

Desain Diameter Pipa Secara Matematis pada Pembangkit Listrik Panas Laut (*Oceans Thermal Energy Conversion*)

Andi Hendrawan^{1*}, Lusiani², Aji K. Hendrawan³

^{1,2}Akademi Maritim Nusantara Cilacap

²Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali Cilacap

andi_hendrawan@amn.ac.id

Diterima 21 Agustus 2022, direvisi 9 September 2022, diterbitkan 30 September 2022

Abstrak

Isu energi terbarukan merupakan hal yang sering diperbincangkan, terutama karena cadangan minyak bumi yang semakin menipis, pasokan listrik yang sangat diperlukan untuk pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan. Salah satu sumber energi terbarukan adalah marine thermal energy conversion system (OTEC). Energi terbarukan pada waktunya akan menjadi andalan energi nasional dan dunia karena dalam lima puluh tahun akan terjadi krisis energi. Sumber energi OTEC muncul kembali karena kekhawatiran akan terjadi krisis energi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan model matematis dari desain Pipa OTEC. Desain OTEC tidak terlepas dari perangkat plumbing, baik pipa air dingin, air hangat maupun air NH₃. Penelitian ini merupakan model matematis desain pipa pada pembangkit listrik tenaga termal laut. Penelitian diawali dengan tinjauan pustaka, yaitu penelitian sebelumnya tentang OTEC (oceans thermal energy conversion). Hasil dari penelitian adalah penentuan rumus diameter yang digunakan untuk menentukan diameter pipa, baik untuk diameter pipa air laut dingin, air laut hangat maupun pipa NH₃ atau amoniak. Desain dapat dipergunakan untuk penentuan variabel diameter pipa dengan variasi debit dan kecepatan aliran.

Kata kunci : OTEC, pipa, diameter

Abstract

The issue of renewable energy is something that has often been discussed, especially since oil reserves are running low, the electricity supply that is indispensable for the sustainable development of infrastructure. One of the renewable energy sources is the marine thermal energy conversion system (OTEC). Renewable energy in time will become the mainstay of national and world energy because in fifty years an energy crisis may occur. OTEC's energy sources are re-emerging because of fears that an energy crisis will occur. The purpose of this study was to determine the mathematical model of the Pipe OTEC design. The OTEC design is inseparable from the plumbing device, both cold water pipes, warm water and NH₃ water. This research is a mathematical model of pipe design in a marine thermal power plant. The research begins with a literature review, namely previous research on OTEC (oceans thermal energy conversion). The results of the research are the determination of the diameter formula used to determine the pipe diameter, for cold seawater, warm seawater and NH₃ or ammonia pipes. The design can be used to determine the variable diameter of the pipe with variations in discharge and flow velocity.

Keywords : OTEC, pipe, diameter,

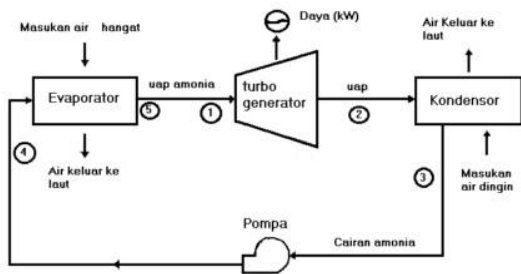
Pendahuluan

Energi terbarukan merupakan pasokan listrik yang sangat diperlukan untuk pembangunan berkelanjutan infrastruktur. Salah satu sumber energi terbarukan adalah sistem konversi energi

panas laut (OTEC). Mereka mengubah energi panas di lautan, yang dicadangkan sebagai gradien suhu vertikal di lautan, menjadi listrik. OTEC dapat memasok listrik yang stabil sebagai beban dasar untuk negara kepulauan atau jaringan terpencil, dan air laut dalam yang menyertainya

menyediakan produk sampingan dari banyak aplikasi industri seperti akuakultur, pertanian, AC, dan sebagainya[1]

Pembangkit listrik tenaga OTEC sangat cocok sebagai penyedia tenaga listrik untuk daerah kepulauan [2], [3] Negara kepulauan memang mempunyai banyak kendala dalam hal distribusi energy. Distribusi bahan bakar minyak bagi Negara kepulauan juga bermasalah karena akan menimbulkan harga yang lebih tinggi Karen ongkos transportasi, kalau pun dibuat sama maka pemerintah wajib menyediakan subsidi. Jauhnya jarak antar pulau menambah beban pembiayaan transportasi energi. Desain pembangkit tenaga listrik OTEC sangat memperhatikan berbagai hal penting antara lain faktor teknologi [4]–[6].



Gambar 1 sekema OTEC

Prinsip fisik jalur energi OTEC mirip dengan jalur panas bumi. Keduanya dicirikan dengan memanfaatkan siklus daya termodinamika yang diturunkan dari Rankine. Di daerah tropis, sumber panas berasal dari permukaan air laut, dan *heat sink* dari perairan dalam di bawah kedalaman 80 m. Karena matahari adalah sumber panas utama, maka dapat diterima untuk memenuhi syarat rute energi OTEC sebagai semacam tenaga surya dengan penyimpanan panas yang melekat[7].

Investasi pada OTEC termasuk peralatan besar yang dibutuhkan untuk mengubah menjadi listrik dengan kepadatan energi panas yang rendah dari lautan tropis. Meskipun demikian, ada dua ekspektasi positif untuk pertimbangan ekonomi:

1) 90% kapasitas operasi untuk OTEC tidak boleh menyajikan masalah pasokan energi intermiten dari tenaga surya dan angin langsung, atau dari rezim curah hujan dari tenaga air, atau dari musim panen bahan bakar nabati;

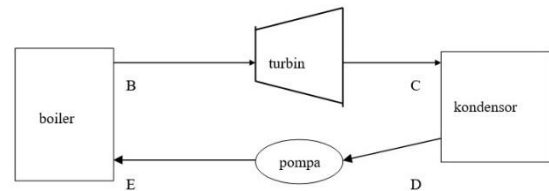
2) Selain listrik, kiriman lainnya dimungkinkan sebagai air laut yang didesalinasi dan air dingin untuk sistem pendingin udara atau akuakultur. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan ukuran diameter pipa pada pembangkit tenaga listrik OTEC

Materi dan Metode

Penelitian ini merupakan penelitian model matematis desain pipa pada pembangkit tenaga panas laut. Penelitian dimulai dengan kajian pustaka yaitu penelitian terdahulu tentang OTEC (*oceans themal energy coversion*). Bahan atau materi berupa jurnal, buku dan laporan penelitian yang berhubungan dengan pembangkit OTEC[8], [9]. Penelitian diawali dengan kajian pustaka mendalam terhadap materi materi yang relavan dengan OTEC. Pembuatan persamaan matematis OTEC berdasarkan kajian teori dan pengalaman empiris peneliti.

Hasil dan Pembahasan

Skema otec dalam riset ini diperlihatkan pada gambar 2



Gambar 2 jalur perpindahan panas OTEC

Zener telah mengembangkan penggunaan amoniak sebagai fluida kerja pada sistem pembangkit OTEC. [10], [11] Pada ketel, tekanan pada ketel(*Boiler*) yang direncanakan adalah P_{boiler} dan berada di kedalaman X_{boiler} di bawah permukaan air laut. Maka kerja pompa daur adalah:

$$w_p = (h_E - h_D) + (X_{boiler} - X_{kond}) \times \frac{1}{778 \text{ lbf} / \text{BTU}} \times \frac{32.2 \text{ ft} / \text{sec}}{32.2 \text{ lbm} / \text{lbf} \cdot \text{sec}} \dots(1)$$

dengan:

- w_p = kerja pompa daur (BTU/lbm)
- h_E = enthalpi masuk boiler (BTU/lbm)
- h_D = enthalpi keluar kondensor (BTU/lbm)
- X_{boiler} = kedalaman boiler di bawah permukaan air laut (ft)
- X_{boiler} = kedalaman kondensor di bawah permukaan air laut (ft)

Untuk proses volume tetap (*isentropik*) sepanjang tekanan pompa DE maka:

$$h_E - h_D = \int_D^E v dP = v(P_E - P_D) \dots\dots(2)$$

dengan

- v = volume jenis (ft^3/lbm)
- P_E = tekanan boiler (lbf/in^2)
- P_D = tekanan kondensor(lbf/in^2)

Panas yang dibutuhkan sepanjang proses EB dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$q_2 = (h_B - h_A) - (h_A - h_E) \dots\dots\dots(3)$$

dengan $(h_A - h_E)$ kehilangan enthalpi pada boiler. Jika diandaikan bahwa ekspansi lewat turbin adalah proses isentropik maka kerja turbin menjadi :

$$w_t = h_B - h_C \dots\dots\dots(4)$$

dengan;

- h_B = enthalpi keluar boiler (BTU/lbm)
- h_C = enthalpi masuk kondensor (BTU/lbm)

untuk menentukan h_B dan h_C digunakan perbandingan fraksi yang mengembun dengan persamaan berikut :

$$S_{gB} + S_{lB} = S_{gC} + S_{lC} \dots\dots\dots(5)$$

$$S_{gB} = (1 - x)S_{gC} + xS_{lC}$$

dengan;

- S_{gB} = Entropi gas keluar boiler (BTU/lbm.°F)
- S_{gC} =Entropi gas masuk kondensor (BTU/lbm.°F)
- S_{lB} = Entropi cairan keluar boiler (BTU/lbm.°F)
- S_{lC} =Entropi cairan masuk kondensor (BTU/lbm.°F)

Setelah x diketahui kemudian menentukan h_C dengan persamaan[12] berikut:

$$h_C = (1 - x)h_{gC} + xh_{lC} \dots\dots\dots(6)$$

dengan;

- h_{gC} = enthalpi gas masuk kondensor (BTU/lbm)
- h_{lC} = enthalpi cairan masuk kondensor (BTU/lbm)
- h_C = enthalpi masuk kondensor (BTU/lbm)
- h_{gC} dan h_{lC} ditentukan dengan membaca tabel di lampiran yang ditentukan oleh suhu dan tekanan sistem.

Panas yang dilepaskan oleh kondensor ditentukan dengan persamaan:

$$q_1 = h_C - h_D \dots\dots\dots(7)$$

dengan;

- h_C = enthalpi masuk kondensor (BTU/lbm)
- h_D = enthalpi keluar kondensor (BTU/lbm)

maka efisiensi daur Rankine menjadi:

$$\eta_R = \frac{q_2 - q_1}{q_2} \dots\dots\dots(8)$$

Berdasarkan asas Black, maka proses di ketel dapat ditulis sebagai berikut:

$$m_{al} \times \Delta t_{boiler} \times c_{p-al} = m_{NH_3} (h_B - h_E) \dots\dots\dots(9)$$

dengan:

- m_{al} = masa air laut hangat (lbm)
- Δt_{boiler} = penurunan suhu pada ketel(°F)
- c_{p-al} = kapasitas panas air laut(BTU/lbm.°F)
- m_{NH_3} = masa amoniak (lbm)

Tenaga yang dibutuhkan untuk menjalankan OTEC ditentukan oleh kecepatan aliran air laut hangat yang dialirkan melalui unit pemindah panas. Kebutuhan air hangat dapat ditentukan dengan mempergunakan hubungan sebagai berikut[9], [13]:

daya diserap = tenaga panas yang masuk dari air hangat X konversi energi efisiensi ke elektrisitas)

Bila dianggap massa jenis air laut 64 lb/ft³ dan kapasitas panas 1 BTU/lb.°F, penurunan suhu air laut hangat selama melewati unit ketel Δt_{boiler} . Q adalah debit aliran air laut hangat yang dibutuhkan (ft³/dt) untuk daya keluaran sebesar P[14].

Maka persamaannya menjadi :

$$P_{serap} (kWe) = 64(lb / ft^3) \times 1(BTU / lb.°F) \times Q(ft^3 / dt) \times \Delta t_{boiler}(°F) \times \frac{2,78.10^{-7} kWh}{0,949.10^{-3}} \times \frac{3600 dt}{h} \times \frac{kWe}{kW} \dots\dots\dots(10)$$

maka

$$Q_{alh} = \frac{0,0148P}{\Delta t_{boiler}} \dots\dots\dots(11)$$

dengan :

- Q_{alh} = debit air hangat yang dibutuhkan (ft³/dt)
- P = daya yang diserap (kWe)
- Δt_{boiler} = penurunan suhu pada ketel (°F)

bila persamaan 4.9 diubah menjadi :

$$m_{al} = \frac{m_{NH_3} (h_B - h_E)}{\Delta t_{boiler}}$$

dan

$$\frac{Q_{alh}}{v_{al}} = \frac{Q_{NH_3} (h_B - h_E)}{\Delta t_{boiler}} \times \frac{1}{v_{gas_NH_3}}$$

$$Q_{gas_NH_3} = \frac{Q_{alh} \times \Delta t_{boiler} \times v_{gas_NH_3}}{v_{al} \times (h_B - h_E)}$$

karena $v_{al} = 1/64$ maka debit NH₃ gas yang dibutuhkan :

$$Q_{gas_NH_3} = \frac{0,0148 P \times v_{gas_NH_3} \times 64}{h_B - h_E}$$

$$Q_{gas_NH_3} = \frac{0,9472 P \times v_{gas_NH_3}}{h_B - h_E}$$

.....(4.12)

dengan:

- $Q_{gas_NH_3}$ = debit gas NH₃ (ft³/dt)
- $v_{gas_NH_3}$ = volume jenis gas NH₃ (ft³/lbm)
- h_B = enthalpi keluar boiler (BTU/lbm)
- h_E = enthalpi masuk boiler (BTU/lbm)

dengan demikian untuk menghitung daya turbin menggunakan persamaan[15] sebagai berikut:

$$P_{turbin} = w_t \times Q_{gas_NH_3} \times \frac{1}{v_{gas_NH_3}} \times \text{efisiensi turbin} \dots\dots(13)$$

$$P_{keluaran} = P_{turbin} \times \text{efisiensi generator}$$

dengan:

- P_{turbin} = daya turbin (kW)
- Dengan menggunakan persamaan 9 dapat ditentukan pula debit cairan NH₃ yang terbentuk atau dibutuhkan:

$$Q_{cairan_NH_3} = \frac{0,9472 P \times v_{cairan_NH_3}}{h_B - h_E} \dots\dots(4.14)$$

dengan;

- $v_{cairan_NH_3}$ = volume jenis cairan NH₃(ft³/lbm)
- $Q_{cairan_NH_3}$ = Debit cairan NH₃(ft³/dt)
- h_B = enthalpi keluar boiler (BTU/lbm)
- h_E = enthalpi masuk boiler (BTU/lbm)

karena cairan NH₃ yang terbentuk disalurkan kembali ke ketel melalui kondensor sehingga daya pompa [16]menjadi :

$$P_{pompa} = w_p \times Q_{cairan_NH_3} \times \frac{1}{v_{cairan_NH_3}} \dots\dots(15)$$

Berdasarkan asas black maka proses di kondensor dapat ditulis sebagai persamaan sebagai beriku:panas yang diberikan = panas yang diterima

$$m_{ald} \times \Delta t_{kond} \times c_p = m_{NH_3} (h_C - h_D) \dots\dots(16)$$

dengan:

- m_{alg} = masa air laut dingin(lbm)
- Δt_{kond} = selisih suhu pada kondensor(°F)
- c_p = kapasitas panas air laut(BTU/lbm.°F)

- h_C = enthalpi masuk kondensor (BTU/lbm)
- h_D = enthalpi keluar kondensor (BTU/lbm)
- bila $c_p = 1$ maka :

$$m_{ald} = \frac{m_{NH_3} (h_C - h_D)}{\Delta t_{kond}} \dots\dots(17)$$

dengan

$$m_{NH_3} = \frac{0,0148 P}{h_B - h_E} \dots\dots(18)$$

substitusi persamaan (18) ke persamaan (17) menjadi:

$$m_{ald} = \frac{0,0148 P (h_C - h_D)}{\Delta t_{kond} (h_B - h_E)} \dots\dots(19)$$

dengan m_{ald} = laju massa (lbm/det)
debit air laut dingin yang diperlukan :

$$Q_{ald} = \frac{0,0148 P (h_C - h_D) v_{ald}}{\Delta t_{kond} (h_B - h_C)} \dots\dots(20)$$

dengan;

- Q_{ald} = debit air laut dingin(ft³/dt)
- h_C = enthalpi masuk kondensor (BTU/lbm)
- h_D = enthalpi keluar kondensor (BTU/lbm)
- h_B = enthalpi keluar boiler (BTU/lbm)
- h_E = enthalpi masuk boiler (BTU/lbm)
- v_{ald} = Volume jenis air laut dingin (ft³/lbm)
- Δt_{kond} = selisih sihi pada kondensor(°F)

Untuk menghitung diameter pipa air laut dingin, air laut hangat, gas NH₃ maupun cairannya maka diperlukan varibel baru yaitu kecepatan. Artinya kecepatan aliran ditentukan sendiri. Misalkan V_{gas} = kecepatan gas. V_{cair} = kecepatan cairan.

Maka diamater pipa menjadi :

$$D = \left(\frac{2Q}{V} \right)^{0,5} \dots\dots(21)$$

dengan;

- D = diameter pipa (ft)
- Q = debit aliran dalam pipa (ft³/dt)
- V = Kecepatan aliran pipa(ft/dt)

Dengan cara yang sama dapat dihitung diameter pipa air laut dingin,panas dan NH₃.

Kesimpulan

Diameter pipa dapat ditentukan dengan persamaan $D = \left(\frac{2Q}{V} \right)^{0,5}$ Persamaan ini merupakan hasil penurunan matematis sebagai persamaan perpindahan panas dengan berbagai kajian hukum black dan persamaan perpindahan panas konduksi dan konveksi.

Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas Organisasi Akademi Maritim Nusantara atas dukungannya dalam keikutsertaan dalam kegiatan ilmiah ini. Penulis juga berterima kasih kepada para dosen AMN atas diskusinya yang bermanfaat.

Daftar Pustaka

- [1] T. Yasunaga, T. Noguchi, T. Morisaki, and Y. Ikegami, "Basic Heat Exchanger Performance Evaluation Method on OTEC," *Mar. Sci. engineering*, 2018.
- [2] A. Hendrawan, "CALCULATION OF POWER PUMPS ON OTEC POWER PLANT OCEAN (OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION)," *Int. J. Innov. Creat. Chang.*, vol. 5, no. 3, p. 353=369, 2019.
- [3] A. Hendrawan, "PERPINDAHAN PANAS PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA OTEC (OCEAN THERMAL ENERGI CONVERSION)," *Semin. Nas. Kemaritimn Semarang, 18 Juli 2020 . Univ. Marit. AMNI 1*, 2020.
- [4] M. A. B. T. CHIK, "OPTIMIZATION OF OTEC AND LOW TEMPERATURE THERMAL DESALINATION PLANT FOR ELECTRICITY AND FRESHWATER PRODUCTION IN MALAYSIA," *Malaysia-Japan Int. Inst. Technol. Univ. Teknol. Malaysia*, vol. 16, no. May, pp. 1–81, 2017.
- [5] N. A. H. B. M. YUSOFF, "Optimization of Solar Assisted Ocean Thermal Energy Conversion Plant Design and System Performance Universiti Teknologi Malaysia," *Malaysia-Japan Int. Inst. Technol. Univ. Teknol. Malaysia*, 2020.
- [6] G. L. Tenorio, A. James, M. D. L. A. Ortega, and F. Jurado, "OTEC alternative for the electric power generation in Panama," *Proc. - 2019 7th Int. Eng. Sci. Technol. Conf. IESTEC 2019*, pp. 197–202, 2019.
- [7] V. Fachina, "Deep-Subsea OTEC," *Mech. Eng. Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–6, 2017.
- [8] P. Budiarti, O. T. Prayitno, and A. Hendrawan, "Sistem Hibrida dalam penyediaan Energi di Kapal," *Maj. Ilm. Bahari Jogja*, vol. 20, no. 2, pp. 211–217, 2022.
- [9] A. Hendrawan, L. H. Pratomo, S. Pramomo, and L. Lusiani, "Pengujian Boiler untuk Pembangkit Listrik Tenaga Panas Laut," *Saintara J. Ilm. Imu-Ilmu Marit.*, vol. 6, no. 1, 2022.
- [10] A. Hendrawan, "Ocean thermal energy conversion.," *SNATPIP 2019*, pp. 1–9, 2019.
- [11] A. Hendrawan, "Pertimbangan Lingkungan pada Pembangkit Listrik Tenaga OTEC (Ocean Thermal Energi Conversion)," *10th Univ. Res. Colloquium 2019 Sekol. Tinggi Ilmu Kesehat. Muhammadiyah Gombong Pertimbangan*, vol. 2, no. 2, pp. 19–27, 2019.
- [12] A. Hendrawan, "KAJIAN TEKNOEKONOMI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA OTEC (OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION)," *Pros. Semin. Nasional&CFP I IDRI*, pp. 1–13, 2017.
- [13] A. HENDRAWAN, "Model program aplikasi pembangkit listrik tenaga panas laut :: Oceans thermal energy conversion," <https://repository.ugm.ac.id/id/eprint/58007>, vol. 21, no. 75, pp. 147–173, 2002.
- [14] A. Hendrawan, "Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga OTEC (Ocean Thermal Energi Conversion) Wilayah Kalianget Donan Cilacap," *Bahari Jogja*, vol. XV, pp. 66–79, 2017.
- [15] A. Hendrawan, "Sistem Hibrida Pada Pembangkit Listrik Tenga Panas Laut (Ocean Thermal Energy Conversion)," *Proceeding of The URECOL*, no. June, pp. 1–5, 2021.
- [16] A. Hendrawan, "DAMPAK SOSIAL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA OTEC (OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION)," *Semin. Nasioanl Kemaritiman Peliteknik Bumi Akpelni Semarang Agustus 2020*, 2020.