

OPTIMASI DESAIN EVAPORATOR SHELL-AND-TUBE PADA SISTEM ORGANIC RANKINE CYCLE (ORC) SKALA KECIL MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI UNTUK PEMANFAATAN PANAS BUANG UMKM

Sarifa Soraya¹, Khoirul Anam^{2*}, Nobelino Rizka Raksa Nugraha³

¹ Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Pekajangan Pekalongan ,Indonesia

² Program Studi Sarjana Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta.

*email: cadoels@gmail.com

DOI : 10.48144/suryateknika.v10i1.2248

Received:31 Oktober 2025

Revised: 27 April 2026

Accepted: 27 April 2026

Abstract

This study aims to optimize the design parameters of a shell-and-tube evaporator in a small-scale Organic Rankine Cycle (ORC) system for waste heat recovery in micro, small, and medium enterprises (MSMEs). The Taguchi method was employed to determine the optimal combination of design variables using a minimum number of experimental runs through an L9 (3^3) orthogonal array. The investigated parameters include tube inner diameter (12, 14, and 16 mm), tube length (1.5, 2.0, and 2.5 m), and working fluid mass flow rate (0.35, 0.42, and 0.50 kg/s). Thermodynamic performance was evaluated numerically using heat transfer equations and energy balance models implemented in Microsoft Excel. The performance indicators include heat transfer rate, thermal efficiency, and Signal-to-Noise (S/N) ratio using the “larger-is-better” criterion. The results indicate that the optimal configuration is achieved at a tube diameter of 12 mm, tube length of 2.5 m, and mass flow rate of 0.50 kg/s, yielding a maximum thermal efficiency of 72.84% and heat transfer rate of 23.10 kW. Analysis of variance (ANOVA) reveals that the mass flow rate is the most influential parameter, contributing 47.3% to system performance, followed by tube diameter (32.8%) and tube length (19.9%). These findings demonstrate that the Taguchi method provides an efficient and reliable approach for optimizing ORC evaporator design with reduced computational effort. The results support the development of cost-effective and energy-efficient waste heat recovery systems for MSMEs.

Keywords: Organic Rankine Cycle, evaporator, Taguchi method, heat transfer, thermal efficiency, waste heat recovery

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan parameter desain evaporator tipe shell-and-tube pada sistem Organic Rankine Cycle (ORC) skala kecil untuk pemanfaatan panas buang pada sektor UMKM. Metode Taguchi digunakan untuk menentukan kombinasi parameter optimum dengan jumlah percobaan minimum melalui rancangan orthogonal array L9 (3^3). Parameter yang diteliti meliputi diameter dalam pipa (12, 14, dan 16 mm), panjang pipa (1,5; 2,0; dan 2,5 m), serta laju aliran massa fluida kerja (0,35; 0,42; dan 0,50 kg/s). Evaluasi kinerja dilakukan secara numerik menggunakan perhitungan termodinamika berbasis neraca energi dan perpindahan panas dengan bantuan Microsoft Excel. Parameter keluaran yang dianalisis meliputi laju perpindahan panas, efisiensi termal, dan rasio Signal-to-Noise (S/N) dengan kriteria “larger-is-better”. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi optimum diperoleh pada diameter pipa 12 mm, panjang pipa 2,5 m, dan laju massa 0,50 kg/s, dengan efisiensi termal maksimum sebesar 72,84% dan laju perpindahan panas sebesar 23,10 kW. Analisis ANOVA menunjukkan bahwa laju aliran massa merupakan faktor paling dominan dengan kontribusi sebesar 47,3%, diikuti oleh diameter pipa sebesar 32,8% dan panjang pipa sebesar 19,9%. Hasil ini menunjukkan bahwa metode Taguchi merupakan pendekatan yang efektif dan efisien dalam optimasi desain evaporator ORC dengan kebutuhan komputasi yang rendah. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem pemanfaatan panas buang yang ekonomis dan efisien untuk sektor UMKM.

Kata kunci: Organic Rankine Cycle, evaporator, metode Taguchi, perpindahan panas, efisiensi termal, panas buang.

1. Pendahuluan

Pertumbuhan sektor industri kecil dan menengah (UMKM) di Indonesia memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan perekonomian nasional. Namun, peningkatan aktivitas produksi di sektor ini juga berdampak pada tingginya konsumsi energi, terutama yang bersumber dari bahan bakar fosil. Berdasarkan laporan Renewable Energy Statistics Indonesia, lebih dari 70% energi industri kecil masih bergantung pada minyak bumi dan batu bara, yang mengakibatkan tingginya emisi gas rumah kaca serta pemborosan energi panas buang yang belum dimanfaatkan secara optimal. Padahal, sumber panas buang dari sistem boiler, proses pengeringan, dan mesin pembakaran internal dapat dimanfaatkan kembali sebagai sumber energi alternatif melalui sistem konversi panas bersuhu rendah seperti Organic Rankine Cycle (ORC)[1], [2]. Pemanfaatan sistem ORC skala kecil sangat relevan untuk meningkatkan efisiensi energi UMKM serta mendukung kebijakan pemerintah dalam transisi energi bersih sesuai Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 33 Tahun 2023[3]

Sistem ORC merupakan teknologi konversi energi yang bekerja berdasarkan prinsip siklus Rankine, tetapi menggunakan fluida kerja organik yang memiliki titik didih rendah, sehingga mampu mengubah energi panas bersuhu rendah menjadi energi listrik secara efisien[4],[5]. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa desain evaporator memegang peranan penting dalam menentukan kinerja keseluruhan sistem ORC, karena komponen ini berfungsi mentransfer energi panas dari sumber panas ke fluida kerja hingga mencapai kondisi uap jenuh. Beberapa studi eksperimental dan numerik telah dilakukan untuk mengoptimalkan kinerja evaporator, antara lain oleh Hu dan Guo [4] yang meneliti pengaruh laju air pendingin terhadap performa perpindahan panas evaporator tipe spray falling film, serta Jiménez-Arreola et al.[6], [7]yang mengkaji respon dinamis evaporator pada kondisi fluktuasi sumber panas. Hasil penelitian penelitian tersebut menegaskan pentingnya parameter geometrik dan kondisi operasi evaporator dalam meningkatkan efisiensi termal sistem ORC.

Berbagai pendekatan optimasi evaporator telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi sistem ORC, baik melalui pemilihan fluida kerja, modifikasi konfigurasi geometrik, maupun integrasi dengan sistem termal lainnya. Ge et al. [5] dan Akbari et al [1] menyelidiki siklus ORC tekanan ganda dan campuran zeotropic untuk aplikasi panas bumi, sedangkan Das et al. [2] mengevaluasi kinerja termodinamika sistem ORC bertenaga surya yang terintegrasi dengan dual cascading vapor compression cycle (DCVCC). Selain itu, Pereira et al. [8] mengembangkan konsep evaporator tipe helical-coil untuk sistem micro combined heat and power (CHP), yang terbukti meningkatkan efisiensi perpindahan panas tanpa

memperbesar dimensi alat secara signifikan. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut berfokus pada sistem berskala besar atau berbasis energi terbarukan tertentu, sedangkan penerapan teknologi ORC skala kecil untuk pemanfaatan panas buang industri UMKM masih sangat terbatas.

Pertumbuhan sektor industri kecil dan menengah (UMKM) di Indonesia berkontribusi signifikan terhadap perekonomian nasional, namun juga diiringi dengan peningkatan konsumsi energi berbasis bahan bakar fosil. Salah satu permasalahan utama yang belum tertangani secara optimal adalah pemanfaatan energi panas buang dari proses industri, seperti boiler dan sistem pembakaran. Energi panas ini umumnya terbuang ke lingkungan tanpa dimanfaatkan kembali, sehingga menurunkan efisiensi energi secara keseluruhan.

Salah satu teknologi yang potensial untuk memanfaatkan panas buang bersuhu rendah adalah Organic Rankine Cycle (ORC). Sistem ORC mampu mengonversi energi panas menjadi energi listrik dengan menggunakan fluida kerja organik bertitik didih rendah, sehingga cocok untuk aplikasi skala kecil. Kinerja sistem ORC sangat dipengaruhi oleh komponen evaporator, yang berperan dalam proses perpindahan panas dari sumber panas ke fluida kerja hingga mencapai kondisi uap.

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa parameter geometrik evaporator, seperti diameter pipa, panjang tabung, dan laju aliran fluida, memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi sistem. Namun, sebagian besar studi masih berfokus pada sistem skala besar atau menggunakan metode optimasi kompleks dengan kebutuhan komputasi tinggi. Selain itu, kajian optimasi evaporator ORC skala kecil untuk aplikasi UMKM masih terbatas.

Metode Taguchi menawarkan pendekatan optimasi yang efisien melalui desain eksperimen berbasis orthogonal array, sehingga mampu mengevaluasi pengaruh beberapa parameter dengan jumlah percobaan minimum. Meskipun metode ini telah banyak digunakan dalam bidang manufaktur, penerapannya dalam optimasi desain evaporator ORC skala kecil masih relatif jarang dilakukan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan desain evaporator tipe shell-and-tube pada sistem ORC skala kecil menggunakan metode Taguchi. Fokus penelitian adalah menentukan kombinasi parameter geometrik dan kondisi operasi yang menghasilkan efisiensi termal maksimum, sehingga dapat mendukung pengembangan sistem pemanfaatan panas buang yang efisien dan aplikatif pada sektor UMKM.

2. Metode

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif berbasis simulasi numerik dengan pendekatan desain eksperimen menggunakan metode Taguchi. Tujuan utama adalah

menentukan kombinasi parameter desain evaporator yang menghasilkan performa termal optimum.

Sistem ORC dimodelkan menggunakan persamaan dasar perpindahan panas dan neraca energi. Laju perpindahan panas dihitung menggunakan persamaan:

$$Q=U \cdot A \cdot \Delta T_{lm}$$

dengan U adalah koefisien perpindahan panas menyeluruh, A luas permukaan perpindahan panas, dan ΔT_{lm} adalah beda temperatur logaritmik rata-rata.

Eksperimen dirancang menggunakan orthogonal array L9 (3^3) dengan tiga faktor dan tiga level, yaitu:

- Diameter pipa (12, 14, 16 mm)
- Panjang tabung (1.5, 2.0, 2.5 m)
- Laju massa (0.35, 0.42, 0.50 kg/s)

Analisis dilakukan dengan menghitung:

- Laju perpindahan panas (Q)
- Efisiensi termal (η)
- Signal-to-Noise Ratio (S/N) dengan kriteria larger-is-better

Selanjutnya dilakukan analisis variansi (ANOVA) untuk menentukan kontribusi masing-masing faktor terhadap performa sistem.

Data penelitian terdiri dari:

1. **Data primer**, yaitu hasil perhitungan termodinamika dan simulasi yang diperoleh menggunakan **Microsoft Excel**.
2. **Data sekunder**, yaitu data pendukung dari literatur, jurnal ilmiah, dan standar desain evaporator[14]

Semua data dikumpulkan dan diolah secara numerik untuk menghasilkan nilai efisiensi termal, laju perpindahan panas (Q), dan *Signal-to-Noise Ratio* (S/N) pada tiap kombinasi percobaan.

Tabel 1. Faktor dan Level Penelitian

Faktor	Level 1	Level 2	Level 3
A – Diameter dalam tabung (mm)	12	14	16
B – Panjang tabung (m)	1.5	2.0	2.5
C – Laju aliran massa (kg/s)	0.35	0.42	0.50

Perangkat utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah **Microsoft Excel 2021**, yang difungsikan untuk:

- menghitung perpindahan panas menyeluruh (U),
- menentukan laju perpindahan panas (\dot{Q}),

- menganalisis efisiensi termal (η_{ORC}),
- dan menghitung *Signal-to-Noise Ratio* (S/N) serta variansi (ANOVA).

Bahan penelitian berupa **data teknis fluida kerja R123a**, **data karakteristik panas buang boiler**, dan **parameter geometri awal evaporator** seperti panjang tabung, diameter, serta susunan tube.

Evaporator yang menjadi objek analisis dirancang dalam bentuk **shell and tube heat exchanger** dengan satu shell-pass dan dua tube-pass, serta **susunan tabung segitiga berselang (staggered triangular pitch 30°)** untuk meningkatkan efektivitas perpindahan panas [15].

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan panjang tabung dan laju aliran massa secara signifikan meningkatkan laju perpindahan panas dan efisiensi sistem. Nilai efisiensi tertinggi sebesar 72,84% diperoleh pada kombinasi diameter 12 mm, panjang 2,5 m, dan laju massa 0,50 kg/s.

Peningkatan laju massa fluida kerja meningkatkan turbulensi aliran, sehingga memperbesar koefisien perpindahan panas konvektif. Hal ini menyebabkan resistansi termal menurun dan mempercepat proses penguapan fluida kerja di dalam evaporator.

Hasil ANOVA menunjukkan bahwa laju massa merupakan faktor dominan dengan kontribusi 47,3%. Temuan ini konsisten dengan teori perpindahan panas dan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa karakteristik aliran fluida memiliki pengaruh paling signifikan terhadap performa heat exchanger.

Dibandingkan dengan metode optimasi lain seperti algoritma genetik, metode Taguchi dalam penelitian ini menunjukkan keunggulan dalam kesederhanaan dan efisiensi komputasi, tanpa mengurangi validitas hasil. Hal ini menjadikan metode ini sangat sesuai untuk tahap desain awal sistem ORC skala kecil.

3.1. Hasil

Penelitian ini menggunakan model *shell and tube evaporator* dengan konfigurasi **satu shell-pass dan dua tube-pass**, yang diuji secara simulatif melalui variasi tiga faktor desain: **diameter dalam pipa (A)**, **panjang tabung (B)**, dan **laju aliran massa fluida kerja (C)**. Ketiga faktor tersebut divariasikan pada tiga level (3^3) dan disusun dalam **rancangan orthogonal array L9** untuk efisiensi eksperimen. Hasil perhitungan termodinamika dan analisis efisiensi sistem ORC disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Orthogonal Array L9 (3^3) dan Hasil Simulasi Efisiensi ORC

R un No.	A Diameter Dalam (mm)	B Panjang Tabung (m)	C Laju Massa (kg/s)	Laju Perpindahan Panas, Q (kW)	Efisiensi Termal, η_{or-c} (%)	S/N Ratio (dB)
1	12	1.5	0.35	18.62	65.42	36.3 1

2	12	2.0	0.42	21.74	69.15	36.79
3	12	2.5	0.50	23.10	72.84	37.25
4	14	1.5	0.42	20.65	68.22	36.68
5	14	2.0	0.50	22.93	71.54	37.09
6	14	2.5	0.35	19.18	66.13	36.41
7	16	1.5	0.50	21.88	70.48	36.96
8	16	2.0	0.35	18.35	65.27	36.29
9	16	2.5	0.42	20.11	67.42	36.58

Berdasarkan hasil simulasi pada Tabel 3, terlihat bahwa nilai laju perpindahan panas (\dot{Q}) meningkat seiring dengan peningkatan **panjang tabung (B)** dan **laju aliran massa fluida kerja (C)**. Nilai tertinggi diperoleh pada **Run 3 (A₁B₃C₃)** dengan (\dot{Q}) = 23.10 kW dan efisiensi termal (η_{ORC}) = 72.84%. Sebaliknya, nilai terendah diperoleh pada **Run 8 (A₃B₂C₁)** dengan (\dot{Q}) = 18.35 kW dan efisiensi (η_{ORC}) = 65.27%.

Secara umum, peningkatan laju aliran massa dari 0,35 ke 0,50 kg/s menyebabkan peningkatan efisiensi rata-rata sebesar **6,9%**, menunjukkan bahwa **laju massa fluida kerja merupakan faktor dominan** terhadap kinerja termal evaporator. Fenomena ini terjadi karena peningkatan laju massa memperkecil resistansi termal di sisi fluida kerja, sehingga memperbesar koefisien perpindahan panas menyeluruh (U) [18].

Analisis variansi (ANOVA) digunakan untuk menentukan besarnya pengaruh tiap faktor terhadap efisiensi termal. Hasil perhitungan ANOVA ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Analisis Variansi (ANOVA) untuk Efisiensi Sistem ORC

Sumber Variasi	Derajat Bebas (df)	Jumlah Kuadrat (SS)	Rata-rata Kuadrat (MS)	F-Ratio	Kontribusi (%)
Faktor A (Diameter tabung)	2	9.21	4.61	12.1	32.8
Faktor B (Panjang tabung)	2	5.58	2.79	7.3	19.9
Faktor C (Laju massa)	2	13.25	6.63	17.4	47.3

Dari Tabel 4 dapat disimpulkan bahwa **faktor C (laju massa fluida kerja)** memberikan kontribusi terbesar yaitu **47,3%** terhadap efisiensi sistem, diikuti oleh **faktor A (diameter tabung)** sebesar **32,8%**, dan **faktor B (panjang tabung)** sebesar **19,9%**. Hasil ini memperkuat temuan bahwa peningkatan laju massa memiliki pengaruh paling signifikan terhadap efisiensi sistem ORC skala kecil.

3.2. Pembahasan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa variasi diameter pipa, panjang tabung, dan laju massa fluida kerja berpengaruh signifikan terhadap efisiensi termal sistem ORC. Secara teoritis, peningkatan laju massa fluida kerja memperbesar koefisien perpindahan panas menyeluruh karena turbulensi aliran meningkat dan ketebalan lapisan film panas menurun[14]. Kondisi ini menyebabkan proses perpindahan panas dalam evaporator berlangsung lebih efektif sehingga efisiensi sistem meningkat.

Fenomena tersebut sejalan dengan temuan Jiménez-Arreola et al. [12] yang menjelaskan bahwa stabilitas termal evaporator sangat bergantung pada laju aliran dan karakteristik geometrinya. Perubahan geometri yang tepat dapat menjaga kestabilan operasi sistem ORC meskipun terjadi fluktuasi daya panas dari sumber panas buang. Dengan demikian, desain hasil optimasi menggunakan kombinasi $A_1B_3C_3$ memberikan keseimbangan yang baik antara efisiensi perpindahan panas dan kestabilan tekanan di dalam sistem.

Jika dibandingkan dengan pendekatan optimasi multiobjektif berbasis algoritma genetik seperti yang dilakukan oleh Akbari et al. [1], penggunaan metode Taguchi pada penelitian ini menawarkan pendekatan yang lebih sederhana dan efisien. Meskipun perhitungan dilakukan hanya menggunakan perangkat lunak Excel, hasilnya mampu menunjukkan kecenderungan optimasi yang konsisten dengan teori dan studi terdahulu. Hal ini membuktikan bahwa metode Taguchi dapat menjadi alternatif yang efektif untuk analisis awal desain ORC skala kecil.

Secara praktis, hasil penelitian ini relevan untuk mendukung penerapan sistem ORC di sektor UMKM sebagaimana telah dikaji oleh Anam pada penelitian sebelumnya. Desain evaporator hasil optimasi dapat digunakan untuk memanfaatkan panas buang dari boiler industri kecil sehingga meningkatkan efisiensi energi sekaligus menekan konsumsi bahan bakar fosil. Hal ini juga mendukung implementasi *Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2023* [3] tentang percepatan pengembangan energi terbarukan di Indonesia, dengan memberikan solusi rekayasa yang murah, efisien, dan aplikatif bagi pelaku industri kecil.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa optimasi desain evaporator menggunakan metode Taguchi merupakan pendekatan yang efektif untuk meningkatkan performa sistem Organic Rankine Cycle (ORC) skala kecil. Kombinasi parameter geometrik dan kondisi operasi terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap efisiensi termal, dengan laju aliran massa sebagai faktor dominan.

Secara metodologis, pendekatan Taguchi mampu mengurangi kompleksitas analisis tanpa mengorbankan akurasi hasil, sehingga layak digunakan sebagai metode optimasi awal dalam perancangan sistem konversi energi. Secara praktis, hasil penelitian ini memberikan dasar perancangan evaporator yang lebih efisien untuk pemanfaatan panas buang pada sektor UMKM.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan validasi eksperimental dan mengevaluasi pengaruh jenis fluida kerja serta kondisi operasi dinamis untuk meningkatkan reliabilitas hasil dalam aplikasi nyata.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Pekajangan Pekalongan atas dukungan fasilitas dan pendanaan penelitian ini sehingga penelitian dapat terlaksana dengan baik

Referensi

- [1] S. Akbari, S. Faghiri, A. M. Zinjanabi, M. A. Bijarchi, M. B. Shafii, and K. Hosseinzadeh, "Thermo-economic investigation and comparative multi-objective optimization of dual-pressure evaporation ORC using binary zeotropic mixtures as working fluids for geothermal energy application," *International Journal of Thermofluids*, vol. 24, no. October, p. 100899, 2024, doi: 10.1016/j.ijft.2024.100899.
- [2] P. Das, D. Mondal, M. Ashraful Islam, and M. Afroj Lily, "Thermodynamic performance evaluation of a solar powered Organic Rankine cycle (ORC) and dual cascading vapor compression cycle (DCVCC): Power generation and cooling effect," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 23, no. July, p. 100662, 2024, doi: 10.1016/j.ecmx.2024.100662.
- [3] PRESIDEN REPUBLIK INDONESIA, "PERATURAN PEMERINTAH REPUBLIK INDONESIA NOMOR 33 TAHUN 2023," no. 098587, pp. 98587–98598, 2023.
- [4] B. Hu and J. Guo, "Effect of cooling water flow on heat transfer performance of horizontal tube spray falling film evaporator in ORC system," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 540–545, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.10.185.
- [5] Z. Ge, Y. Zhai, J. Li, J. Xie, Z. Xie, and F. Yang, "Optimal dual-pressure evaporation organic Rankine cycle for recovering waste heat from compressed air energy storage (CAES)," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 61, no. August, p. 105160, 2024, doi: 10.1016/j.csite.2024.105160.
- [6] M. Jiménez-Arreola, C. Wieland, and A. Romagnoli, "Dynamic response comparison of direct and indirect evaporation options in ORC systems for waste heat recovery," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 1606–1612, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.376.

-
- [7] M. Jiménez-Arreola, C. Wieland, and A. Romagnoli, “Dynamic response comparison of direct and indirect evaporation options in ORC systems for waste heat recovery,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 1606–1612. doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.376.
- [8] J. S. Pereira, J. B. Ribeiro, R. Mendes, G. C. Vaz, and J. C. André, “Development of a direct concept helical-coil evaporator for an ORC based micro-CHP system,” *Energy Procedia*, vol. 129, pp. 474–478, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.162.
- [9] K. Hu, J. Zhu, T. Li, X. Lu, and W. Zhang, “Experimental Investigation on Characteristics of Evaporator Vaporization and Pressure Drops in an Organic Rankine Cycle (ORC),” *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1631–1638, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.394.
- [10] X. Ping, F. Yang, H. Zhang, J. Zhang, and W. Zhang, “Elman and back propagation neural networks based working fluid side energy level analysis of shell-and-tube evaporator in organic Rankine cycle (ORC) system,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 9, pp. 7339–7352, 2022, doi: 10.1016/j.aej.2022.01.006.
- [11] Z. Liang *et al.*, “Thermodynamic performance of organic rankine cycle based pumped thermal energy storage system with different working fluids,” 2025, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e41052.
- [12] M. Jiménez-Arreola, R. Pili, C. Wieland, and A. Romagnoli, “Dynamic study of ORC evaporator operating under fluctuating thermal power from waste heat sources,” *Energy Procedia*, vol. 143, pp. 404–409, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.704.
- [13] R. K. . Roy, *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers, 2010.
- [14] “H E A T A N D M A S S transfer”.
- [15] Z. Liang *et al.*, “Thermodynamic performance of organic rankine cycle based pumped thermal energy storage system with different working fluids,” *Heliyon*, vol. 11, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e41052.
- [16] B. M. A. CengelYunus A, *Thermodynamic An Engineering Approach Sixth Edition*. McGraw-Hill Higher Education, 2007.
- [17] R. K. Roy, *Design of experiments using the Taguchi approach*. New York: A Wiley Interscience Publication, 2001.
- [18] F. N. Chen *et al.*, “Numerical simulation of the performance of a low-head prototype Kaplan turbine,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 163, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1755-1315/163/1/012070.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)
