

Evaluasi Modularity Index pada Sistem Plug-and-Play Renewable Power Station

Dwi Harjono

Program Studi Teknik Listrik, Politeknik Negeri Pontianak, Indonesia

Email corresponding: dwi_hrjn@yahoo.co.id

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi modularity index pada sistem plug-and-play renewable power station yang dirancang untuk mendukung fleksibilitas dan skalabilitas sistem energi renewable. Evaluasi dilakukan berdasarkan tiga parameter utama, yaitu functional independence, interface standardization, dan reconfiguration capability. Pengujian dilakukan pada tiga konfigurasi sistem, yaitu konfigurasi dasar, konfigurasi ekspansi dengan penambahan modul photovoltaic, dan konfigurasi penggantian modul baterai. Hasil pengujian menunjukkan bahwa konfigurasi dasar memiliki nilai modularity index sebesar 0,85. Penambahan modul photovoltaic meningkatkan nilai modularity index menjadi 0,88, sedangkan konfigurasi penggantian baterai menghasilkan nilai modularity index tertinggi sebesar 0,90. Hasil ini menunjukkan bahwa arsitektur modular yang diusulkan mampu mendukung sistem plug-and-play dengan tingkat fleksibilitas, skalabilitas, dan kemudahan pemeliharaan yang tinggi. Kerangka evaluasi yang diusulkan memberikan pendekatan kuantitatif yang dapat direproduksi untuk menilai modularitas arsitektur renewable power station, yang selama ini masih jarang dibahas secara formal dalam literatur.

Kata kunci: indeks modularitas, sistem plug-and-play, renewable power station, fleksibilitas sistem, skalabilitas.

Abstract

This study evaluates the modularity index in plug-and-play renewable power station systems designed to support the flexibility and scalability of renewable energy systems. The evaluation was carried out based on three main parameters, namely functional independence, interface standardization, and reconfiguration capability. Tests were carried out on three system configurations, namely the basic configuration, the expansion configuration with the addition of photovoltaic modules, and the battery module replacement configuration. The test results showed that the basic configuration had a modularity index value of 0.85. The addition of a photovoltaic module increases the modularity index value to 0.88, while the battery replacement configuration results in the highest modularity index value of 0.90. These results show that the proposed modular architecture is capable of supporting plug-and-play systems with a high level of flexibility, scalability, and ease of maintenance. The proposed evaluation framework provides a reproducible quantitative approach to assessing the architectural modularity of renewable power stations, which has been rarely formally discussed in the literature.

Keywords: modularity index, plug-and-play system, renewable power station, system flexibility, scalability.

1. PENDAHULUAN

Transisi menuju sistem energi terbarukan telah mempercepat adopsi arsitektur power station yang terdesentralisasi dan fleksibel. Sistem tenaga yang ada, yang ditandai dengan pembangkit terpusat

yang besar dan konfigurasi yang tidak fleksibel, sering kali kesulitan beradaptasi dengan permintaan energi yang dinamis, terutama di lingkungan terpencil atau yang berubah dengan cepat. Sebaliknya, renewable power station modular - terdiri dari unit fungsional independen dan dapat dioperasikan seperti susunan fotovoltaik, penyimpanan baterai, dan modul pengkondisian daya - menawarkan keuntungan yang signifikan dalam fleksibilitas, skalabilitas, dan pemeliharaan [1].

Arsitektur modular memfasilitasi kemampuan plug-and-play, memungkinkan penerapan cepat, konfigurasi ulang yang mudah, dan ekspansi yang efisien untuk memenuhi berbagai persyaratan beban. Terlepas dari manfaat praktis yang diakui dari sistem energi modular, sebagian besar penelitian dalam energi terbarukan berfokus pada metrik kinerja listrik seperti hasil energi, efisiensi sistem, atau stabilitas jaringan, daripada mengukur fleksibilitas struktural yang melekat dalam desain modular [2].

Sementara beberapa penelitian menekankan ketahanan dan indeks sistem terintegrasi untuk sistem energi yang lebih luas (misalnya, kerangka kerja indeks ketahanan untuk sistem terintegrasi renewable) [3], Ada penelitian empiris terbatas yang mengusulkan dan mengevaluasi metrik standar khusus untuk modularitas arsitektur power station. Modularitas dalam desain sistem tenaga sebagian besar tetap dijelaskan secara kualitatif, dengan beberapa pendekatan sistematis untuk mengukur secara objektif sejauh mana modul dapat diganti, diperluas, atau dikonfigurasi ulang secara independen tanpa desain ulang yang ekstensif [2].

Konsep modularitas berasal dari domain rekayasa dan desain produk, di mana indeks modularitas telah dikembangkan untuk menilai independensi dan interkoneksi komponen atau modul fungsional dalam sistem yang kompleks [4]. Indeks ini memberikan dasar matematis untuk mengukur seberapa baik sistem mendukung perakitan modular, penggunaan kembali, dan skalabilitas [5]. Namun, penerapannya pada sistem renewable power station baru lahir dan kurang dieksplorasi, terutama dalam konteks arsitektur plug-and-play yang disesuaikan untuk infrastruktur energi adaptif.

Untuk mengatasi kesenjangan penelitian ini, penelitian ini mengusulkan acuan Indeks Modularitas yang disesuaikan dengan sistem renewable power station plug-and-play. Dengan mengevaluasi parameter secara kuantitatif seperti independensi fungsional, standarisasi antarmuka, dan kemampuan konfigurasi ulang, indeks modularitas menawarkan ukuran komprehensif fleksibilitas dan skalabilitas sistem. Pekerjaan ini memberikan evaluasi empiris dari indeks modularitas di berbagai konfigurasi sistem, memungkinkan perbandingan objektif dan keputusan desain yang tepat. Temuan ini berkontribusi pada desain sistem energi terbarukan teori arsitektur modular, menawarkan metrik yang menjembatani prinsip-prinsip modularitas konseptual dengan implementasi praktis dalam sistem energi terdesentralisasi.

Tren terbaru di dunia energi terbarukan kini mulai bergeser ke arah arsitektur modular dan decentralized. Pendekatan ini bukan tanpa alasan; sistem tersebut dirancang agar lebih responsif terhadap dynamic energy demand serta memberikan fleksibilitas tinggi saat proses deployment. Keunggulan utama dari sistem modular terletak pada aspek scalability, adaptabilitas, serta kemudahan dalam maintenance, yang menjadikannya solusi ideal untuk ekosistem energi lokal maupun instalasi di area terpencil (remote areas). Penerapan sumber energi terbarukan secara modular terbukti meningkatkan kemampuan sistem untuk beradaptasi sekaligus memperkuat ketahanan energi lokal [5]. Hal ini semakin menegaskan bahwa infrastruktur energi modern memang memerlukan arsitektur yang modular.

Dalam ekosistem microgrid, desain modular kini menjadi standar baru untuk mempermudah system integration dan pengelolaan lifecycle management. Pada pengembangan microgrid modular terpadu, menunjukkan bahwa penggunaan komponen standar tidak hanya mempermudah scalability, tetapi juga memangkas kompleksitas sistem selama masa operasionalnya [2]. Senada dengan hal tersebut, yang menyoroti bahwa hybrid renewable energy microgrids akan jauh lebih efisien jika menggunakan konfigurasi modular [6]. Pola ini memberikan fleksibilitas lebih dalam mengintegrasikan berbagai jenis sumber energi serta teknologi energy storage secara efektif.

Meski teknologinya terus berkembang, merancang sistem energi modular yang tetap andal secara operasional bukanlah perkara mudah. Kerumitan pada system architecture dan koordinasi antarperangkat masih menjadi hambatan utama dalam implementasi microgrid [7]. Namun, hambatan ini sebenarnya bisa diminimalisir melalui pendekatan modularitas, asalkan didukung oleh kerangka evaluasi yang sistematis.

Senada dengan hal itu, untuk isolated microgrids yang mengandalkan energi renewable, diperlukan desain yang mampu menyeimbangkan antara fleksibilitas modular dengan operational resilience, terutama saat menghadapi fluktuasi pada sisi load (beban) maupun generation (pembangkitan) [8]. Hingga saat ini, sebagian besar literatur masih mengevaluasi sistem energi terbarukan melalui sudut pandang performance-based metrics tradisional, seperti efisiensi, reliabilitas, dan stabilitas. Namun, penilaian kuantitatif terhadap aspek modularitas itu sendiri masih sangat terbatas. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa composite metrics sangat berguna untuk menilai infrastruktur energi yang kompleks. Namun, indeks yang ada saat ini lebih banyak mengukur ketahanan dan kontinuitas operasional, bukan mengukur sejauh mana tingkat modularitas suatu sistem secara eksplisit [9].

Sebenarnya, dalam bidang teknik manufaktur ke bidang teknik manufaktur, hal ini sudah lama di dalam menggunakan metrik untuk mengukur component independence, interface standardization, hingga potensi reconfigurability. Namun uniknya, konsep-konsep yang sudah matang tersebut justru belum banyak dieksplorasi atau diadaptasi ke dalam konteks sistem pembangkit energi renewable.

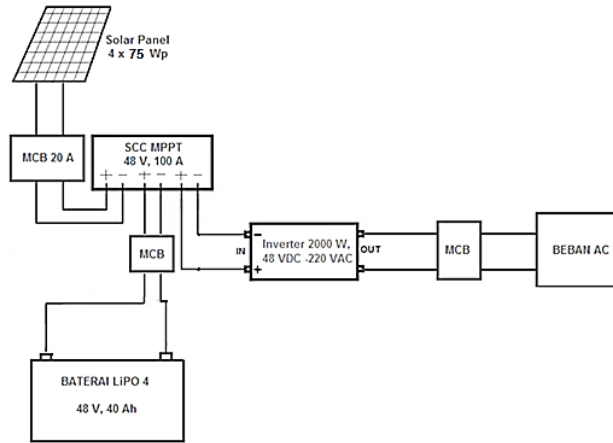
Walaupun beberapa studi telah menyebutkan bahwa evaluasi sistem modular sangat membantu dalam operational decision-making dan optimasi, Namun demikian, hingga saat ini modularity index masih sangat jarang dijadikan sebagai parameter evaluasi utama dalam berbagai riset sistem energi saat ini [10]. Lebih jauh lagi, tinjauan terhadap sistem energi terbarukan yang bersifat integrated dan hybrid mempertegas bahwa kita membutuhkan kerangka evaluasi yang lebih holistik. Kita tidak bisa lagi hanya bergantung pada electrical performance indicators semata. Riset yang menyatakan sistem energi masa depan menuntut adanya metrik evaluasi yang mampu menangkap aspek fleksibilitas dan adaptabilitas struktural, melampaui metrik teknis konvensional yang selama ini digunakan [11] [12].

Berdasarkan penelusuran literatur, terlihat adanya research gap yang cukup mencolok: meskipun arsitektur modular mulai marak diterapkan pada sistem energi terbarukan dan microgrid, kita masih kekurangan kerangka kerja kuantitatif yang secara spesifik mampu mengukur tingkat modularitas pada sistem power station plug-and-play. Hingga saat ini, studi yang tersedia masih terjebak pada dua hal yaitu berfokus sepenuhnya pada metrik kinerja (performance metrics) dan Mengadopsi konsep modularitas secara kualitatif tanpa adanya formalized index (indeks yang baku). Kesenjangan inilah yang menjadi motivasi kuat untuk mengembangkan kerangka kerja modularity index yang dirancang khusus bagi arsitektur renewable power station.

2. METODE

Konsep Modularitas dalam Sistem Renewable Power Station

Dalam konteks renewable power station, modularitas mengacu pada sejauh mana suatu sistem dapat diuraikan menjadi unit fungsional independen yang dapat dikonfigurasi, diganti, atau diperluas tanpa mempengaruhi pengoperasian modul lain. Tidak seperti sistem tenaga terpusat konvensional, Renewable power station plug-and-play menekankan antarmuka standar, kemandirian fungsional, dan kemudahan konfigurasi ulang.



Gambar 1 Skema renewable power station modular.

Untuk menilai karakteristik ini secara kuantitatif, Indeks Modularitas (MI) dirumuskan sebagai metrik komposit yang mewakili modularitas struktural dan fungsional sistem. Indeks yang diusulkan dirancang agar sederhana, dapat direproduksi, dan dapat diterapkan pada renewable power station eksperimental.

Tabel 1. Parameter Indeks Modularitas dan Kriteria Penilaian [13]

No	Parameter	Deskripsi	Kriteria evaluasi	Range skor
1	Kemandirian Fungsional (FI)	Kemampuan setiap modul untuk beroperasi secara independen tanpa mempengaruhi modul lain	<ul style="list-style-type: none"> • Perlindungan dan kontrol independen • Isolasi modul yang rusak • Kontinuitas operasi sistem selama penggantian modul 	0 – 1
2	Standarisasi Antarmuka (IS)	Tingkat keseragaman dan kompatibilitas antarmuka listrik dan fisik antar modul	<ul style="list-style-type: none"> • Tegangan bus DC standar • Konektor listrik seragam • Perlindungan dan antarmuka yang konsisten 	0 – 1
3	Kemampuan Konfigurasi Ulang (RC)	Kemudahan penambahan, penghapusan, atau pengaturan ulang modul tanpa desain ulang sistem utama	<ul style="list-style-type: none"> • Diperlukan pengkabelan ulang minimal • Tidak ada <i>shutdown</i> sistem selama konfigurasi ulang • Waktu konfigurasi ulang yang singkat 	0 – 1

Setiap parameter modularitas dinormalisasi dalam kisaran 0 hingga 1, di mana nilai yang lebih tinggi menunjukkan tingkat modularitas yang lebih tinggi. Skor ditentukan berdasarkan observasi eksperimental dan uji konfigurasi ulang sistem yang dilakukan pada renewable power station plug-and-play.

Definisi Parameter Modularitas

Berdasarkan teori sistem modular dan pertimbangan praktis dalam sistem energi terbarukan, tiga parameter utama dipilih untuk mewakili modularitas sistem:

Kemandirian Fungsional (FI)

Kemandirian fungsional mengukur kemampuan setiap modul untuk beroperasi tanpa ketergantungan fungsional pada modul lain. Modul dianggap independen secara fungsional jika kegagalan, pelepasan, atau penggantian tidak mengganggu pengoperasian modul yang tersisa.

Dalam sistem yang diusulkan, independensi fungsional dievaluasi berdasarkan Perlindungan dan kontrol independen dari setiap modul, Kemampuan untuk mengisolasi modul yang rusak dan Kontinuitas operasi selama penggantian modul. Skor FI dinormalisasi antara 0 dan 1, di mana 1 menunjukkan kemandirian fungsional penuh.

Standardisasi Antarmuka (IS)

Standardisasi antarmuka mengevaluasi keseragaman antarmuka listrik dan fisik di antara modul sistem. Antarmuka standar menyederhanakan integrasi, mengurangi waktu pemasangan, dan memungkinkan pertukaran modul dari spesifikasi serupa. Parameter IS dinilai dengan mempertimbangkan Tingkat tegangan bus DC yang seragam, Konektor listrik standar dan Antarmuka komunikasi dan perlindungan yang konsisten. Skor IS yang lebih tinggi mencerminkan tingkat kompatibilitas antarmuka yang lebih tinggi di seluruh modul.

Kemampuan Konfigurasi Ulang (RC)

Kemampuan konfigurasi ulang mewakili kemudahan sistem dapat dimodifikasi untuk mengakomodasi modul baru, kapasitas yang diperluas, atau konfigurasi yang diubah tanpa memerlukan desain ulang besar atau pematian sistem. Parameter ini dievaluasi berdasarkan Waktu yang diperlukan untuk penambahan atau pelepasan modul, Stabilitas sistem selama konfigurasi ulang dan Pengkabelan ulang minimal atau pemrograman ulang control. RC dinormalisasi antara 0 dan 1, di mana nilai yang lebih tinggi menunjukkan fleksibilitas konfigurasi ulang yang lebih besar.

Formulasi Matematika Indeks Modularitas

Untuk mendapatkan skor modularitas keseluruhan, ketiga parameter digabungkan menjadi satu indeks modularitas menggunakan pendekatan agregasi bobot yang sama:

$$MI = (FI + IS + RC) / 3$$

Di mana:

MI = Indeks Modularitas

FI = Skor Kemandirian Fungsional

IS = Skor Standardisasi Antarmuka

RC = Skor Kemampuan Konfigurasi Ulang

Nilai MI yang dihasilkan berkisar dari 0 hingga 1. Nilai mendekati 1 menunjukkan sistem plug-and-play yang sangat modular, sedangkan nilai yang lebih rendah mewakili modularitas terbatas. Formulasi dengan bobot yang sama dipilih untuk menjaga kesederhanaan dan objektivitas, memastikan bahwa tidak ada parameter tunggal yang mendominasi penilaian modularitas. Pendekatan pembobotan yang sama dipilih untuk menjaga objektivitas dan menghindari dominasi satu parameter tertentu, sehingga indeks modularitas merepresentasikan kontribusi struktural setiap aspek secara seimbang.

Prosedur Evaluasi

Evaluasi indeks modularitas dilakukan melalui pengamatan eksperimental dan uji konfigurasi ulang sistem dalam beberapa skenario operasi, termasuk Konfigurasi sistem dasar, Penambahan modul pembangkit energi terbarukan dan penggantian modul penyimpanan energi. Untuk setiap konfigurasi, skor FI, IS, dan RC dinilai dan dinormalisasi secara independen. Indeks modularitas kemudian dihitung untuk membandingkan modularitas sistem di berbagai konfigurasi.

Reproduktifitas dan Penerapan

Formulasi indeks modularitas yang diusulkan dirancang agar dapat direproduksi dan dapat disesuaikan dengan desain renewable power station lainnya. Dengan mengandalkan parameter yang didefinisikan dengan jelas dan penilaian yang dinormalisasi, kerangka kerja memungkinkan perbandingan antara sistem atau alternatif desain yang berbeda. Formulasi ini memberikan dasar

kuantitatif untuk mengevaluasi modularitas di renewable power station plug-and-play dan mendukung ekstensi masa depan yang mungkin mencakup faktor pembobotan berbasis ekonomi, keandalan, atau ketahanan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Evaluasi Indeks Modularitas

Evaluasi indeks modularitas dilakukan di bawah tiga konfigurasi sistem yang berbeda, yaitu konfigurasi dasar, konfigurasi yang diperluas dengan modul fotovoltaik tambahan, dan konfigurasi penggantian baterai. Hasil penilaian indeks modularitas dirangkum dalam tabel 2.

Tabel 2. Hasil Evaluasi Indeks Modularitas

Konfigurasi	Kemandirian Fungsional (FI)	Standardisasi Antarmuka (IS)	Kemampuan Konfigurasi Ulang (RC)	Indeks Modularitas (MI)
Konfigurasi Dasar (PV + Baterai + Inverter)	0.87	0.85	0.83	0.85
Konfigurasi yang Diperluas (Modul PV Tambahan)	0.90	0.88	0.86	0.88
Konfigurasi Penggantian Baterai	0.92	0.88	0.90	0.90

Hasil evaluasi modularity index pada sistem plug-and-play renewable power station menunjukkan bahwa seluruh konfigurasi pengujian memiliki tingkat modularitas yang tinggi. Konfigurasi sistem dasar menghasilkan nilai modularity index sebesar 0,85, yang mencerminkan pemisahan fungsi yang jelas antara modul pembangkitan, penyimpanan energi, dan pengkondisian daya. Nilai functional independence (FI) sebesar 0,87 menunjukkan bahwa setiap modul mampu beroperasi secara mandiri tanpa mempengaruhi kinerja modul lain. Selain itu, nilai interface standardization (IS) sebesar 0,85 mengindikasikan bahwa penggunaan antarmuka listrik yang seragam telah mendukung integrasi modul secara konsisten. Nilai reconfiguration capability (RC) sebesar 0,83 menunjukkan bahwa sistem telah mendukung konfigurasi ulang tingkat modul, meskipun masih memerlukan penyesuaian operasional minor.

Pada konfigurasi ekspansi dengan penambahan modul photovoltaic, nilai modularity index meningkat menjadi 0,88. Peningkatan ini disertai dengan kenaikan nilai FI menjadi 0,90 dan IS menjadi 0,88, yang menunjukkan bahwa modul tambahan dapat diintegrasikan tanpa mengganggu operasi modul yang telah ada. Sementara itu, nilai RC sebesar 0,86 mengindikasikan bahwa proses ekspansi dapat dilakukan dengan kebutuhan konfigurasi ulang yang relatif rendah. Nilai modularity index tertinggi, yaitu 0,90, diperoleh pada skenario penggantian modul battery. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem mampu mendukung proses penggantian modul secara efisien dengan gangguan operasional yang minimal.

Dampak Ekspansi Sistem pada Modularitas

Peningkatan nilai modularity index pada konfigurasi ekspansi dan penggantian modul menunjukkan bahwa arsitektur sistem yang diusulkan secara inheren mendukung prinsip plug-and-play. Kenaikan nilai FI pada konfigurasi ekspansi menegaskan bahwa penambahan modul photovoltaic tidak menimbulkan ketergantungan fungsional baru, sehingga skalabilitas sistem dapat dicapai tanpa perlu perubahan signifikan pada struktur kontrol dan proteksi.

Selain itu, peningkatan nilai IS pada skenario ekspansi menegaskan peran penting standarisasi antarmuka dalam menjaga konsistensi integrasi antar modul. Antarmuka listrik dan skema proteksi yang seragam memungkinkan modul tambahan diintegrasikan dengan cepat serta mengurangi risiko kesalahan instalasi. Temuan ini menunjukkan bahwa standarisasi antarmuka merupakan faktor kunci dalam mempertahankan tingkat modularitas sistem seiring dengan pertumbuhan kapasitas.

Nilai RC yang relatif tinggi pada seluruh konfigurasi menunjukkan bahwa sistem mampu mengakomodasi perubahan konfigurasi dengan kebutuhan penyesuaian operasional yang minimal. Hal ini memiliki implikasi langsung terhadap aspek pemeliharaan dan pengembangan sistem, karena penggantian atau penambahan modul dapat dilakukan tanpa memerlukan penghentian operasi sistem secara menyeluruh. Dengan demikian, arsitektur modular yang diusulkan memberikan fleksibilitas desain yang relevan untuk penerapan renewable power station pada lingkungan dengan kebutuhan energi yang dinamis.

Kinerja Modularitas selama Penggantian Modul

Nilai indeks modularitas tertinggi 0,90 diamati selama konfigurasi penggantian baterai. Konfigurasi ini menyoroti kemampuan sistem untuk mendukung penggantian modul, fitur penting dari renewable power station plug-and-play. Skor FI mencapai 0,92, mencerminkan isolasi modul yang kuat dan kemampuan untuk mengganti unit penyimpanan energi tanpa mengganggu pengoperasian modul pembangkit dan pengkondisian daya. Skor standarisasi antarmuka tetap konsisten di 0,88, menunjukkan bahwa desain standar secara efektif mendukung pertukaran modul baterai dengan spesifikasi serupa. Selain itu, skor RC meningkat menjadi 0,90, mengkonfirmasi bahwa penggantian modul dapat dilakukan secara efisien dengan pengkabelan ulang dan gangguan operasional minimal. Hasil ini memvalidasi kesesuaian sistem untuk aplikasi yang memerlukan pemeliharaan cepat atau peningkatan komponen.

Diskusi dan Implikasi Praktis

Secara keseluruhan, hasilnya menunjukkan bahwa renewable power station plug-and-play yang diusulkan menunjukkan indeks modularitas tinggi secara konsisten di semua konfigurasi yang diuji. Peningkatan nilai MI dari konfigurasi dasar ke konfigurasi yang diperluas dan penggantian menunjukkan bahwa arsitektur sistem tidak hanya mendukung operasi modular tetapi juga mendapat manfaat dari ekspansi dan konfigurasi ulang modular.

Dari perspektif praktis, indeks modularitas yang tinggi menyiratkan pengurangan waktu pemasangan, perawatan yang disederhanakan, dan peningkatan kemampuan beradaptasi sistem. Karakteristik ini sangat menguntungkan untuk instalasi jarak jauh, catu daya darurat, dan sistem energi pendidikan atau eksperimental. Dibandingkan dengan sistem tenaga renewable arsitektur tetap konvensional, desain modular yang diusulkan menawarkan fleksibilitas yang unggul tanpa mengorbankan stabilitas operasional.

Kerangka indeks modularitas yang disajikan dalam penelitian ini menyediakan alat kuantitatif untuk mengevaluasi dan membandingkan desain renewable power station modular. Sementara evaluasi saat ini berfokus pada aspek fungsional dan struktural, studi di masa depan dapat menggabungkan parameter tambahan seperti biaya ekonomi, keandalan, dan kinerja jangka panjang untuk lebih meningkatkan penilaian modularitas.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menyajikan evaluasi indeks modularitas sistem renewable power station plug-and-play. Kerangka kerja modularitas kuantitatif dirumuskan berdasarkan tiga parameter utama: independensi fungsional, standarisasi antarmuka, dan kemampuan konfigurasi ulang. Indeks modularitas yang diusulkan memberikan ukuran objektif untuk menilai tingkat modularitas dalam arsitektur renewable power station.

Evaluasi eksperimental di bawah konfigurasi sistem yang berbeda menunjukkan nilai indeks modularitas tinggi secara konsisten. Konfigurasi dasar mencapai indeks modularitas 0,85,

sedangkan ekspansi sistem melalui modul fotovoltaik tambahan meningkatkan indeks menjadi 0,88. Indeks modularitas tertinggi 0,90 diamati selama penggantian modul baterai, mengkonfirmasi kemampuan sistem untuk mendukung konfigurasi ulang plug-and-play yang efisien dengan gangguan operasional minimal.

Hasilnya menunjukkan bahwa arsitektur modular yang diusulkan secara efektif meningkatkan fleksibilitas, skalabilitas, dan pemeliharaan sistem. Dengan memungkinkan pengoperasian modul independen dan antarmuka standar, sistem ini mendukung penyebaran cepat dan pemeliharaan yang disederhanakan, yang penting untuk aplikasi energi terdesentralisasi dan adaptif.

Kerangka indeks modularitas yang diperkenalkan dalam penelitian ini dapat diterapkan sebagai alat evaluasi praktis untuk membandingkan desain renewable power station modular. Penelitian di masa depan dapat memperluas kerangka kerja ini dengan menggabungkan parameter tambahan seperti biaya ekonomi, keandalan, dan kinerja operasional jangka panjang untuk memberikan penilaian yang lebih komprehensif tentang sistem energi modular.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. W. Monie, M. Gustafsson, S. Onnered, and K. Guruvita, "Renewable and integrated energy system resilience – A review and generic resilience index," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 215, no. February, pp. 1–23, 2025, doi: 10.1016/j.rser.2025.115554.
- [2] E. Per and L. Cycle, "Modular Microgrid Technology with a Single Development Environment Per Life Cycle," *Energies*, vol. 17, no. 5016, pp. 1–19, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/en17195016>.
- [3] F. Marco and M. Antonio, *Towards the definition of assembly - oriented modular product architectures : a systematic review*, vol. 35, no. 2. Springer London, 2024.
- [4] M. Roy and G. Abdul-nour, "Integrating Modular Design Concepts for Enhanced Efficiency in Digital and Sustainable Manufacturing : A Literature Review," *Appl. Sci.*, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/app14114539>.
- [5] A. Kafetzis et al., "Deployment of Modular Renewable Energy Sources and Energy Storage Schemes in a Renewable Energy Valley," *Energies*, vol. 18, no. 5837, pp. 1–26, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/en18215837>.
- [6] A. Dosa and O. A. Olanrewaju, "A Comprehensive Review of Hybrid Renewable Microgrids : Key Design Parameters , Optimization Techniques , and the Role of Demand Response in Enhancing System Flexibility," *Energies*, vol. 18, no. 5154, pp. 1–40, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/en18195154>.
- [7] S. Punitha, N. P. Subramaniam, and P. A. D. V. Raj, "A comprehensive review of microgrid challenges in architectures , mitigation approaches , and future directions," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 11, no. 60, 2024, doi: 10.1186/s43067-024-00188-4.
- [8] W. M. Figueredo, O. R. Saavedra, P. B. L. Neto, and D. Q. Oliveira, "Design and operational challenges of renewable-powered isolated microgrids : a zero-carbon approach," *Sci. Rep.*, vol. 15, pp. 1–32, 2025, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-28882-x> 3.
- [9] "Renewable and integrated energy system resilience – A review and generic.pdf." .
- [10] X. D. Jiacheng Li, Huixiang Li, "Distribution-microgrid partition and collaborative scheduling strategy.pdf," *J. Energy Storage*, vol. 118, pp. 1–15, 2025.
- [11] N. Samala and C. Bethi, "Harnessing synergy : a holistic review of hybrid renewable energy systems and unified power quality conditioner integration," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 12, no. 4, pp. 1–74, 2025, doi: 10.1186/s43067-025-00193-1.
- [12] M. Khalid, "Smart grids and renewable energy systems : Perspectives and grid integration challenges," *Energy Strateg. Rev.*, vol. 51, no. June 2023, p. 101299, 2024, doi: 10.1016/j.esr.2024.101299.
- [13] H. Sonnenschein, "A Modular Optimizing Calculation Method of Power Station Energy Balance and Plant Efficiency," 1982, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3227273>.