magenta lines indicate the range from the coastal location to the 800 m and 1000 m depth contours. Source: GEBCO (2025).

Tabel 2 memberikan jarak empat lokasi dari garis pantai ke kontur sumber daya air dingin dan panjang pipa isap air dingin yang dibutuhkan. Pada kontur 1000 m, pipa terpanjang yang dibutuhkan adalah sekitar 12,4 km di Inobonto dan yang terpendek sekitar 3,6 km di P. Bangka.

Tabel 2. Jarak dari garis pantai ke garis kontur kedalaman 800 dan 1000 m, dan panjang pipa air dingin yang dibutuhkan OTEC.

Table 2. The distance from the coastline to the 800 and 1000 m depth contours and the length of cold-water pipe required for OTEC.

Lokasi	Kontur 800 m		Kontur 1000 m	
	Jarak (km)	Panjang Pipa* (km)	Jarak (km)	Panjang Pipa* (km)
P. Manado Tua	4,9	5,0	5,7	5,8
P. Bangka	2,9	3,0	3,5	3,6
Beniha	3,7	3,8	4,6	4,7
Inobonto	11,5	11,5	12,3	12,4

Keterangan: *Pipa diasumsikan turun secara linear hingga kedalaman 800 m.

3.4. Potensi daya listrik

Sebelum potensi daya listrik yang dapat diproduksi oleh pembangkit OTEC di perairan Sulawesi Utara diestimasi, uji sensitivitas dilakukan untuk mengevaluasi ketidakpastian parameter desain dan operasional. Empat parameter kunci yang diuji, yaitu diameter pipa air dingin (CWP) beserta penurunan suhunya akibat kerugian termal di sepanjang pipa (ΔT_{loss}), kecepatan aliran fluida dalam pipa, efisiensi turbo-generator, dan efisiensi pompa (Gambar 9). Dalam uji ini beberapa parameter dibuat tetap, yakni suhu air hangat $T_{warm} = 29,0$ °C, selisih suhu $\Delta T = 23,0$ °C, panjang pipa $L = 5000$ m, dan faktor gesekan $f = 0,0075$.

Gambar 9a memperlihatkan bahwa daya bersih (P_{net}) menurun secara hampir linear dengan pertambahan nilai penurunan suhu CWP (ΔT_{loss}) dari 0 °C hingga 3 °C untuk ketiga diameter pipa D yang diuji (8, 10, dan 12 m). Pada diameter $D = 12$ m, misalnya, P_{net} menurun dari sekitar 135,2 MW menjadi sekitar 101,8 MW.

Gambar 9b menunjukkan bahwa P_{gross} dan P_{net} meningkat secara hampir linear dengan peningkatan kecepatan aliran (v) dalam pipa. Sementara itu, P_{pump} tetap sangat kecil pada kecepatan rendah namun meningkat secara tajam pada kecepatan mendekati $v = 3,5$ m/s.

Sebagaimana ditampilkan pada Gambar 9c, P_{gross} dan P_{net} meningkat secara proporsional dengan peningkatan efisiensi turbo-generator. Pada efisiensi 0,6, P_{gross} sekitar 70 MW, dan pada efisiensi 0,9, P_{gross} naik menjadi sekitar 104 MW. Di lain pihak, P_{pump} relatif konstan karena tidak berkaitan langsung dengan komponen turbo-generator. Gambar 9d memperlihatkan bahwa P_{gross} , P_{pump} , dan P_{net} cenderung tidak sensitif terhadap perubahan efisiensi pompa pada rentang 0,6–0,9.

Selanjutnya potensi daya listrik antar lokasi diperbandingkan (Tabel 3). Nilai-nilai parameter yang digunakan dalam analisis ini adalah efisiensi turbo-generator $\eta_{tg} = 0,75$, efisiensi pompa $\eta_p = 0,80$, kerugian panas CWP $\Delta T_{loss} = 1,0$ °C, selisih suhu hangat dan dingin (ΔT) menggunakan data suhu di setiap stasiun, kecepatan aliran $v = 2$ m/s, diameter pipa $D = 10$ m, dan panjang pipa L masing-masing stasiun sesuai dengan panjang pipa yang diturunkan hingga kedalaman 800 m di kontur 1000 m (Tabel 2).

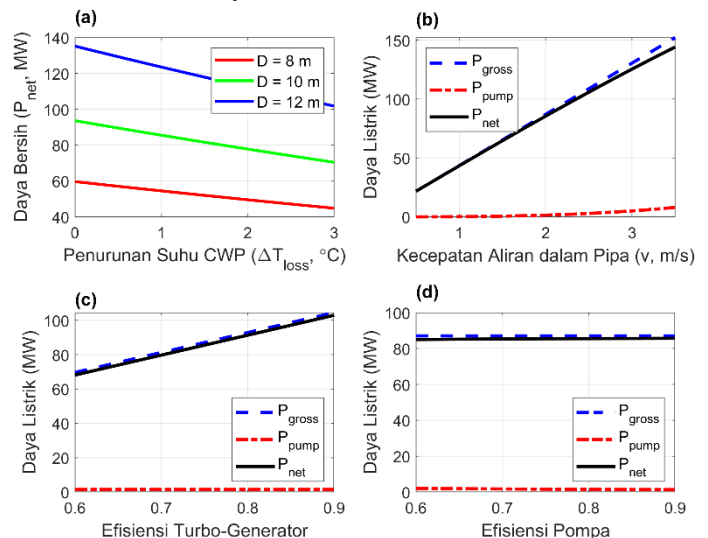
Tabel 3. Kisaran potensi daya P_{gross} , P_{pump} , dan P_{net} berdasarkan kisaran selisih suhu (ΔT) dan kisaran panjang CWP.

Table 3. Ranges of potential power P_{gross} , P_{pump} , dan P_{net} based on temperature gradient (ΔT) ranges and CWP length ranges.

Stasiun	P_{gross} (MW)	P_{pump} (MW)	P_{net} (MW)	Rata-rata (MW)
P. Manado Tua	80,15–100,43	1,51–1,75	78,64–98,68	87,83±3,85
P. Bangka	78,11–94,96	0,91–1,09	77,21–93,87	86,44±3,24
Beniha	67,74–95,55	1,15–1,42	66,60–94,14	86,49±5,10
Inobonto	79,60–101,23	3,47–3,74	76,13–97,48	85,77±3,77

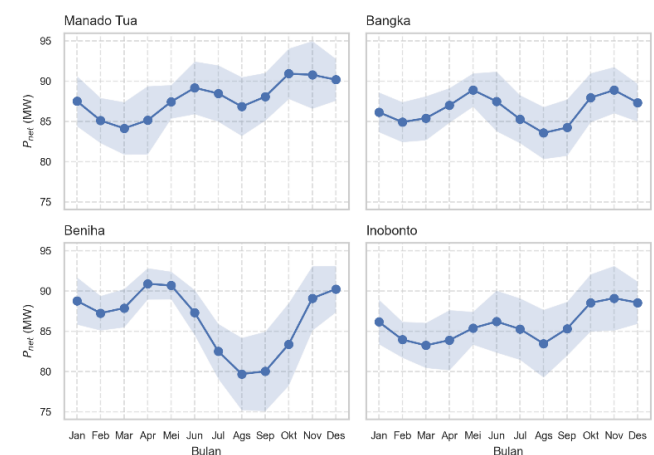
Gambar 10 menampilkan daya bersih rata-rata bulanan. Stasiun Beniha menunjukkan variabilitas musiman yang paling tinggi dengan P_{net} mencapai nilai rata-rata terendah sekitar 80 MW pada bulan Agustus. Gambar 11 menunjukkan perbandingan daya

listrik (P_{gross} , P_{pump} , dan P_{net}) rata-rata untuk periode 2010–2024. Stasiun Inobonto menghasilkan P_{net} paling rendah (85,8 MW) akibat daya pompa yang tinggi ($P_{pump} = 3,6$ MW) atau menyerap sekitar 4,02% dari daya bruto.



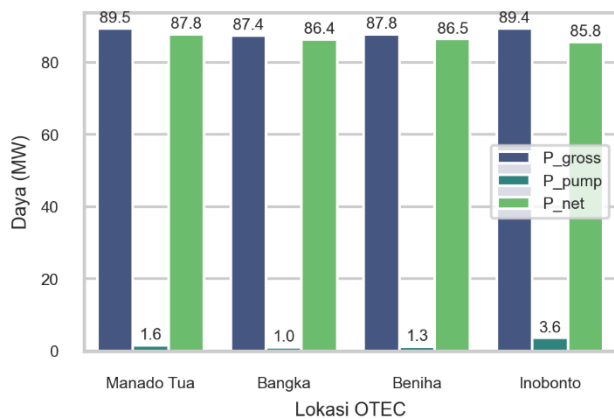
Gambar 9. Hasil uji sensitivitas parameter sistem OTEC terhadap daya listrik yang dihasilkan: (a) daya bersih (P_{net}) terhadap penurunan CWP (ΔT_{loss}) untuk tiga diameter pipa berbeda; (b) daya listrik (P_{gross} , P_{pump} , P_{net}) terhadap kecepatan aliran dalam pipa (v); (c) daya listrik terhadap efisiensi turbo-generator; dan (d) daya listrik terhadap efisiensi pompa.

Figure 9. The results of sensitivity analysis of OTEC system parameters on generated electrical power: (a) net power (P_{net}) versus CWP temperature drop (ΔT_{loss}) for three different pipe diameters; (b) electrical power (P_{gross} , P_{pump} , P_{net}) versus flow velocity in the pipe (v); (c) electrical power versus turbo-generator efficiency; and (d) electrical power versus pump efficiency.



Gambar 10. Dinamika daya bersih P_{net} musiman di empat lokasi.

Figure 10. Seasonal dynamics of net power P_{net} at four locations.



Gambar 11. Perbandingan potensi daya rata-rata periode 2010–2024 di empat lokasi.

Figure 11. Comparison of average potential power for 2010–2024 period at four locations.

4. Pembahasan

4.1. Karakteristik sebaran dan selisih suhu

Sebaran horizontal suhu permukaan atas berubah secara periodik sepanjang tahun. Pola yang sama untuk seluruh wilayah Indonesia telah ditunjukkan oleh [Purba & Khan \(2019\)](#). Pola ini sangat berhubungan dengan pola angin musim di Indonesia ([Buamona dkk., 2023](#); [Purba & Khan, 2019](#)) dan perpindahan massa air dari Lautan Pasifik ke Lautan India (arus lintas Indonesia) ([Atmadipoera & Mubaraq, 2016](#); [Gordon, 2005](#)).

Profil suhu vertikal sampai kedalaman 50 m yang diukur dengan OpenCTD dan data dari Copernicus menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan. Hal ini dapat disebabkan karena data Copernicus yang digunakan adalah data rata-rata untuk periode yang panjang (15 tahun), dan data tersebut dengan resolusi spasial sekitar 9 km telah mengabaikan faktor turbulen dan pencampuran massa air skala kecil. Pola arus dan gelombang di perairan pantai kepulauan dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti musim dan kondisi pasang surut, yang berkontribusi pada variasi suhu ([Putra dkk., 2025](#); [Sverdrup & Kudela, 2024](#)). Selain itu, secara teknis alat CTD yang digunakan memiliki tingkat akurasi yang relatif rendah ($\pm 0,5$ °C). Dengan demikian, membandingkan hasil pengukuran CTD tunggal ini dengan data rata-rata tahunan yang panjang perlu dilakukan secara hati-hati. Namun demikian, oleh karena keterbatasan data *in situ* berkualitas baik hingga kedalaman 1000 m, pembahasan didasarkan pada hasil analisis data Copernicus.

Profil suhu kolom air hingga kedalaman 1000 m menunjukkan kesamaan di keempat lokasi, khususnya pada kedalaman di bawah termoklin. Pola yang sama teramati juga di perairan Laut Sulawesi bagian barat daya ([Panjaitan dkk., 2021](#)). Suhu dingin yang konstan dan kedalaman yang dapat mencapai lebih dari 1000 m demikian menjadi faktor penting dalam penyediaan air dingin yang cukup untuk OTEC ([Kempener & Neumann, 2014](#)).

Besar selisih suhu antara lapisan permukaan dengan lapisan dalam yang penting untuk OTEC sangat dipengaruhi oleh kondisi oseanografi dan meteorologi lokasi. Lapisan permukaan merupakan lapisan yang paling besar mendapat pengaruh ([Sverdrup & Kudela, 2024](#)). Fluktuasi suhu seperti yang dibahas di atas, bersesuaian dengan lokasi stasiun Beniha dan P. Bangka berada di Laut Maluku yang mengalami pendinginan *upwelling* pada musim angin timur (Agustus–September) (Gambar 2), sedangkan stasiun Lolak dan P. Manado Tua berada di Laut Sulawesi yang tidak mengalami *upwelling*. Pola yang sama diungkapkan oleh [Purba & Khan \(2019\)](#).

4.2. Batimetri

Peta batimetri merupakan komponen dasar dalam evaluasi kelayakan lokasi untuk implementasi teknologi OTEC. Keberhasilan dan efisiensi ekonomis sistem OTEC sangat

bergantung pada akses yang mudah terhadap sumber daya air laut dalam yang dingin. Air dingin ini umumnya berada pada kedalaman sekitar 1000 m untuk mencapai gradien termal (ΔT) optimal sebesar ≥ 20 °C terhadap air permukaan ([Vega, 2002](#)). Akan tetapi, gradien termal optimal ini di perairan Sulawesi Utara dapat dicapai pada kedalaman 800 m.

Hal penting pada Gambar 8 adalah profil batimetri yang sangat curam di sepanjang pesisir Sulawesi Utara. Kecuraman ini diindikasikan oleh jarak horizontal yang sangat pendek antara garis pantai dengan *isodepth* 800 m dan 1000 m. Fenomena ini terlihat konsisten di beberapa lokasi studi, termasuk pantai P. Bangka, pantai P. Manado Tua, pantai Beniha, dan pantai Inobonto. Kedekatan *isodepth* 1000 m dengan daratan merupakan salah satu kriteria seleksi tapak OTEC yang paling kritis. Ini secara langsung berimplikasi pada panjang CWP yang dibutuhkan. Pipa ini merupakan salah satu komponen rekayasa yang paling menantang dan berbiaya paling tinggi dalam infrastruktur OTEC ([Avery & Wu, 1994](#)). Secara teknis, CWP yang lebih pendek tidak hanya mengurangi biaya modal yang terkait dengan material dan instalasi, tetapi juga meminimalkan kerugian energi akibat pemompaan (*parasitic losses*) dan mengurangi risiko kegagalan struktural akibat tekanan gaya hidrodinamik di lingkungan laut yang kompleks ([Arief dkk., 2024](#); [Zhang dkk., 2023](#)).

Lokasi-lokasi yang ditampilkan pada Gambar 8, misalnya di sekitar pantai P. Bangka, menunjukkan gradien dasar laut yang ekstrem di mana *isodepth* 1000 m berada pada jarak yang sangat dekat dari pesisir. Kondisi yang sama juga ditunjukkan di perairan Karakelong ([Negara & Koto, 2017](#)) dan perairan timur utara Bali ([Andayani dkk., 2020](#)). Jarak ke kedalaman 1000 m yang dekat ini menjadikan lokasi-lokasi ini ideal sebagai tapak OTEC.

Karakteristik batimetri yang curam di wilayah ini ditimbulkan oleh kondisi tektonik regional yang aktif. Sulawesi Utara terletak di dekat Zona Tumbukan Laut Maluku (*Molucca Sea Collision Zone*), sebuah busur tumbukan busur yang kompleks, serta berbatasan langsung dengan Cekungan Laut Sulawesi di sebelah utara. Aktivitas tektonik ini menghasilkan morfologi dasar laut yang terjal, termasuk palung-palung dalam dan lereng benua yang curam ([Hall, 2002](#); [Silver dkk., 1983](#)). Akan tetapi, keunggulan kondisi batimetri ini dibarengi juga dengan potensi gempa berulang yang juga perlu diperhatikan dalam penentuan tapak OTEC.

4.3. Sensitivitas dan estimasi potensi daya listrik

Uji sensitivitas menunjukkan pengaruh kehilangan selisih panas ΔT_{loss} terhadap daya bersih P_{net} . Pola ini sesuai dengan prinsip termodinamika dasar OTEC, yaitu bahwa efisiensi siklus dibatasi oleh efisiensi Carnot yang sangat kecil (berkisar 3–7%) akibat selisih suhu antara lapisan permukaan dan lapisan dalam yang relatif kecil ([Fontaine dkk., 2019](#); [Gu, 2023](#); [Robinson & Engelmann, 2023](#)). Hal ini menyebabkan setiap kenaikan suhu air laut dalam akibat perpindahan panas dari lingkungan ke air laut dalam di sepanjang CWP akan mengurangi selisih suhu bruto yang tersedia bagi evaporator dan kondensor. Kenaikan suhu air dingin ini menyebabkan daya bruto maupun daya bersih ikut menurun secara signifikan ([Yeh dkk., 2005](#)). Oleh sebab itu, pemilihan pipa air dingin yang berinsulasi baik sangat penting.

Di sisi lain, peningkatan P_{net} terhadap diameter pipa mencerminkan pengaruh diameter CWP terhadap laju alir massa air laut dingin. Pada kecepatan aliran yang sama, diameter yang lebih besar menghasilkan debit air dingin yang lebih besar sehingga kapasitas pertukaran panas dan daya yang dibangkitkan meningkat. Perimbangan untung-rugi (*trade-off*) antara diameter pipa, kebutuhan struktural, dan daya yang dihasilkan merupakan pertimbangan utama dalam desain CWP untuk pembangkit OTEC skala komersial ([Adiputra dkk., 2020](#); [Adiputra & Utsunomiya, 2019](#); [Aresti dkk., 2025](#)).

Selisih antara daya bruto P_{gross} dan daya bersih P_{net} meningkat secara tidak proporsional dengan kecepatan v aliran dalam pipa. Pola ini konsisten dengan hasil dari [Yeh et al. \(2005\)](#) yang menunjukkan bahwa daya pemompaan air laut dingin berbanding lurus dengan pangkat tiga kecepatan alirannya, sedangkan daya bruto hanya meningkat secara linear terhadap kecepatan. Akibat

dari peningkatan tajam daya pompa P_{pump} ini, selisih antara P_{gross} dan P_{net} semakin lebar pada kecepatan aliran yang semakin tinggi. Karakteristik pertumbuhan kubik pada daya pompa inilah yang mendasari konsep kecepatan aliran optimum dalam desain OTEC, yaitu titik operasi ketika penambahan kecepatan aliran lebih lanjut tidak lagi memberikan keuntungan daya bersih yang proporsional (Yeh dkk., 2005).

Peningkatan koefisien efisiensi turbo-generator adalah penting dalam meningkatkan daya kotor dan daya bersih tapi tidak untuk daya yang dibutuhkan pompa. Hubungan ini sesuai dengan kajian Yoon et al. (2014) bahwa efisiensi termal siklus OTEC subkritis sangat bergantung pada efisiensi turbin karena efisiensi komponen ini merupakan faktor pengali langsung terhadap kerja poros yang dapat diambil dari penurunan entalpi fluida kerja pada siklus Rankine.

Pengaruh efisiensi pompa tidak signifikan terhadap P_{gross} , P_{pump} , dan P_{net} . Hal ini disebabkan oleh daya pompa yang hanya merupakan sebagian kecil dari daya bruto (berkisar antara 1,5–2,3%) untuk kondisi operasi yang dianalisis. Perbaikan efisiensi pompa hanya menghemat sebagian kecil dari komponen daya yang memang sudah kecil, dan dampaknya terhadap P_{net} menjadi sangat kecil. Dengan kata lain, efisiensi termal siklus OTEC relatif tidak bergantung pada efisiensi pompa (Yoon dkk., 2014).

Selanjutnya, hasil simulasi berdasarkan karakteristik lokasi (Gambar 10) mendapatkan daya bersih P_{net} bulanan berosilasi mengikuti osilasi selisih suhu air hangat dan dingin (ΔT). P_{net} yang rendah di stasiun Beniha disebabkan oleh pendinginan lapisan permukaan akibat fenomena *upwelling* angin timur (Natalie dkk., 2026; Purba & Khan, 2019) di Laut Maluku yang memperkecil gradien ΔT (Gambar 7). Kejadian ini dapat mengganggu stabilitas produksi daya.

Selain itu, hasil simulasi mendapatkan bahwa Inobonto mempunyai potensi daya yang relatif rendah dibanding lokasi yang lain. Hal ini disebabkan karena stasiun Inobonto membutuhkan pipa paling panjang dengan rata-rata 11,95 km. Sebaliknya, stasiun P. Manado Tua yang membutuhkan panjang pipa rata-rata hanya 5,4 km menghasilkan P_{net} tertinggi (87,8 MW). Walaupun membutuhkan P_{pump} yang lebih tinggi dibanding stasiun Beniha dan P. Bangka, stasiun P. Manado Tua masih lebih potensial. Hal ini disebabkan oleh perbedaan rata-rata suhu air hangat dan suhu air dingin di perairan P. Manado Tua sedikit lebih besar dibanding lokasi-lokasi lainnya (Tabel 1).

Secara umum, hasil simulasi berdasarkan skenario lokasi didapatkan bahwa daya listrik potensial berkisar antara 66,6 dan 98,7 MW. Tentunya potensi daya listrik yang diperoleh ini masih bersifat pendugaan awal. Perhitungan yang memperhatikan baik faktor teknis maupun faktor ekonomis yang lebih detail perlu dilakukan (Bernardoni dkk., 2019; Langer dkk., 2021; Thirugnana dkk., 2023).

4.4. Pertimbangan lingkungan

Pembangkit listrik OTEC memiliki banyak keuntungan, antara lain dapat mengurangi pemanasan global (Nickloff dkk., 2025), menurunkan keasaman laut (Rau & Baird, 2018), menghasilkan produk sampingan air desalinasi (A. S. Kim dkk., 2016), dan secara bersamaan dapat dimanfaatkan untuk *air conditioner* (Zhou dkk., 2024). Di sisi lain, pembangkit listrik OTEC memiliki juga dampak terhadap lingkungan. Walaupun bukan fokus dalam penelitian ini, dampak lingkungan dipandang penting untuk didiskusikan agar dapat menjadi perhatian. Salah satu dampak utama adalah perubahan ekosistem akibat perbedaan suhu dan konsentrasi nutrisi antara air buangan dan air laut sekitarnya. Air buangan dari OTEC, yang lebih dingin dan kaya nutrisi, dapat menyebabkan perubahan pada konsentrasi plankton dan nutrisi di perairan sekitar, meskipun dampaknya cenderung terbatas dan cepat menyebar dalam arus laut (Grandelli dkk., 2012; Wang & Tabeta, 2017). Selain itu, perubahan suhu air akibat pembuangan ini dapat memengaruhi perkembangan komunitas fitoplankton secara lokal (Giraud dkk., 2018). Untuk mengatasi dampak ini, beberapa strategi mitigasi telah diusulkan, termasuk penggunaan sistem siklus tertutup OTEC yang dapat mengurangi perbedaan suhu antara air buangan dan air laut, serta desain konfigurasi

pembuangan yang lebih ramah lingkungan (Das dkk., 2024; H.-J. Kim dkk., 2010; Nihous, 2018). Selain itu, pemodelan numerik dan simulasi ekosistem dapat digunakan untuk merancang konfigurasi pembuangan yang memiliki dampak biologis minimal (Buño, 2013; Grandelli dkk., 2012; Nihous, 2018).

5. Simpulan

Perairan laut Sulawesi Utara mempunyai potensi yang besar untuk pembangunan pembangkit listrik yang memanfaatkan energi terbarukan dengan teknologi OTEC. Ada empat lokasi potensial di Sulawesi Utara yang dapat menghasilkan >85 MW per unit untuk menjadi lokasi pembangunan pembangkit di pantai, yakni Pulau Manado Tua, Pulau Bangka, Beniha, dan Inobonto. Dari keempat lokasi ini, Pulau Manado Tua dan Pulau Bangka lebih unggul karena mempunyai keseimbangan faktor ΔT yang stabil dan batimetri yang sangat curam sehingga membutuhkan pipa air dingin yang lebih pendek. Namun demikian, kajian teknis, ekonomis, dan dampak lingkungan yang lebih detail dan mendalam perlu dilakukan untuk mendukung pengembangan energi terbarukan berbasis laut di Indonesia, khususnya di Sulawesi Utara.

Konflik kepentingan (Competing interests)

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan yang relevan dengan artikel ini.

Sumber dana (Funding sources)

Penelitian ini didanai oleh DIPA Unsrat Tahun Anggaran 2025 dengan nomor kontrak 826/UN12.27/LT/2025.

Ucapan terima kasih (Acknowledgements)

Terima kasih disampaikan kepada Rektor Unsrat, Ketua LPPM Unsrat, dan Dekan FPIK Unsrat untuk dukungan pelaksanaan penelitian. Terima kasih disampaikan juga kepada tim lapangan Bradford Ganda dan Eneas Mait, dan kepada para nakhoda.

Dalam penulisan artikel ini, penulis telah memanfaatkan bantuan AI dalam mencari pustaka (SciSpace), menulis kode Python (Google AIStudio), dan meningkatkan keterbacaan (Claude). Penulis telah melakukan revisi dan penyuntingan bentuk akhir teks, dan bertanggung jawab penuh atas isi publikasi.

Kontribusi penulis (Authors' contributions)

PK: konseptualisasi, metodologi, pengumpulan data, analisis, penulisan draf awal; **AR:** konseptualisasi, kurasi data, penulisan – telaah & pengembangan; **VM:** pengumpulan data, penulisan – telaah & perbaikan; **HT:** pengumpulan data, dokumentasi.

Ketersediaan data (Availability of data and materials)

Dataset yang mendukung hasil penelitian ini tersedia dari penulis korespondensi berdasarkan permintaan yang wajar.

Persetujuan etik (Ethics approval and consent to participate)

Tidak berlaku / Not applicable

ORCID

Patrice N.I. Kalangi <https://orcid.org/0000-0003-0909-2610>

Kakaskasen A. Roeroe <https://orcid.org/0000-0002-5528-0690>

Vivanda O.J. Modaso <https://orcid.org/0009-0009-2971-6508>

Hosea F. Tapahing <https://orcid.org/0009-0000-5920-8402>

Daftar Pustaka

- Adiputra, R., & Utsunomiya, T. (2019). *Stability analysis of free hanging riser conveying fluid for Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) utilization*. <https://doi.org/10.1115/omae2019-96749>
- Adiputra, R., Utsunomiya, T., Koto, J., Yasunaga, T., & Ikegami, Y. (2020). Preliminary design of a 100 MW-net Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) power plant study case: Mentawai

- Island, Indonesia. *Journal of Marine Science and Technology*, 25(1), 48–68. <https://doi.org/10.1007/s00773-019-00630-7>
- Andayani, N. K. S., Ilahude, D., Satriadi, A., & Purwanto, P. (2020). Studi potensi OTEC berdasarkan distribusi suhu, salinitas dan densitas di perairan timur – ttara Pulau Bali. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(4), 386–395. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v2i4.9346>
- Aresti, L., Christodoulides, P., Michailides, C., & Onoufriou, T. (2023). Reviewing the energy, environment, and economy prospects of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60, 103459. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103459>
- Aresti, L., Onoufriou, T., Michailides, C., & Christodoulides, P. (2025). OTEC systems' heat losses in pipes. *WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer*, 20, 14–19. <https://doi.org/10.37394/232012.2025.20.2>
- Arief, D. S., Wirjosentono, B., Koto, J., Dalil, M., & Junaidi, A. K. (2024). Hydrodynamic load effect on composite polymer cold-water pipe joint in Ocean Thermal Energy Conversion. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 113(1), 141–152. <https://doi.org/10.37934/arfmts.113.1.141152>
- Atmadipoera, A. S., & Mubaraq, G. L. (2016). Struktur dan variabilitas arlindo di Laut Sulawesi. *Jurnal Kelautan Nasional*, 11(3), 159. <https://doi.org/10.15578/jkn.v11i3.6116>
- Avery, W. H., & Wu, C. (1994). *Renewable energy from the ocean: A guide to OTEC*. Oxford University Press.
- Bernardoni, C., Binotti, M., & Giostri, A. (2019). Techno-economic analysis of closed OTEC cycles for power generation. *Renewable Energy*, 132, 1018–1033. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.007>
- Bordone, A., Pennecchi, F., Raiteri, G., Repetti, L., & Reseghetti, F. (2020). XBT, ARGO float and ship-based CTD profiles intercompared under strict space-time conditions in the Mediterranean Sea: Assessment of metrological comparability. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5), 313. <https://doi.org/10.3390/jmse8050313>
- Buamona, Z. Z., Tubalawony, S., & Kalay, D. E. (2023). Variabilitas suhu dan salinitas di Laut Halmahera. *Jurnal Laut Pulau: Hasil Penelitian Kelautan*, 2(2), 6–16. <https://doi.org/10.30598/jlpvol2iss2pp6-16>
- Buño, M. R. (2013). *Near and far field models of external fluid mechanics of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) power plants* [Thesis, Massachusetts Institute of Technology]. <https://dspace.mit.edu/entities/publication/78c8386e-c272-4b84-bbb3-21249142023c>. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/79495>
- CMEMS. (2025). *Global Ocean Physics Reanalysis* [Dataset]. E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store (MDS). Tanggal akses: 7 Oktober 2025. <https://doi.org/10.48670/moi-00021>
- Das, A., Kumar, R., Panja, B., & Ershad, Md. (2024). *Eco-friendly ocean power: Minimizing environmental impacts of marine energy technologies*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.14551499>
- DJPRL. (2022). *Kelautan dan perikanan dalam angka tahun 2021* (Vol. 1). Direktorat Jenderal Pengelolaan Ruang Laut.
- ESDM. (2017, September 24). *Potensi energi laut Indonesia terbesar di dunia*. Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/potensi-energi-laut-indonesia-terbesar-di-dunia>
- Firmansyah, A. I., Mukhtasor, Satrio, D., Rahmawati, S., Ikhwan, H., & Pratikto, W. A. (2024). A study of the temperature distribution in the OTEC cold water pipe using a heat and mass transfer approach. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1372(1), 012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1372/1/012018>
- 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), 1143. <https://doi.org/10.3390/e21121143>
- GEBCO Compilation Group. (2025). *The GEBCO_2025 Grid* [Dataset]. General Bathymetric Chart of the Oceans. Tanggal akses: 12 Oktober 2025. <https://doi.org/10.5285/37c52e96-24ea-67ce-e063-7086abc05f29>
- Ghaedi, A., Sedaghati, R., Mahmoudian, M., Rodrigues, E. M. G., & Godina, R. (2024). Reliability assessment of the ocean thermal energy conversion systems through Monte Carlo simulation considering outside temperature variation. *Journal of Marine Science and Technology*, 29(1), 36–52. <https://doi.org/10.1007/s00773-023-00967-0>
- Giraud, M., Garçon, V., De La Broise, D., L'Helguen, S., Sudre, J., & Boye, M. (2018). *Potential effects of deep seawater discharge by an Ocean Thermal Energy Conversion plant on the marine microorganisms in oligotrophic waters*. Biogeochemistry: Open Ocean. <https://doi.org/10.5194/bg-2018-306>
- Gordon, A. L. (2005). Oceanography of the Indonesian seas and their throughflow. *Oceanography*, 18(4), 14–27. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.01>
- Grandelli, P., Rocheleau, G., Hamrick, J., Church, M., & Powell, B. (2012). *Modeling the physical and biochemical influence of Ocean Thermal Energy Conversion plant discharges into their adjacent waters* (DOE/EE0003638-1, 1055480; hlm. DOE/EE0003638-1, 1055480). Makai Ocean Engineering. <https://doi.org/10.2172/1055480>
- Gu, Y. (2023). A key parameter in design and operation of Ocean Thermal Energy Conversion plants. *Proceeding of 8th Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC)*, 693–702. <https://doi.org/10.1615/TFEC2023.eet.045114>
- Gumede, M. (2021). *The extraction of power and fresh water from the ocean off the coast of Kzn utilising ocean thermal energy conversion (OTEC) techniques* [Dissertation]. Durban University of Technology.
- Hall, R. (2002). Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(4), 353–431. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(01\)00069-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(01)00069-4)
- Hammad, F. K., Rochaddi, B., Purwanto, P., & Susmoro, H. (2020). Identifikasi potensi Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) di Selat Makassar. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(2), 147–157. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v2i2.8058>
- Ilahude, D., Yuningsih, A., Permanawati, Y., Yosi, M., Zuraida, R., & Annisa, N. (2020). Site determination for OTEC turbine installation of 100 MW capacity in North Bali Waters. *Bulletin of the Marine Geology*, 35(1). <https://doi.org/10.32693/bomg.35.1.2020.594>
- Kempener, R., & Neumann, F. (2014). *Ocean Thermal Energy Conversion: Technology brief*. International Renewable Energy Agency. www.irena.org
- Kim, A. S., Kim, H.-J., Lee, H.-S., & Cha, S. (2016). Dual-use open cycle ocean thermal energy conversion (OC-OTEC) using multiple condensers for adjustable power generation and seawater desalination. *Renewable Energy*, 85, 344–358. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.014>
- Kim, H.-J., Ho-Saeng Lee, Seung-Won Lee, Jung, D.-H., & Moon, D.-S. (2010). Mitigation of environmental impact of power-plant discharge by use of Ocean Thermal Energy Conversion system.

- OCEANS'10 IEEE SYDNEY, 1–4.
<https://doi.org/10.1109/OCEANSSYD.2010.5603973>
- Kim, H.-J., Lee, H.-S., Lim, S.-T., & Petterson, M. G. (2021). The suitability of the Pacific Islands for harnessing Ocean Thermal Energy and the feasibility of OTEC plants for onshore or offshore processing. *Geosciences*, 11(10), 407–407.
<https://doi.org/10.3390/geosciences11100407>
- Langer, J., Cahyaningwidi, A. A., Chalkiadakis, C., Quist, J., Hoes, O., & Blok, K. (2021). Plant siting and economic potential of Ocean Thermal Energy Conversion in Indonesia a novel GIS-based methodology. *Energy*, 224, 120121.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120121>
- Liu, W., Xu, X., Chen, F., Liu, Y., Li, S., Liu, L., & Chen, Y. (2020). A review of research on the closed thermodynamic cycles of Ocean Thermal Energy Conversion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109581.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109581>
- Masutani, S. M., & Takahashi, P. K. (2018). Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). Dalam *Encyclopedia of Ocean sciences* (hlm. 641–647). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.11382-x>
- Natalie, Janice, Anandriko, F. P., Faradise, R. G., Saputra, A. V. A., Auf, A., Wiyadi, S. H., & Arrochim, A. (2026). Potensi upwelling dan downwelling di perairan Laut Banda sekitar Pulau Seram sepanjang tahun 2023. *Jurnal Hidrografi Indonesia*, 8(1), 37–44.
<https://doi.org/10.62703/jhi.v8i1.133>
- National Research Council (U.S.). (2013). *An evaluation of the U.S. Department of Energy's marine and hydrokinetic resource assessments* (Online-Ausg). National Academies Press.
<https://doi.org/10.17226/18278>
- Negara, R. B., & Koto, J. (2017). Potential of 100 kW of Ocean Thermal Energy Conversion in Karangkelong, Sulawesi Utara, Indonesia. *International Journal of Environmental Research & Clean Energy*, 5(1), 1–10.
- Nickoloff, A. G., Olim, S. T., Eby, M., & Weaver, A. J. (2025). An assessment of Ocean Thermal Energy Conversion resources and climate change mitigation potential. *Climatic Change*, 178(5), 103. <https://doi.org/10.1007/s10584-025-03933-4>
- Nihous, G. C. (2007). A preliminary assessment of Ocean Thermal Energy Conversion resources. *Journal of Energy Resources Technology*, 129(1), 10–17.
<https://doi.org/10.1115/1.2424965>
- Nihous, G. C. (2018). A Preliminary Investigation of the Effect of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Effluent Discharge Options on Global OTEC Resources. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(1), 25.
<https://doi.org/10.3390/jmse6010025>
- Panjaitan, F. A. P., Wulandari, S. Y., Handoyo, G., & Harsono, G. (2021). Identifikasi dan stratifikasi massa air di Laut Sulawesi. *Indonesian Journal of Oceanography*, 3(3), 322–331.
<https://doi.org/10.14710/ijoce.v3i3.12255>
- Presiden Republik Indonesia. (2017). *Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional*. Sekretariat Kabinet RI.
- Purba, N. P., & Khan, A. M. A. (2019). Upwelling session in Indonesia waters. *World News of Natural Sciences*, 25, 72–83.
- Putra, R. D., Prista, D. M., Ritonga, A. R., Siringoringo, R. M., Suhana, M. P., & Apdillah, D. (2025). Pola sebaran suhu permukaan laut, klorofil-a dan arah kecepatan angin berdasarkan perbedaan musim di perairan Pulau Bintan bagian timur. *Jurnal Kelautan Nasional*, 19(3), 205.
<https://doi.org/10.15578/jkn.v19i3.10340>
- Rasgianti, ., Adiputra, R., Nugraha, A. D., Sitanggang, R. B., Pandoe, W. W., Aprijanto, ., Yasunaga, T., & Santosa, M. A. (2024). System parameters sensitivity analysis of Ocean Thermal Energy Conversion. *Emerging Science Journal*, 8(2), 428–448.
<https://doi.org/10.28991/ESJ-2024-08-02-04>
- Rau, G. H., & Baird, J. R. (2018). Negative-CO2-emissions Ocean Thermal Energy Conversion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 95, 265–272.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.027>
- Robinson, R., & Engelmann, G. (2023). Changing the game—Enhanced OTEC system design. *Day 3 Wed, May 03, 2023*, D031S031R004. <https://doi.org/10.4043/32453-MS>
- Silver, E. A., McCaffrey, R., & Smith, R. B. (1983). Collision, rotation, and the initiation of subduction in the evolution of Sulawesi, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 88(B11), 9407–9418.
<https://doi.org/10.1029/JB088iB11p09407>
- Speight, J. G. (2022). *Encyclopedia of renewable energy*. Wiley Scrivener Publishing.
- Sverdrup, K. A., & Kudela, R. M. (2024). *Investigating oceanography* (Fourth Edition, international student edition). McGraw-Hill Education.
- Thirugnana, S. T., Jaafar, A. B., Rajoo, S., Azmi, A. A., Karthikeyan, H. J., Yasunaga, T., Nakaoka, T., Kamyab, H., Chelliapan, S., & Ikegami, Y. (2023). Performance analysis of a 10 MW Ocean Thermal Energy Conversion plant using Rankine cycle in Malaysia. *Sustainability*, 15(4), 3777.
<https://doi.org/10.3390/su15043777>
- Vega, L. A. (2002). Ocean Thermal Energy Conversion primer. *Marine Technology Society Journal*, 36(4), 25–35.
<https://doi.org/10.4031/002533202787908626>
- Wang, Z., & Tabeta, S. (2017). Numerical simulations of ecosystem change due to discharged water from ocean thermal energy conversion plant. *OCEANS 2017 - Aberdeen*, 1–5.
<https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2017.8084610>
- White, F. M. (2016). *Fluid mechanics* (Eighth edition). McGraw-Hill Education.
- Yeh, R.-H., Su, T.-Z., & Yang, M.-S. (2005). Maximum output of an OTEC power plant. *Ocean Engineering*, 32(5–6), 685–700.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2004.08.011>
- Yoon, J.-I., Son, C.-H., Baek, S.-M., Kim, H.-J., & Lee, H.-S. (2014). Efficiency comparison of subcritical OTEC power cycle using various working fluids. *Heat and Mass Transfer*, 50(7), 985–996.
<https://doi.org/10.1007/s00231-014-1310-8>
- Zhang, Y., Zheng, M., Zhang, L., Zhang, C., Tan, J., Zhang, Y., & Duan, M. (2023). Investigation of dynamic behavior of ultra-large cold-water pipes for Ocean Thermal Energy Conversion. *Dynamics*, 3(3), 468–488.
<https://doi.org/10.3390/dynamics3030025>
- Zhou, Y., Gao, W., Zhang, Y., Tian, Z., Wang, F., & Gao, R. (2024). Experimental investigation on thermodynamic and environmental performance of a novel ocean thermal energy conversion (OTEC)-Air conditioning (AC) system. *Energy*, 313, 133760. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133760>