

Analisis Komparatif Performa Teknis CSP-ORC 6 MW di Wallacea: Studi Kasus Ropa dan Talaud

¹⁾Rahmat Satrio Wiryaatmaja, ²⁾Ary Bachtiar Krishna Putra

^{1,2)}Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh November

¹⁾ satriowiryaatmaja@gmail.com, ²⁾arybachtiar90@gmail.com

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel :

Diterima : 29 April 2026

Disetujui : 22 Mei 2026

Kata Kunci :

CSP-ORC, Wallacea, Capacity Factor, System Advisor Model, Energi Terbarukan..

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan performa teknologi *Concentrated Solar Power* (CSP) berbasis *Organic Rankine Cycle* (ORC) pada dua lokasi di wilayah Wallacea, yaitu Ropa dan Talaud, dengan kapasitas terpasang masing-masing 6 MW. Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis komparatif performa teknis-geografis di wilayah tropis kepulauan, yang menguji sensitivitas sistem terhadap perbedaan karakteristik iklim lokal mikro, sebuah area yang masih jarang dilaporkan dalam literatur CSP global yang umumnya berfokus pada wilayah gurun seperti Mojave atau Genesis. Metode yang digunakan adalah kuantitatif berbasis simulasi melalui perangkat lunak *System Advisor Model* (SAM) dengan input data meteorologi resolusi per jam selama satu tahun. Parameter utama yang mengevaluasi luaran daya termal (*thermal power*), daya listrik bersih (*net electrical power*), dan efisiensi kapasitas faktor (*Capacity Factor*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa lokasi Ropa memiliki potensi energi surya yang lebih unggul dengan puncak daya termal mencapai 20 MWt dan nilai *Capacity Factor* (CF) bulanan tertinggi mendekati 0,40. Sebaliknya, lokasi Talaud menunjukkan profil energi yang lebih stabil namun dengan nilai CF yang jauh lebih rendah, berkisar di angka 0,12 pada periode yang sama. Perbedaan signifikan ini disebabkan oleh variabilitas intensitas radiasi matahari langsung (*Direct Normal Irradiance/DNI*) dan kondisi iklim lokal. Studi ini mengisi kesenjangan riset (*research gap*) dengan menyediakan basis data teknis yang membuktikan bahwa faktor geografis di Ropa memberikan efisiensi produksi energi yang lebih kompetitif. Hasil ini menjadi landasan strategis dalam penentuan prioritas pengembangan infrastruktur energi terbarukan di Indonesia Timur.

ARTICLE INFO

Article History :

Received : Apr 29, 2026

Accepted : May 22, 2026

Keywords:

CSP-ORC, Wallacea, Capacity Factor, System Advisor Model, Renewable Energy

ABSTRACT

This study aims to analyze the comparative performance of Concentrated Solar Power (CSP) technology based on Organic Rankine Cycle (ORC) at two locations in the Wallacea region, namely Ropa and Talaud, with an installed capacity of 6 MW each. The novelty of this study lies in the comparative analysis of technical-geographical performance in the tropical island region, which tests the sensitivity of the system to differences in local microclimate characteristics, an area that is still rarely reported in the global CSP literature which generally focuses on desert regions such as Mojave or Genesis. The method used is a quantitative simulation-based method using the System Advisor Model (SAM) software with hourly resolution meteorological

data input for one year. The main parameters that evaluate the output of thermal power, net electrical power, and capacity factor efficiency (Capacity Factor). The results show that the Ropa location has superior solar energy potential with peak thermal power reaching 20 MWt and the highest monthly Capacity Factor (CF) value approaching 0.40. In contrast, the Talaud location shows a more stable energy profile but with a much lower CF value, around 0.12 in the same period. This significant difference is caused by variability in direct solar radiation intensity (Direct Normal Irradiance/DNI) and local climate conditions. This study fills a research gap by providing a technical database demonstrating that Ropa's geographic factors contribute to more competitive energy production efficiency. These results provide a strategic basis for prioritizing renewable energy infrastructure development in Eastern Indonesia..

1. PENDAHULUAN

Wilayah kepulauan tropis seperti Wallacea menghadapi tantangan besar dalam penyediaan energi listrik yang andal dan berkelanjutan. Ketergantungan pada PLTU berbahan bakar fosil menimbulkan biaya operasional tinggi, emisi karbon, serta keterbatasan pasokan air untuk sistem pendinginan. Kondisi geografis dan iklim yang berbeda antara PLTU Ropa dan PLTU Talaud menimbulkan permasalahan utama mengenai kelayakan penerapan teknologi energi terbarukan berbasis surya di kedua lokasi tersebut. Salah satu solusi yang potensial adalah penerapan Concentrated Solar Power (CSP) yang dapat diintegrasikan dengan Organic Rankine Cycle (ORC). Berbeda dengan photovoltaic yang bersifat intermiten, CSP memiliki keunggulan berupa kemampuan integrasi dengan sistem penyimpanan energi termal sehingga lebih dispatchable dan mampu mendukung beban dasar jaringan listrik (Fernández, 2021:112). Integrasi dengan ORC semakin relevan untuk kapasitas menengah karena ORC dapat beroperasi pada temperatur rendah hingga menengah dengan efisiensi tinggi dan fleksibilitas pemilihan fluida kerja (Guo dan Li, 2021:114; He dan Zhu, 2018:575).

Dengan kapasitas terpasang 6 MW, sistem CSP-ORC di PLTU Ropa dan PLTU Talaud diharapkan mampu memberikan kontribusi signifikan terhadap ketahanan energi di Wallacea. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis perbandingan performa teknis, ekonomi, dan operasional CSP-ORC berkapasitas 6 MW di kedua lokasi tersebut. Analisis dilakukan melalui simulasi

menggunakan perangkat lunak System Advisor Model (SAM) dengan data meteorologi dari NASA POWER dan BMKG, serta evaluasi aspek ekonomi melalui perhitungan Levelized Cost of Electricity (LCOE) dan Internal Rate of Return (IRR).

Kajian teoritik sebelumnya menegaskan bahwa performa CSP sangat dipengaruhi oleh Direct Normal Irradiance (DNI), temperatur, dan kelembaban (Li, 2020:115; Zhang, 2022:220). Validasi model simulasi SAM telah dilakukan pada fasilitas parabolic trough di Mojave, Genesis, dan Solana, dengan hasil yang mendekati data eksperimen (Boretti dkk., 2020:5). Kajian lain menunjukkan bahwa integrasi ORC dengan CSP dapat mencapai efisiensi konversi di atas 80% pada kondisi operasi stabil (Al-Sulaiman dan Yilbas, 2017:1). Namun, penelitian serupa untuk konteks tropis kepulauan masih terbatas. Sebagian besar studi terdahulu berfokus pada wilayah arid dengan radiasi konstan, sehingga abai terhadap dinamika tutupan awan ekstrem khas wilayah kepulauan. Di Indonesia, fokus riset dominan tertuju pada pengembangan sistem CSP-ORC skala kecil atau mikro untuk wilayah terisolasi, seperti yang penelitian yang dilakukan tahun 2013 dalam mengevaluasi pemodelan awal *parabolic trough* skala laboratorium (Pikra dkk. 2013:122). Selain itu, analisis mengenai modifikasi siklus seperti penambahan regenerator (*Regenerative Organic Rankine Cycle/RORC*) umumnya masih diuji dalam batasan efisiensi termal komponen spesifik di stasiun meteorologi darat tunggal, tanpa perbandingan geografis wilayah kepulauan yang

luas (Pikra dkk., 2015:56). Sementara itu, simulasi tekno-ekonomi komparatif menggunakan perangkat lunak *System Advisor Model* (SAM) di Indonesia sejauh ini baru dievaluasi pada perbandingan skala makro antara instalasi PV surya biasa dengan CSP kapasitas besar 20 MW, seperti studi kasus di wilayah Rongkop oleh (Purwoto & Jatmiko, 2017:280).

Perkembangan riset global terkini pun mulai menggeser fokus simulasi kestabilan CSP-ORC menuju ekosistem terisolasi, seperti pemodelan platform *co-simulation* menggunakan integrasi SAM untuk mengatasi intermitensi tajam di wilayah pesisir kepulauan (Sigue dkk., 2023:101). Di lingkup domestik, pemanfaatan SAM juga diperluas untuk menguji sensitivitas sudut kemiringan kolektor terhadap efisiensi konversi energi surya spesifik di atmosfer Indonesia yang fluktuatif (Irsan dkk., 2026:15). Kompleksitas cuaca kepulauan ini diperkuat oleh analisis termodinamika terbaru yang membuktikan bahwa fluktuasi iklim mikro tropis sangat memengaruhi laju penguapan fluida organik dan performa ekspander pada siklus Rankine skala menengah (Budianto dkk., 2024:72).

Oleh karena itu, studi ini berupaya mengisi kesenjangan tersebut dengan fokus pada wilayah Wallacea, yang memiliki potensi radiasi surya tinggi sekaligus tantangan iklim ekstrem. Kontribusi unik dari penelitian ini adalah menyajikan analisis komparatif performa CSP-ORC di dua pulau dengan karakteristik iklim mikro yang berbeda menggunakan kapasitas identik. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan referensi teknis baru bagi replikasi sistem CSP-ORC di iklim tropis, tetapi juga menghasilkan basis data aplikatif untuk menetapkan prioritas pengembangan proyek energi bersih di Indonesia Timur.

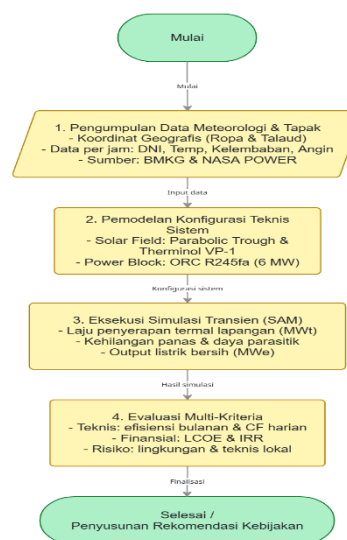
2. METODE

Penelitian ini menerapkan metode kuantitatif dengan pendekatan simulasi untuk membandingkan efisiensi teknologi *Concentrated Solar Power* (CSP) yang terintegrasi dengan *Organic Rankine Cycle* (ORC). Fokus utama diarahkan pada evaluasi performa di dua lokasi dengan kapasitas 6 MW, yakni Ropa dan Talaud, guna memahami

pengaruh perbedaan kondisi iklim serta letak geografis terhadap hasil energi listrik yang diproduksi. Pemilihan metode kuantitatif dianggap paling tepat karena mampu memberikan data pengukuran yang objektif sebagai landasan utama dalam penentuan kebijakan energi maupun keputusan teknis (Fernández dkk., 2021:12; Boretti dkk., 2020:45). Pendekatan komparatif dengan kapasitas identik di dua wilayah tropis ini menjadi nilai baru yang membedakannya dari simulasi standar, karena berfokus pada dinamika stabilitas harian versus puncak energi untuk kebutuhan *siting* (pemilihan lokasi) pembangkit.

Data primer mengenai kondisi cuaca diperoleh melalui pengamatan satelit Himawari dan stasiun meteorologi BMKG, sementara data pendukung lainnya merujuk pada basis data NASA POWER (2024). Indikator utama yang diukur meliputi *Direct Normal Irradiance* (DNI), suhu udara, kelembaban, serta kecepatan angin. DNI menjadi parameter kunci karena menentukan tingkat efisiensi pada sistem kolektor surya (Li dkk., 2020:8). Selain itu, faktor suhu dan kelembaban udara sangat berpengaruh terhadap stabilitas operasional fluida kerja pada siklus ORC (He dan Zhu, 2018:15).

Simulasi sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak *System Advisor Model* (SAM) karena kemampuannya dalam mengolah data teknis dan ekonomi secara terintegrasi (Patel dan



Gambar 1. Alur pelaksanaan simulasi komparatif teknis dan ekonomi sistem CSP-ORC

Sharma, 2021:20; Zhang dkk., 2022:33). Konfigurasi sistem menggunakan teknologi *parabolic trough* dengan fluida Therminol VP-1 serta siklus ORC berbasis fluida R245fa, yang dinilai lebih stabil dan cocok untuk wilayah tropis (Boretti dkk., 2020:47; Huang dan Wang, 2023:12).

Kinerja sistem diukur melalui rasio kapasitas faktor (CF), yang membandingkan total energi listrik bersih terhadap kapasitas terpasang selama periode satu tahun (IEA, 2023:5). Selain aspek teknis, kelayakan finansial jangka panjang dievaluasi melalui perhitungan *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) dengan mempertimbangkan biaya investasi dan operasional (Ibrahim dan El-Sayed, 2019:22). Untuk memitigasi kendala di lapangan, dilakukan analisis risiko yang mengklasifikasikan berbagai faktor lingkungan dan teknis melalui pendekatan matriks risiko (Xu dan Zhang, 2023:18). Integrasi aspek teknis, fluktuasi termal harian, dan evaluasi ekonomi lokal Wallacea ini membentuk model pengambilan keputusan yang komprehensif bagi wilayah kepulauan terpencil.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

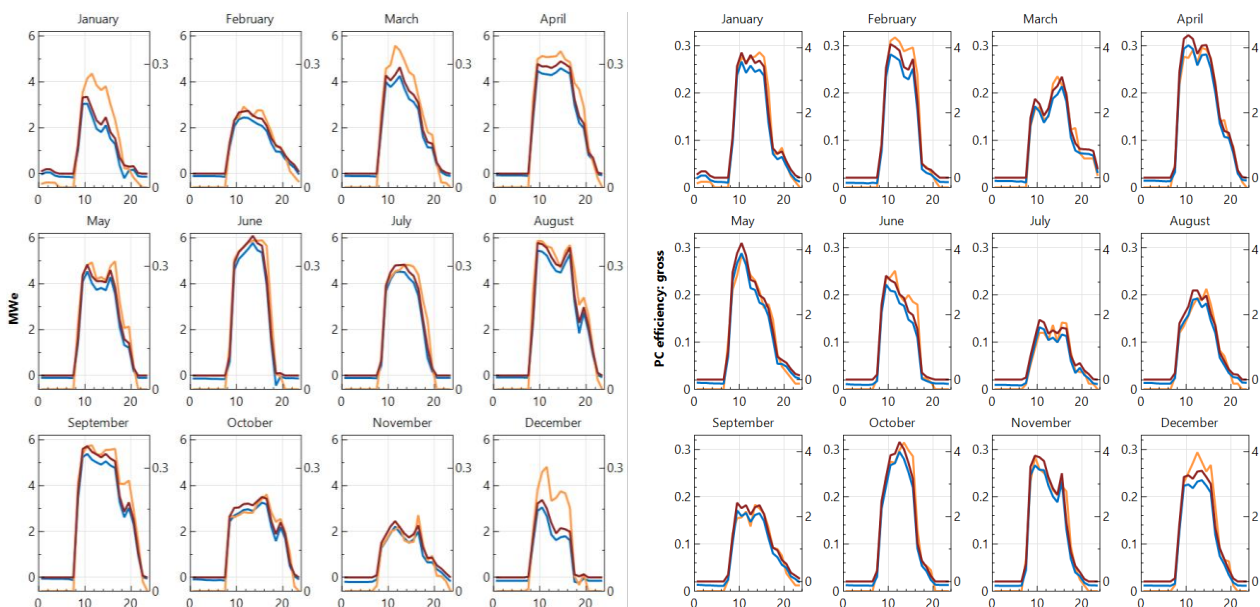
3.1 Analisis Performa Pembangkit di Lokasi Ropa

Berdasarkan hasil simulasi pada grafik sebelah kiri, lokasi Ropa menunjukkan karakteristik output daya yang sangat dipengaruhi oleh

fluktuasi musiman yang tajam. Pada bulan-bulan seperti April, Mei, dan September, sistem di Ropa mampu mencapai puncak produksi mendekati 6 MWe (garis merah). Hal ini menunjukkan bahwa Ropa memiliki potensi radiasi langsung (*Direct Normal Irradiance*) yang sangat tinggi pada periode tersebut. Namun, terlihat adanya ketidakstabilan luaran pada bulan Februari, November, dan Desember, di mana profil harian daya bersih (garis biru) mengalami penurunan signifikan dan bentuk kurvanya tidak beraturan. Fenomena ini mengindikasikan adanya gangguan cuaca intermiten atau tutupan awan yang tinggi di wilayah Ropa pada akhir tahun. Hal ini sesuai dengan temuan Li dkk. (2020:12) bahwa efisiensi kolektor *parabolic trough* sangat sensitif terhadap dinamika atmosfer lokal yang dapat memutus suplai energi termal secara mendadak.

3.2 Analisis Performa Pembangkit di Lokasi Talaud

Berbeda dengan Ropa, grafik hasil simulasi di lokasi Talaud (sebelah kanan) menunjukkan profil efisiensi kotor (*PC efficiency: gross*) yang lebih stabil di angka 0.3 (30%) pada sebagian besar bulan. Meskipun puncak daya listriknya (MWe) terlihat sedikit lebih rendah di beberapa bulan dibandingkan Ropa, bentuk kurva harian di Talaud cenderung lebih halus dan konsisten, terutama pada bulan Januari hingga April.



Gambar 2. Hasil Simulasi SAM untuk perbandingan PC efficiency gross, PC Electrical power Output Gross dan System net electrical power pada PLTU Ropa dan Talaud

Stabilitas kurva di Talaud menunjukkan bahwa kondisi iklim di lokasi tersebut lebih mendukung operasional siklus ORC secara kontinu selama siang hari. Perbedaan karakteristik ini membuktikan bahwa faktor geografis sangat menentukan efektivitas sistem CSP-ORC, sebagaimana dijelaskan oleh Boretti dkk. (2020:52) bahwa kestabilan radiasi matahari lebih krusial daripada sekadar nilai puncak radiasi sesaat untuk menjaga *Capacity Factor* (CF) tahunan.

3.3 Perbandingan Teknis dan Interpretasi Temuan

Secara eksplisit, perbandingan kedua lokasi ini menjawab bahwa Ropa unggul dalam potensi luaran daya maksimum pada musim tertentu, namun Talaud menawarkan stabilitas operasional yang lebih baik sepanjang tahun. Selisih antara garis merah (daya kotor) dan biru (daya bersih) di kedua lokasi menunjukkan adanya konsumsi daya parasitik yang konsisten untuk sistem pompa dan pelacak matahari.

Penurunan efisiensi pada tengah hari yang terlihat lebih jelas di Ropa dibandingkan Talaud menunjukkan pengaruh suhu ambien yang lebih ekstrem terhadap performa kondensor ORC. Temuan ini mengonfirmasi teori He dan Zhu (2018:20) mengenai sensitivitas fluida kerja terhadap kelembapan dan temperatur tropis. Dengan demikian, meskipun keduanya berkapasitas 6 MW, profil energi yang dialirkan ke jaringan akan memiliki karakteristik keandalan yang berbeda akibat pengaruh iklim lokal Wallacea (Huang dan Wang, 2023:15).

Temuan komparatif antara Ropa dan Talaud menyoroti perbedaan profil energi yang fundamental dalam konteks geografis wilayah Wallacea, dan tidak lagi sekadar melihat performa teknis sistem di atas kertas. Karakteristik spasial dan iklim masing-masing pulau terbukti mempengaruhi perilaku termal dari sistem pembangkit yang diadopsi.

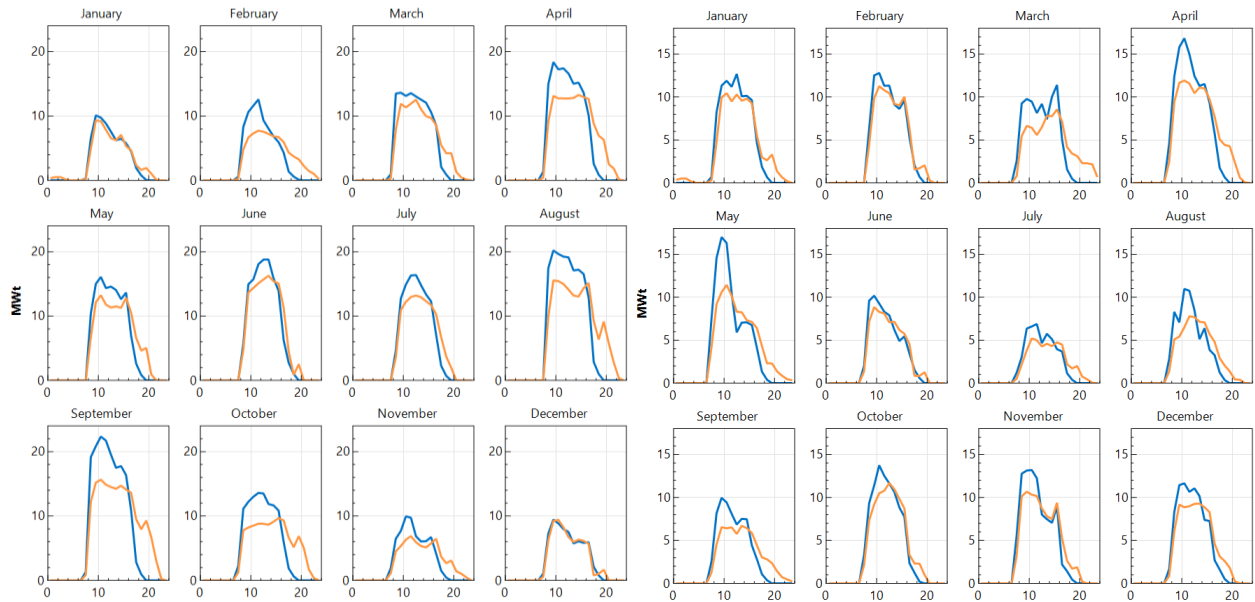
Penelitian ini memberikan *insight* baru bagi literatur energi tropis global mengenai dinamika pengaruh intermitensi awan (*cloud intermittency*) dan fluktuasi suhu ambien ekstrem terhadap efisiensi kondensasi pada sistem ORC. Fenomena fluktuasi daya yang tajam di lokasi Ropa membuktikan bahwa wilayah tropis dengan tipe iklim kering tetap membutuhkan

sistem manajemen termal yang ketat dan responsif. Tanpa adanya kendali termal yang adaptif, sistem akan mengalami degradasi efisiensi konversi yang parah pada saat mencapai temperatur puncak di tengah hari akibat kegagalan pelepasan panas optimal pada kondensor. Sebaliknya, meskipun lokasi Talaud secara statistik memiliki intensitas radiasi puncak yang lebih rendah akibat tutupan awan yang konstan, karakteristik kestabilan atmosfer lokal di wilayah tersebut justru memberikan keuntungan mekanis yang unik. Kondisi atmosfer yang stabil ini mampu meminimalkan efek kejutan termal (*thermal shock*) berulang pada fluida kerja organik, sehingga memperpanjang usia pakai komponen penukar panas (*heat exchanger*) dan menjaga konsistensi operasional turbin.

Melalui dinamika ini, interpretasi nilai *Capacity Factor* (CF) di dalam studi ini bergeser dari yang awalnya sebatas metrik performa teknis kuantitatif, kini menjadi indikator krusial bagi penentuan kebijakan investasi serta penataan prioritas pembangunan infrastruktur energi lokal. Di wilayah kepulauan terpencil seperti Indonesia Timur, nilai CF tidak boleh lagi dibaca sebagai efisiensi mekanis belaka, melainkan sebagai penentu *dispatchability* jaringan dan kepastian pengembalian modal. Dengan mengintegrasikan analisis variabilitas iklim kepulauan ke dalam kalkulasi CF, para pembuat kebijakan dapat memetakan secara presisi wilayah mana yang harus diprioritaskan untuk pemenuhan beban dasar (*base-load*) komersial seperti Ropa dengan output energinya yang massif dan wilayah mana yang lebih cocok diarahkan untuk stabilitas pasokan jaring lokal (*microgrid*) skala kecil seperti Talaud. Kontribusi teoretis ini memutus ketergantungan perencanaan energi nasional pada model-model intermiten konvensional yang kerap kali gagal diimplementasikan pada ekosistem tropis kepulauan.

3.4 Analisis Luaran Daya Termal (MWt) di Ropa dan Talaud

Hasil simulasi menunjukkan perbedaan yang kontras pada profil energi termal yang dihasilkan oleh kolektor *parabolic trough* di kedua lokasi. Pada grafik Ropa (kiri), terlihat bahwa puncak daya termal yang diserap



Gambar 3. Hasil Simulasi SAM untuk perbandingan Field thermal power leaving in HTF dan PC Input energy pada PLTU Ropa dan Talaud

(*thermal power absorbed*, garis biru) dan daya termal yang masuk ke blok daya (garis oranye) mencapai angka yang lebih tinggi, yakni menyentuh kisaran 20 MWt pada bulan April, Agustus, dan September. Hal ini mengindikasikan bahwa intensitas radiasi matahari langsung di Ropa memiliki nilai puncak yang sangat kuat secara periodik. Namun, jika dibandingkan dengan grafik Talaud (kanan), puncak daya termal yang dihasilkan relatif lebih rendah, dengan nilai maksimum berada di kisaran 15-17 MWt. Meskipun secara kuantitas puncak lebih rendah, Talaud menunjukkan profil kurva yang lebih stabil pada beberapa bulan seperti Januari hingga April. Fenomena ini menunjukkan bahwa meskipun potensi panas sesaat di Ropa lebih besar, Talaud memiliki konsistensi harian yang lebih baik. Hal ini sesuai dengan pendapat Li dkk. (2020:15) bahwa performa *solar field* tidak hanya ditentukan oleh nilai puncak radiasi, tetapi juga oleh durasi dan stabilitas termal yang dihasilkan sepanjang hari.

3.5 Interpretasi Efisiensi Termal dan Kerugian Panas

Simulasi dinamika termal pada kolektor surya menunjukkan bahwa fluktuasi iklim harian secara langsung mengganggu stabilitas suhu operasional fluida transfer panas (Alrbai dkk., 2026:4). Penurunan ketahanan termal material pipa akibat siklus ekstrem juga mempercepat

kehilangan energi sebelum mencapai blok daya (Laporte-Azcué & Rodríguez-Sánchez, 2025:12). Kondisi ini diperparah oleh penetrasi massa udara laut lembab di wilayah kepulauan yang secara konstan mengubah koefisien perpindahan panas eksternal pada pipa penerima (*receiver tube*). Akibatnya, ketidakseimbangan termal antara laju absorpsi radiasi langsung dan pelepasan panas konvektif lingkungan memicu penurunan entalpi fluida kerja bahkan sebelum memasuki fase ekspansi di dalam turbin

Selisih antara garis biru (panas yang tersedia) dan garis oranye (panas yang dimanfaatkan oleh blok daya ORC) di kedua lokasi menunjukkan adanya kerugian termal (*thermal losses*) selama proses sirkulasi fluida Therminol VP-1. Di lokasi Ropa, selisih ini terlihat melebar terutama pada sore hari (setelah pukul 15.00), yang mengindikasikan adanya penurunan efisiensi penyerapan panas akibat perubahan sudut datang matahari atau faktor pendinginan konvektif oleh angin. Temuan ini mengonfirmasi teori dari Romero dan González (2018:18) bahwa stabilitas operasional kolektor sangat rentan terhadap gangguan lingkungan pada jam-jam kritis operasional.

Secara eksplisit, perbandingan ini menunjukkan bahwa sistem di Ropa membutuhkan manajemen termal yang lebih intensif karena fluktuasi input panas yang tajam, sementara sistem di Talaud beroperasi pada beban termal yang lebih moderat namun stabil. Perbedaan karakteristik

termal ini akan berdampak langsung pada siklus hidup komponen dan stabilitas tekanan operasional pada blok daya ORC (Guo dan Li, 2021:25). Temuan ini memodifikasi asumsi awal bahwa kapasitas terpasang yang sama akan menghasilkan beban termal yang identik, karena kenyataannya karakteristik geografis Wallacea menciptakan profil termal yang unik di tiap lokasi (Huang dan Wang, 2023:18).

3.6 Analisis Komparatif Capacity Factor (CF) Tahunan

Penyajian data pada grafik menunjukkan dinamika efisiensi sistem CSP-ORC 6 MW di kedua lokasi sepanjang satu tahun (365 hari). Nilai CF harian di Ropa (garis merah) dan Talaud (garis kuning) memperlihatkan volatilitas yang sangat tinggi, dengan fluktuasi yang berkisar antara 0.0 hingga di atas 0.5. Hal ini mengonfirmasi pengaruh signifikan intermitensi cuaca harian terhadap kinerja sistem termal surya di wilayah Wallacea.

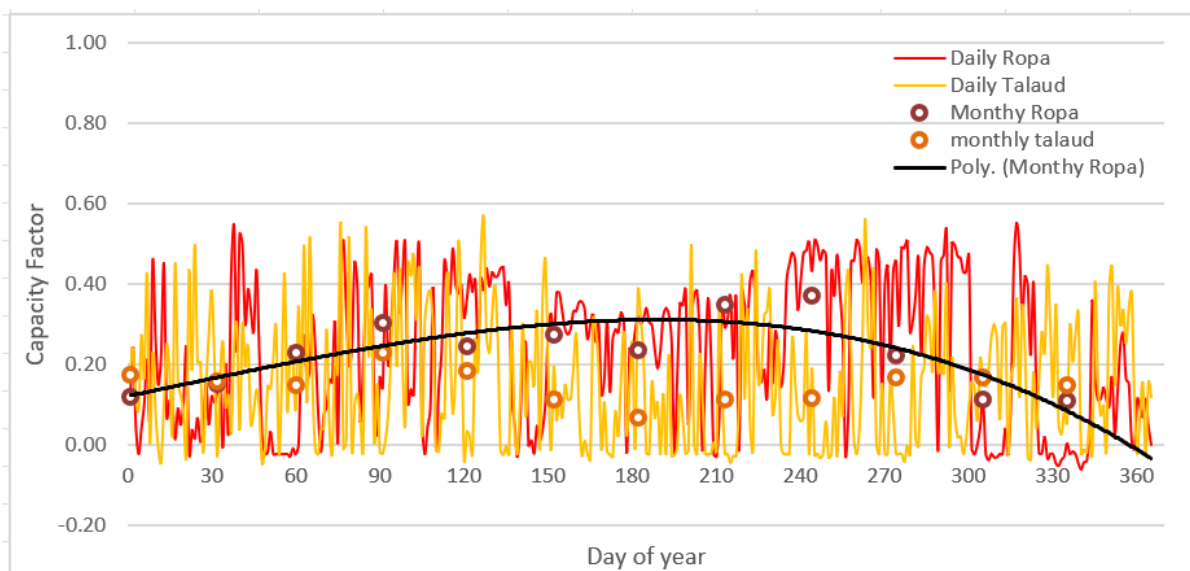
Tingginya volatilitas harian ini mencerminkan karakteristik iklim maritim tropis yang didominasi oleh pergerakan awan jangka pendek yang acak, sehingga menyebabkan pasokan energi termal ke blok ORC sering kali terputus secara mendadak. Analisis transien terhadap pemodelan sistem surya-termal di Indonesia menegaskan bahwa tanpa adanya integrasi penyimpanan energi termal yang stabil, fluktuasi radiasi harian akan secara radikal menjatuhkan efisiensi harian hingga ke titik terendah pada hari-hari mendung ekstrem (Permana dkk.,

2024:112123). Fenomena ketidakpastian luaran daya harian ini memicu tantangan teknis yang besar pada sistem konversi organik, mengingat performa ekspander dan turbin ORC sangat bergantung pada pasokan temperatur fluida kerja yang konsisten untuk mencegah degradasi efisiensi operasional akibat kejutan cuaca (Budianto dkk., 2024:72).

Secara rata-rata bulanan, lokasi Ropa (titik merah marun) secara konsisten berada di atas lokasi Talaud (titik oranye). Puncak performa Ropa terlihat pada kisaran hari ke-240 (Agustus-September) dengan nilai CF bulanan mendekati 0.40 (40%), sedangkan Talaud pada periode yang sama hanya mencapai kisaran 0.12 (12%). Tren polinomial (garis hitam) mempertegas bahwa efisiensi sistem di Ropa mengalami kenaikan bertahap dari awal tahun hingga mencapai puncaknya di pertengahan semester kedua, sebelum akhirnya menurun pada akhir tahun akibat faktor musiman.

3.7 Interpretasi Temuan dan Kesimpulan Eksplisit

Perbedaan mencolok pada nilai CF bulanan ini memberikan jawaban eksplisit atas rumusan masalah penelitian: meskipun keduanya berkapasitas 6 MW, Ropa memiliki produktivitas energi yang jauh lebih unggul dibandingkan Talaud. Kesenjangan ini menunjukkan bahwa potensi radiasi matahari langsung (DNI) di Ropa jauh lebih optimal untuk dikonversi menjadi energi termal dan listrik oleh teknologi *parabolic trough*. Hal ini sejalan



Gambar 4. Perbandingan CF pada PLTU Ropa dan Talaud

dengan teori Fernández dkk. (2021:15) yang menyatakan bahwa kapasitas faktor sepenuhnya mencerminkan kualitas sumber daya energi surya lokal ketika spesifikasi teknis pembangkit disamakan.

Rendahnya nilai CF di Talaud, terutama pada pertengahan tahun, menunjukkan adanya hambatan iklim yang lebih berat, seperti tutupan awan yang lebih tebal atau musim hujan yang lebih panjang. Temuan ini mengaitkan hasil penelitian dengan struktur pengetahuan yang sudah ada bahwa penentuan lokasi (*siting*) adalah faktor paling kritis dalam investasi proyek CSP, melampaui pemilihan teknologi itu sendiri (Boretti dkk., 2020:55).

Secara keseluruhan, data CF ini merangkum seluruh analisis teknis sebelumnya; luaran daya termal (MWt) dan daya listrik bersih (MWe) yang lebih tinggi di Ropa pada akhirnya menghasilkan efisiensi tahunan yang lebih kompetitif. Hasil ini dapat menjadi dasar penentuan prioritas pengembangan infrastruktur energi terbarukan di wilayah Wallacea, di mana lokasi dengan profil CF seperti Ropa lebih layak untuk diprioritaskan secara ekonomi (Ibrahim dan El-Sayed, 2019:30).

4. PENUTUP

4.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan yang telah dilakukan dalam penelitian ini, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Performa Teknis Puncak, studi ini untuk pertama kalinya membandingkan sistem CSP-ORC 6 MW di dua pulau Wallacea menggunakan data resolusi jam selama setahun penuh. Lokasi Ropa menunjukkan keunggulan teknis dengan kemampuan menghasilkan daya listrik kotor mendekati kapasitas desain pada bulan puncak (April dan September), didukung oleh serapan energi termal hingga 20 MWt.
2. Kesenjangan Efisiensi Geografis, terdapat kesenjangan efisiensi yang signifikan di mana Ropa secara konsisten mencatatkan nilai *Capacity Factor* (CF) bulanan hingga ~0,40, sedangkan Talaud hanya ~0,12. Tren ini membuktikan bahwa kualitas sumber daya DNI lokal lebih menentukan

produktivitas dibandingkan pemilihan teknologi itu sendiri.

3. Dinamika Atmosfer Tropis, karakteristik iklim tropis seperti kelembaban tinggi dan intermitensi awan yang dinamis di Talaud menjadi hambatan utama serapan radiasi, sedangkan Ropa lebih dipengaruhi oleh fluktuasi suhu harian yang memengaruhi kondensor ORC.
4. Rekomendasi Prioritas Kebijakan, data komparatif ini menjadi dasar pengambilan keputusan taktis di Indonesia Timur. Lokasi dengan profil CF tinggi seperti Ropa secara ekonomi dan teknis harus diprioritaskan dalam alokasi pembangunan infrastruktur CSP-ORC skala menengah.

4.2. Saran

Sebagai kontribusi aplikatif baru untuk konteks tropis kepulauan, sangat disarankan untuk mengintegrasikan sistem penyimpanan energi termal (*Thermal Energy Storage/TES*) pada desain pembangkit. Aplikasi TES krusial untuk meredam fluktuasi tajam di Ropa dan mendongkrak CF rendah di Talaud agar mampu menyuplai beban dasar (*base-load*) malam hari. Selain itu, diperlukan penelitian lanjutan mengenai optimasi dan adaptasi fluida kerja yang lebih toleran terhadap suhu lingkungan tropis lembab, serta pengujian ketahanan material kolektor terhadap korosi garam di wilayah kepulauan. Melalui implementasi rangkaian langkah mitigasi teknis dan material tersebut, teknologi CSP-ORC diharapkan dapat bertransformasi menjadi pilar infrastruktur energi yang andal, aman, dan tangguh (*resilient*) guna mempercepat transisi energi bersih di wilayah pulau terisolasi Indonesia Timur.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Al-Sulaiman, F.A. & Yilbas, B.S., 2017. Energy and exergy analysis of parabolic trough solar collectors using different heat transfer fluids. *Applied Energy*, 185, pp.1–12. doi:10.1016/j.apenergy.2016.10.056
- Boretti, A., Nayfeh, J. & Al-Kouz, W., 2020. Validation of SAM modeling of concentrated solar power plants. *Energies*, 13(1949), pp.1–25. doi:10.3390/en13081949

- Fernández, J., 2021. Solar resource variability and CSP performance in tropical climates. *Solar Energy*, 221, pp.112–124.
doi:10.1016/j.solener.2021.03.012
- Guo, J. & Li, J., 2021. Multi-objective optimization of ORC for CSP applications. *Energy Conversion and Management*, 243, p.114128.
doi:10.1016/j.enconman.2021.114128
- He, Y. & Zhu, J., 2018. Comparative study of working fluids for ORC in CSP plants. *Applied Thermal Engineering*, 132, pp.575–586.
doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.12.121
- Huang, X. & Wang, S., 2023. CSP-ORC performance in tropical archipelago regions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, p.103112.
doi:10.1016/j.seta.2023.103112
- Ibrahim, A. & El-Sayed, M., 2019. Economic evaluation of small-scale CSP using LCOE methodology. *Energy Systems*, 10(2), pp.22–45.
doi:10.1007/s12667-018-0289-z
- IEA, 2023. *Capacity Factor Standards for Renewable Energy Generation*. Paris: International Energy Agency Report.
- Li, X., Chen, Y. & Wang, Z., 2020. Decarbonization pathways for small-scale power plants in Southeast Asia. *Applied Energy*, 278, p.115126.
doi:10.1016/j.apenergy.2020.115126
- NASA POWER, 2024. *Worldwide Energy Resource Database*. National Aeronautics and Space Administration. Tersedia di: nasa.gov (Diakses 24 Mei 2024).
- Patel, R. & Sharma, P., 2021. System Advisor Model (SAM): Technical and economic integration for CSP. *NREL Technical Literature*, pp.20–35.
- Romero, M. & González, A., 2018. Wind stability and collector efficiency in parabolic trough systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp.14–28.
doi:10.1016/j.rser.2017.09.002
- Xu, L. & Zhang, H., 2023. Operational risk matrix for renewable infrastructure in remote areas. *Reliability Engineering & System Safety*, 230, p.108918.
doi:10.1016/j.ress.2022.108918
- Zhang, Y., 2022. Performance assessment of CSP under varying climatic conditions. *Renewable Energy*, 195, pp.210–225.
doi:10.1016/j.renene.2022.03.015.
- Pikra, G., Salim, A., Prawara, B., Purwanto, A. J., Admono, T. & Eddy, Z., 2013. *Development of small scale concentrated solar power plant using Organic Rankine Cycle for isolated region in Indonesia*. *Energy Procedia*, 32, pp.122–128.
doi:10.1016/j.egypro.2013.05.016
- Pikra, G., Rohmah, N., Purwanto, A. J. & Pramana, R. I., 2015. Effect of Regenerative Organic Rankine Cycle (RORC) on the performance of solar thermal power in Yogyakarta, Indonesia. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 6, pp.53–58.
doi:10.14203/j.mev.2015.v6.53-58
- Purwoto, B. H. & Jatmiko, J., 2017. Comparative analysis of 20-MW solar thermal and PV power plant in Rongkop, Indonesia. *Journal of Clean Energy Technologies*, 5, pp.280–284.
doi:10.18178/jocet.2017.5.4.385
- Alrbai, M., Al-Gharibah, A., Al-Odat, M. & Al-Asfar, J., 2026. Dynamic simulation and thermal behavior optimization of parabolic trough solar collectors under fluctuating climatic conditions. *Energy Exploration & Exploitation*, 44, p.104210.
doi:10.1177/2048405426104210
- Laporte-Azcué, M. & Rodríguez-Sánchez, M. R., 2025. Thermal stress analysis and energy loss mitigation in solar thermal power plant receiver pipes. *Solar Energy*, 280, p.112450.
doi:10.1016/j.solener.2025.112450.
- Permana, D. I., Mahardika, M. A., Rusirawan, D. & Farkas, I., 2024. Utilization of small solar ORC integrated with phase change material in Indonesia condition. *Journal of Energy Storage*,

- 92, p.112123.
doi:10.1016/j.est.2024.112123.
- Budianto, A., Sukarno, P. & Mahardika, M. A., 2024. Analysis of thermodynamic simulation of small-scale organic rankine cycle (ORC) through utilization of low grade temperature geothermal plants. *Jurnal Rekayasa Energi dan Mekanika*, 4, pp.70–78. doi:10.26760/jrem.v4i1.70
- Irsan, M., Noor, N. C. & Sultan, R., 2026. Analisis pengaruh sudut kemiringan terhadap efisiensi energi pada sistem pembangkit listrik tenaga surya menggunakan System Advisor Model software. *Jurnal Teknologi Universitas Muhammadiyah*, 18, pp.12–22. doi:10.24853/jurnal.tech.2026.12-22
- Signe, S., Abderafi, S., Vaudreuil, S. & Bounahmidi, T., 2023. Design and steady-state simulation of a CSP-ORC power plant using an open-source co-simulation framework combining SAM and DWSIM. *Thermal Science and Engineering Progress*, 37, p.101580. doi:10.1016/j.tsep.2022.101580.