

PENERAPAN FISIKA KOMPUTASI DALAM PENGEMBANGAN SISTEM ENERGI TERBARUKAN

Igreya Mitchell Kumendong¹, Ishak Pawarangan^{2*}

^{1,2}Jurusan Fisika, Fakultas MIPA dan Kebumihan, Universitas Negeri Manado, Indonesia

e-mail: ishakpawarangan@unima.ac.id

Abstrak

Artikel ini mengkaji peran fisika komputasi dalam pengembangan sistem energi terbarukan melalui tinjauan sistematis terhadap 15 artikel terbaru (2015–2024). Hasil menunjukkan bahwa simulasi berbasis perangkat keras, algoritma optimasi (*particle swarm optimization*, *single-step dynamic programming*), dan kontrol cerdas (logika fuzzy, kontrol prediktif) mampu meningkatkan efisiensi sistem hingga 15% dan mengurangi biaya operasional. Selain itu, pendekatan seperti kontroler *sigma delta modulation* (SDM) untuk keamanan siber dan *recurrent neural network* (RNN) untuk pengelolaan energi termal menunjukkan peningkatan efisiensi komputasi hingga 24 kali lipat. Studi ini menegaskan bahwa integrasi teknologi komputasi dalam sistem energi terbarukan mampu menjawab tantangan global di sektor energi dan mendorong keberlanjutan energi di masa depan.

Kata kunci: Fisika komputasi, Energi terbarukan, Optimasi, Kecerdasan buatan, Stabilitas jaringan

THE APPLICATION OF COMPUTATIONAL PHYSICS IN THE DEVELOPMENT OF RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

Abstract

This article examines the role of computational physics in the development of renewable energy systems through a systematic review of 15 recent articles (2015-2024). Results show that hardware-based simulation, optimization algorithms (particle swarm optimization, single-step dynamic programming), and intelligent control (fuzzy logic, predictive control) are able to increase system efficiency by up to 15% and reduce operational costs. In addition, approaches such as sigma delta modulation (SDM) controller for cybersecurity and recurrent neural network (RNN) for thermal energy management showed up to 24-fold improvement in computational efficiency. This study confirms that the integration of computing technology in renewable energy systems is able to address global challenges in the energy sector and promote energy sustainability in the future.

Keywords: *Computational physics, Renewable energy, Optimization, Artificial intelligence, Grid stability*

PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, kebutuhan akan energi terbarukan semakin meningkat seiring dengan tantangan perubahan iklim global dan keterbatasan sumber energi fosil. Sistem energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, dan hidro memiliki potensi besar untuk menggantikan sumber energi konvensional [1].

Fisika komputasi telah menjadi alat yang sangat penting dalam pengembangan

sistem energi terbarukan. Dengan kemajuan dalam perangkat lunak dan perangkat keras selama dua dekade terakhir, metode simulasi numerik seperti *Computational Fluid Dynamics* (CFD) telah menunjukkan manfaat besar dalam memprediksi hasil dan mengurangi kebutuhan akan prototipe fisik dan sumber daya pengujian [2,3]. Selain itu, alat komputasi lainnya juga memainkan peran penting dalam pengembangan dan evaluasi sistem energi terbarukan. Misalnya, pendekatan scientometric telah digunakan untuk memetakan

perkembangan ilmiah dan kepadatan penelitian dalam sumber energi terbarukan seperti fotovoltaik, angin, dan biomassa [4].

Lebih lanjut, integrasi fisika komputasi dengan kecerdasan buatan dan *machine learning* telah menghasilkan metode baru dalam analisis data energi terbarukan. Pendekatan ini mempercepat pengambilan keputusan dalam desain dan pengoperasian sistem energi yang lebih efisien dan berkelanjutan [5]. Tantangan komputasi dan komunikasi yang muncul dengan adopsi sumber energi berkelanjutan ke dalam jaringan listrik juga menjadi fokus penelitian, termasuk platform komputasi baru seperti blockchain dan IoT, serta pendekatan algoritmik untuk integrasi energi terbarukan [6]. Integrasi kecerdasan buatan ke dalam sistem energi terbarukan juga merupakan pendekatan transformatif untuk mengatasi tantangan keberlanjutan energi dan perubahan iklim [7]. Kecerdasan buatan digunakan untuk analisis ekonomi, strategis, dan operasional dalam bidang energi, serta untuk peramalan dan analisis kinerja yang mendukung pengambil keputusan [8].

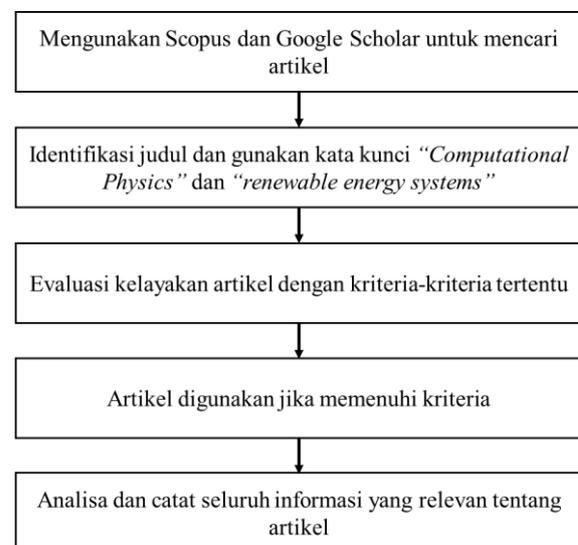
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis riset-riset terkini terkait penerapan fisika komputasi untuk sistem energi terbarukan dengan fokus pada identifikasi metode simulasi, optimasi, dan kontrol yang belum optimal. Penelitian ini difokuskan pada masih terbatasnya kajian sistematis tentang integrasi teknologi seperti kecerdasan buatan, teori permainan, dan simulasi probabilistik dalam kajian stabilitas jaringan dan manajemen daya hibrid.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan yaitu metode *Systematic Literature Review* (SLR) dengan kerangka kerja *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) dan menggunakan pendekatan kualitatif (data yang didapatkan berupa deskripsi). Metode SLR adalah pendekatan yang digunakan untuk mengidentifikasi, menyeleksi, dan mensintesis penelitian secara sistematis dan terstruktur. Tujuan utama dari metode ini adalah untuk memberikan ringkasan komprehensif tentang literatur yang ada, mengidentifikasi kesenjangan penelitian, dan mengarahkan penelitian lebih lanjut. Dalam penerapannya,

SLR membutuhkan proses yang terstandar untuk memastikan hasil yang dapat diandalkan, termasuk pengumpulan data dari sumber-sumber terpercaya, seleksi berdasarkan kriteria yang jelas, dan analisis sistematis [9].

Kerangka kerja PRISMA adalah panduan yang dirancang untuk meningkatkan transparansi dan konsistensi dalam pelaksanaan SLR. PRISMA terdiri dari empat tahap utama, yaitu identifikasi, penyaringan, evaluasi kelayakan, dan inklusi. Setiap tahap mencakup proses spesifik seperti penghapusan literatur duplikat, evaluasi abstrak, dan seleksi literatur berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Penggunaan PRISMA membantu peneliti memastikan bahwa literatur yang digunakan relevan dengan topik penelitian, memiliki kualitas tinggi, dan mendukung tujuan penelitian [10]. Kegiatan penelitian meliputi perencanaan pencarian dan pengumpulan sumber data atau informasi, seleksi literatur berdasarkan kriteria tertentu dan fokus artikel, serta analisis, sintesis, dan ekstraksi temuan. Diagram alir metode dan kerangka kerja ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian

Tahap pertama adalah pengumpulan literatur dari sumber terpercaya, seperti Scopus dan Google Scholar. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian mencakup "*Computational Physics*" dan "*Renewable Energy Systems*". Artikel yang dipilih adalah yang diterbitkan dalam sepuluh tahun terakhir, ditulis dalam bahasa Inggris, dan relevan

dengan tema penelitian. Artikel yang tidak memenuhi kriteria tersebut atau tidak memiliki data empiris langsung terkait energi terbarukan dikecualikan dari analisis.

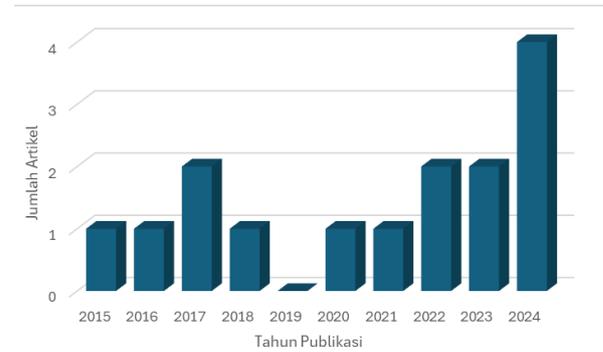
Setelah literatur terkumpul, seleksi dilakukan dengan menggunakan kerangka kerja PRISMA, yang melibatkan empat tahap utama: identifikasi, penyaringan, evaluasi kelayakan, dan inklusi. Pada tahap identifikasi, literatur yang duplikat dihapus, dan abstrak atau teks lengkap dievaluasi untuk memastikan kesesuaian dengan topik penelitian. Kriteria inklusi antara lain artikel dan paper tentang komputasi fisika, artikel dan paper tentang sistem energi terbarukan, publikasi artikel dan paper pada jurnal terindeks scopus, rentang artikel yang diterbitkan tahun 2015-2024, dan teks lengkap dan bisa diakses. Artikel yang tidak memenuhi kriteria ini dikeluarkan dari analisis.

Tahap terakhir adalah analisis dan sintesis temuan. Artikel yang terpilih diklasifikasikan berdasarkan pembahasan utama dan dicatat temuan terhadap fisika komputasi dan sistem energi terbarukan. Kerangka kerja PRISMA digunakan untuk pengambilan data hingga mendapatkan temuan-temuan yang sesuai dengan yang diharapkan. Berdasarkan metode PRISMA, pencarian komprehensif menghasilkan 30 artikel kemudian dianalisis dan dievaluasi kelayakan dengan kriteria tertentu sehingga menghasilkan 15 artikel yang berkualitas dan terindeks scopus dari kata judul “*Renewable Energy System*” dan kata kunci “*Computational Physics*”

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari penelitian ini berupa analisa dari 15 literatur dari tahun 2015 sampai 2024

dari kata judul “*Renewable Energy System*” dan kata kunci “*Computational Physics*”. Ada 15 literatur yang didapatkan dari pencarian kata judul dan kata kunci di Scopus dan Google Scholar yang terdistribusi pada rentang tahun 2015 – 2024 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Jumlah Publikasi Artikel tentang Sistem Energi Terbarukan

Pada tahun 2015-2018 ketertarikan terhadap penelitian masih minim ditandai dengan jumlah artikel terindeks scopus per tahun yang terbatas walaupun setiap tahunnya masih ditemukan literatur dalam bentuk artikel dan paper. Ditemukan masing-masing 1 artikel pada tahun 2015, 2016, 2018, 2020, 2021 dan bahkan pada tahun 2019 tidak ditemukan literatur yang sesuai dengan yang diharapkan. Kemudian pada tahun 2017, 2022, 2023 ditemukan masing-masing 2 artikel hingga tahun 2024 sudah terdapat 4 literatur yang terindeks scopus. Tabel 1. menunjukkan deskripsi temuan terkait penerapan fisika komputasi terhadap sistem energi terbarukan.

Tabel 1. Penerapan Fisika Komputasi terhadap Sistem Energi Terbarukan

No	Penulis dan Tahun	Judul	Deskripsi Temuan	
			Sistem Energi Terbarukan	Fisika Komputasi
1.	Tushar, Z. Nie, A. Srivastava, dan S. Basumallik (2024)	Measuring and Enabling Transmission Systems Resiliency With Renewable	Artikel ini membahas penerapan sistem energi terbarukan berbasis angin untuk meningkatkan ketahanan jaringan transmisi listrik. Dengan meningkatnya penetrasi energi angin, tantangan seperti kelebihan	Penelitian menggunakan simulasi perangkat keras-dalam-lingkaran (<i>hardware-in-the-loop</i>) yang melibatkan simulator digital real-time (RTDS), unit pengukuran phasor (PMU), dan algoritma

No	Penulis dan Tahun	Judul	Deskripsi Temuan	
			Sistem Energi Terbarukan	Fisika Komputasi
		Wind Energy Systems [11]	beban pada jalur transmisi dapat memengaruhi stabilitas jaringan. Penulis mengusulkan skema tindakan remedial (<i>Remedial Action Scheme</i> , RAS) yang terdesentralisasi untuk mengurangi beban berlebih dengan cara optimal, memungkinkan integrasi energi angin yang lebih tinggi.	komputasi terdistribusi. Skema RAS yang diusulkan menggunakan optimasi matematis berbasis simplex terdistribusi untuk meningkatkan ketahanan jaringan terhadap serangan siber dan kondisi angin ekstrem, menunjukkan efektivitas dalam skenario simulasi offline dan online.
2.	Natasha E. Batista, Paulo C.M. Carvalho, Luis M. Fernandez-Ramírez, Arthur P.S. Braga (2023)	Optimizing methodologies of hybrid renewable energy systems powered reverse osmosis plants [12]	Artikel ini mengusulkan pengelolaan energi untuk sistem energi terbarukan hibrid (<i>Hybrid Renewable Energy System</i> , HRES) yang mendukung operasi <i>pabrik reverse osmosis</i> (RO). Studi ini mengintegrasikan teori portofolio (<i>Portfolio Theory</i> , PT) dan <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO) untuk optimasi multi-objektif. Metodologi ini bertujuan mengurangi biaya air minum (<i>Drinking Water Cost</i> , DWC), meningkatkan keandalan sistem, dan memperpanjang masa pakai komponen, terutama untuk kombinasi sumber energi terbarukan seperti angin dan matahari.	Penelitian ini menggunakan kombinasi PT dan PSO untuk mengoptimalkan manajemen energi HRES. PSO diterapkan karena fleksibilitas dan biaya komputasi rendah, sementara PT memberikan solusi dalam kondisi ketidakpastian dengan mengoptimalkan risiko dan pengembalian. Simulasi sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak bibliometrik seperti VOSviewer dan alat analitik StArt, memberikan wawasan tentang tren optimasi sistem HRES.
3.	Qian-Long Pan, Li Jin, Yong He, Zhou-Zhou Liu (2023)	Delay-Dependent Stability Analysis of Multi-Area Load Frequency Control Systems with Multiple Renewable Energy Structures [13]	Artikel ini membahas stabilitas kontrol frekuensi beban (<i>Load Frequency Control</i> , LFC) pada sistem daya multi-area dengan struktur energi terbarukan, seperti energi angin dan surya, serta integrasi kendaraan listrik (EV). Penulis mengusulkan model dinamis baru untuk LFC dengan mempertimbangkan keterlambatan waktu dalam transmisi sinyal. Studi ini juga memperkenalkan kriteria stabilitas berbasis teori Lyapunov dan rekonstruksi model untuk meningkatkan	Penelitian menggunakan pendekatan rekonstruksi model untuk memisahkan bagian terkait keterlambatan waktu dan bagian bebas keterlambatan, sehingga mengurangi kompleksitas perhitungan. Simulasi dilakukan menggunakan kriteria stabilitas berbasis <i>Wirtinger inequality</i> , yang memperbaiki akurasi margin keterlambatan. Studi kasus pada sistem dua-area menunjukkan peningkatan efisiensi perhitungan hingga 15% dibandingkan metode sebelumnya, sambil

No	Penulis dan Tahun	Judul	Deskripsi Temuan	
			Sistem Energi Terbarukan	Fisika Komputasi
			efisiensi perhitungan dan keakuratan analisis stabilitas sistem.	mempertahankan keakuratan tinggi dalam analisis stabilitas sistem.
4.	Jilin Cai, Lili Hao, Qingshan Xu, Keqi Zhang (2022)	Reliability assessment of renewable energy integrated power systems with an extendable Latin hypercube importance sampling method [14]	Artikel ini mengembangkan metode penilaian keandalan sistem daya terintegrasi dengan energi terbarukan, seperti angin dan surya. Penulis mengusulkan metode <i>Extendable Latin Hypercube Importance Sampling</i> (ELHIS) untuk meningkatkan efisiensi komputasi dalam menghitung indeks keandalan sistem daya, seperti <i>Loss of Load Probability</i> (LOLP) dan <i>Expected Power Not Supplied</i> (EPNS). Penggunaan data historis dari pembangkit energi terbarukan di China menunjukkan bahwa metode ini dapat diterapkan secara efektif pada sistem dengan integrasi energi terbarukan yang kompleks.	Penelitian ini menggabungkan model <i>Gaussian Mixture</i> (GMM) dan metode Importance Sampling (IS) untuk membangun distribusi probabilitas optimal yang dapat mengurangi ukuran sampel yang diperlukan dalam <i>Monte Carlo Simulation</i> (MCS). Metode ini mengintegrasikan Latin <i>Hypercube Sampling</i> (LHS) untuk meningkatkan representasi sampel dan mengurangi kesalahan estimasi. ELHIS terbukti lebih efisien dibandingkan metode IS tradisional, dengan pengurangan ukuran sampel yang signifikan tanpa mengorbankan akurasi estimasi indeks keandalan.
5.	Mahmoud A. Mossa, Olfa Gam, Nicola Bianchi (2022)	Dynamic Performance Enhancement of a Renewable Energy System for Grid Connection and Stand-Alone Operation with Battery Storage [15]	Artikel ini mengembangkan skema kontrol baru untuk meningkatkan performa dinamis generator sinkron magnet permanen permukaan (<i>Surface Permanent Magnet Synchronous Generator</i> , SPMSG) yang digerakkan oleh energi angin. Skema kontrol ini dirancang untuk dua mode operasi: terhubung ke jaringan (<i>grid-connected</i>) dan operasi mandiri (<i>stand-alone</i>) dengan dukungan sistem penyimpanan baterai. Untuk memanfaatkan energi angin secara optimal, metode <i>Maximum Power Point Tracking</i> (MPPT) dan kontrol sudut pitch blade digunakan, terutama untuk membatasi daya pada kecepatan angin yang melebihi nilai nominal.	Penelitian memanfaatkan teori kontrol prediktif untuk mengatasi keterbatasan yang ada pada kontrol prediktif tradisional, seperti <i>Direct Power Control</i> (DPC), <i>Direct Torque Control</i> (DTC), dan <i>Current Control</i> (CC). Skema kontrol yang diusulkan memiliki struktur sederhana, dengan kebutuhan komputasi rendah dan tingkat harmonik arus yang rendah, sekaligus meminimalkan ripple pada output daya. Perbandingan performa dilakukan melalui simulasi yang menunjukkan bahwa kontrol baru ini lebih unggul dibandingkan metode tradisional, terutama dalam

No	Penulis dan Tahun	Judul	Deskripsi Temuan	
			Sistem Energi Terbarukan	Fisika Komputasi
			Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem ini mampu memberikan daya yang stabil pada beban terisolasi dan mendukung stabilitas dalam jaringan listrik.	efisiensi komputasi dan kualitas daya yang dihasilkan, menjadikannya solusi yang lebih baik untuk mengelola generator dalam sistem energi terbarukan.
6.	Hemachandra Gudimindla, Manjunatha Sharma K, S Sandhya (2021)	Performance analysis of Grid Integrated Hybrid Renewable Energy System configuration application to Residential Buildings [16]	Artikel ini membahas analisis kinerja sistem energi terbarukan hibrid (<i>Hybrid Renewable Energy System</i> , HRES) yang terintegrasi dengan jaringan untuk mendukung kebutuhan listrik pada bangunan residensial. Studi ini menggabungkan generator energi angin berbasis <i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i> (PMSG) 80 kW dan sistem fotovoltaik (PV) 57,7 kW untuk memenuhi kebutuhan beban rata-rata 17,6 kW dari apartemen di kampus IIT Bombay. Model sistem dikembangkan dengan mempertimbangkan variasi stokastik dalam kecepatan angin dan intensitas iradiasi matahari.	Penelitian menggunakan simulasi berbasis MATLAB untuk mengevaluasi performa sistem, termasuk algoritma optimasi berbasis <i>genetic algorithm</i> (GA) untuk kontrol maksimum daya pada sistem PV dan desain kontroler robust <i>Quantitative Feedback Theory</i> (QFT) untuk stabilitas jaringan. Hasil menunjukkan bahwa sistem hibrid ini dapat secara efisien memenuhi kebutuhan beban dan menyuplai surplus daya ke jaringan selama kondisi lingkungan mendukung.
7.	Marco Raffaele Rapizza, Silvia Maria Canevese (2020)	Fast frequency regulation and synthetic inertia in a power system with high penetration of renewable energy sources: Optimal design of the required quantities [17]	Artikel ini membahas desain optimal untuk regulasi frekuensi cepat (<i>Fast Primary Control</i> , FPC) dan inersia sintetis (<i>Synthetic Inertia</i> , SI) dalam sistem daya dengan penetrasi tinggi energi terbarukan, seperti angin dan fotovoltaik. Studi kasus dilakukan pada sistem kelistrikan Sardinia pada skenario 2030, di mana pembangkit berbasis batu bara dihentikan sepenuhnya. Penulis menunjukkan bahwa FPC dan SI diperlukan untuk menjaga stabilitas frekuensi sistem dalam menghadapi kehilangan daya besar, seperti akibat gangguan pada pembangkit energi terbarukan.	Penelitian menggunakan metode optimasi non-linear untuk menghitung parameter kontrol yang optimal untuk FPC dan SI, seperti nilai gain pengendali. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB untuk menganalisis perilaku frekuensi sistem dan kebutuhan daya maksimum untuk layanan tambahan tersebut. Pendekatan ini mengoptimalkan interaksi antara FPC dan SI untuk mengurangi risiko ketidakstabilan frekuensi, serta menentukan ukuran perangkat yang diperlukan untuk menyediakan layanan

No	Penulis dan Tahun	Judul	Deskripsi Temuan	
			Sistem Energi Terbarukan	Fisika Komputasi
				ini, seperti kondensor sinkron atau penyimpanan energi berbasis baterai.
8.	Antoinette Richa, Sami H. Karaki (2018)	Optimal Design of Hybrid Renewable Energy Systems in Lebanon [18]	Artikel ini membahas desain optimal sistem energi hibrid di Lebanon yang mengintegrasikan sumber energi terbarukan, seperti panel surya fotovoltaik (PV), generator diesel, baterai penyimpanan, dan jaringan listrik yang tidak andal. Penelitian ini mengusulkan metodologi berbasis <i>Single-Step Dynamic Programming</i> (SSDP) untuk simulasi operasi sistem dan <i>Ordinal Optimization</i> (OO) untuk menentukan ukuran sumber daya yang optimal. Studi kasus dilakukan di Desa Qaraoun di wilayah Beqaa, dengan hasil menunjukkan bahwa desain terbaik terdiri dari sistem PV 30 MW dan generator diesel 14 MW tanpa baterai, yang mengurangi biaya listrik rata-rata menjadi 12,2 /kWh, lebih rendah dibandingkan biaya listrik saat ini.	Penelitian menggunakan SSDP untuk memodelkan operasi sistem energi secara real-time, meminimalkan biaya operasional, dan menghitung <i>Levelized Cost of Electricity</i> (LCOE). Pendekatan OO digunakan untuk mengevaluasi dan mengurutkan desain berbasis kinerja, memanfaatkan model sederhana untuk efisiensi komputasi dan model akurat untuk penyempurnaan. Metodologi ini berhasil mengurangi kompleksitas perhitungan dengan tetap mempertahankan keakuratan desain optimal dalam ruang pencarian besar, menunjukkan efektivitas dalam aplikasi sistem energi hibrid.
9.	Ciprian Vlad, Emil Ceangă, Marian Barbu, Ramon Vilanova (2017)	Prediction Techniques in Control of Energy Micro-Systems Based on Renewable Sources [19]	Artikel ini membahas pengendalian sistem mikro-energi berbasis sumber energi terbarukan, seperti angin dan matahari, dalam konteks grid mikro. Fokus utamanya adalah pengembangan teknik prediksi untuk mengelola keseimbangan daya antara energi yang dihasilkan oleh sumber terbarukan dan beban jaringan lokal. Prediksi yang akurat memungkinkan pengendalian yang lebih efisien terhadap sistem, terutama dalam hal memperpanjang masa pakai baterai dan mengurangi biaya energi. Sistem ini mencakup	Penelitian menggunakan model prediksi linier berbasis AR dan ARMA, serta pendekatan non-linier menggunakan jaringan saraf tiruan (<i>neural networks</i>). Pendekatan neural network terbukti paling efektif dalam menghasilkan prediksi yang akurat pada horizon waktu 10 menit, dengan mengurangi standar deviasi kesalahan prediksi hingga 73,40. Prediksi ini dimanfaatkan dalam kontrol berbasis histeresis untuk meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan, termasuk efisiensi

No	Penulis dan Tahun	Judul	Deskripsi Temuan	
			Sistem Energi Terbarukan	Fisika Komputasi
			kontrol hierarkis dengan pengelolaan energi tingkat tinggi dan kontrol tingkat rendah untuk optimalisasi konversi daya pada sumber energi.	pengelolaan daya baterai dan pengurangan jumlah pergantian mode pengisian-pengosongan baterai, yang secara signifikan memperpanjang umur baterai.
10.	Majed Althubaiti, Michael Bernard, Petr Musilek (2017)	Fuzzy Logic Controller for Hybrid Renewable Energy System with Multiple Types of Storage [20]	Artikel ini membahas pengembangan sistem energi terbarukan hibrid (<i>Hybrid Renewable Energy System</i> , HRES) yang mengintegrasikan energi matahari, angin, baterai lithium-ion, dan sistem hidrogen untuk penyimpanan energi. Sistem ini dirancang untuk bekerja secara off-grid, memastikan kebutuhan daya terpenuhi dengan stabilitas yang tinggi meskipun ada fluktuasi pada input daya terbarukan dan beban. Sistem penyimpanan energi memungkinkan pengelolaan surplus daya untuk menghasilkan hidrogen melalui elektrolisis dan mendukung penyediaan daya melalui sel bahan bakar hidrogen pada saat diperlukan.	Penelitian menggunakan kontrol berbasis logika fuzzy untuk mengelola aliran daya secara adaptif dalam mode pengisian dan pengosongan. Logika fuzzy memproses data seperti status pengisian baterai (State of Charge, SOC), kesehatan baterai, dan surplus/defisit daya untuk menentukan distribusi daya antara baterai dan sistem hidrogen. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB Simulink, yang mengintegrasikan data nyata dari matahari, angin, dan beban. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengontrol fuzzy dapat memperpanjang masa pakai baterai dengan menghindari pengisian berlebihan atau pengosongan berlebihan, serta meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem dengan menjaga kualitas daya.
11.	Yihui Zuo, Xiangjun Li (2016)	Game Theory Applied in System of Renewable Power Generation with HVDC Out-sending Facilitated by Hundred Megawatts Battery Energy	Artikel ini membahas integrasi sistem pembangkit energi terbarukan, seperti angin dan surya, yang dilengkapi dengan <i>Battery Energy Storage Station</i> (BESS) untuk meningkatkan efisiensi transmisi menggunakan <i>High Voltage Direct Current</i> (HVDC). Penelitian ini memodelkan sistem pembangkit energi terbarukan hibrid yang mencakup pembangkit tenaga	Penelitian ini mengadopsi pendekatan berbasis teori permainan untuk mengembangkan strategi penjadwalan penyesuaian daya secara kooperatif. Strategi ini bertujuan untuk memaksimalkan manfaat total sistem melalui metode distribusi optimal penyesuaian daya. Penulis menggunakan deviasi frekuensi sebagai parameter untuk menentukan total

No	Penulis dan Tahun	Judul	Deskripsi Temuan	
			Sistem Energi Terbarukan	Fisika Komputasi
		Storage Station [21]	angin, surya, dan termal, dengan dukungan BESS untuk mengatasi ketidakseimbangan daya akibat sifat fluktuatif energi terbarukan.	kebutuhan penyesuaian daya dan menerapkan model permainan kooperatif untuk menentukan distribusi beban. Simulasi menunjukkan bahwa metode ini memberikan hasil optimal dan membantu menjaga stabilitas sistem daya, sambil mengurangi ketidakseimbangan dengan mengintegrasikan skema insentif berbasis hukuman bagi subsistem yang tidak kooperatif.
12.	Nousheen Hashmi, Shoab Ahmad Khan (2016)	Power Energy Management for a Grid-Connected PV System using Rule-Base Fuzzy Logic [22]	Artikel ini membahas teknik manajemen daya pada sistem fotovoltaik (PV) yang terhubung dengan jaringan listrik (grid) dan dilengkapi dengan sistem penyimpanan energi. Metode yang diusulkan mempertimbangkan beberapa batasan, seperti kondisi cuaca, pola pemadaman listrik, jam puncak harga, serta status pengisian baterai. Penjadwalan daya dilakukan dengan menggunakan kontroler pintar berbasis logika fuzzy yang mengelola aliran daya dari berbagai sumber, yaitu panel surya, baterai, dan jaringan listrik, untuk memastikan stabilitas daya meskipun ada fluktuasi pada sumber energi terbarukan dan permintaan beban.	Penelitian menggunakan pendekatan berbasis rule-base fuzzy logic untuk mengatasi ketidakpastian input, seperti fluktuasi daya PV, permintaan beban, pola pemadaman listrik, dan status pengisian baterai. Input yang diterima difuzzyfikasi terlebih dahulu, kemudian aturan fuzzy diterapkan sebelum proses defuzzyfikasi untuk menghasilkan keputusan yang optimal. Simulasi 24 jam menunjukkan bahwa strategi kontrol ini mampu menangani input yang tidak pasti dan nonlinier tanpa memerlukan model numerik yang akurat. Dengan menggabungkan heuristik manusia ke dalam keputusan berbantuan komputer, sistem ini menghasilkan penjadwalan daya yang lebih efisien, fleksibel, dan dapat diperluas untuk menangani skenario khusus lainnya.
13.	Xiaoyi Ding, Yifan Wang, Pengcheng Guo, Wei Sun, Gareth	A Novel Physical and Data-Driven Optimization Methodology	Artikel ini mengembangkan metodologi optimasi baru untuk sistem energi multi-energi (<i>Multi-Energy System, MES</i>) yang mengintegrasikan	Metode yang diusulkan menggabungkan model termodinamika fisik dengan algoritma pembelajaran mesin untuk mengatasi

No	Penulis dan Tahun	Judul	Deskripsi Temuan	
			Sistem Energi Terbarukan	Fisika Komputasi
	P. Harrison, Xiaojing Lv, dan Yiwu Weng (2024)	for Designing a Renewable Energy, Power-to-Gas and Solid Oxide Fuel Cell System Based on Ensemble Learning Algorithm [23]	energi terbarukan, teknologi <i>Power-to-Gas</i> (P2G), dan <i>Solid Oxide Fuel Cell</i> (SOFC) yang dipadukan dengan micro gas turbine (GT). Sistem ini dirancang untuk mengurangi curtailment energi terbarukan dan mengoptimalkan biaya siklus hidup dengan memanfaatkan pendekatan berbasis pembelajaran mesin (<i>ensemble learning</i>). Penelitian menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu meningkatkan efisiensi komputasi hingga 37 kali lebih cepat dibandingkan metode optimasi berbasis fisika tradisional seperti algoritma genetika (<i>Genetic Algorithm, GA</i>).	kompleksitas model fisik pada sistem SOFC/GT. Melalui kombinasi data-driven dan model fisik, sistem ini dapat memprediksi kinerja termodinamika dan ekonomi SOFC/GT dengan akurasi tinggi dan biaya komputasi rendah. Simulasi menunjukkan bahwa metode ini efektif dalam menangani berbagai skala desain dan memastikan keamanan operasional melalui evaluasi risiko termodinamika. Pendekatan ini menawarkan fleksibilitas tinggi dalam pengelolaan daya dan memungkinkan penerapan industri dengan proses optimasi yang cepat dan akurat.
14	Syeda Afra Saiara, Mohd. Hasan Ali (2024)	Sigma Delta Modulation Controller and Associated Cybersecurity Issues with Battery Energy Storage Integrated with PV-Based Microgrid [24]	Artikel ini membahas pengembangan kontroler Sigma Delta Modulation (SDM) untuk sistem penyimpanan energi baterai (<i>Battery Energy Storage System, BESS</i>) yang terintegrasi dalam mikrogrid berbasis fotovoltaik (PV). Kontroler SDM menunjukkan peningkatan performa dibandingkan kontroler proporsional-integral (PI) dan logika fuzzy (FLC), dengan mengurangi kesalahan tegangan AC bus sebesar 35%. Selain itu, sistem ini juga dilengkapi dengan metode deteksi serangan siber menggunakan algoritma <i>SAMME AdaBoost</i> , yang mampu mendeteksi serangan false data injection (FDI) dan denial-of-service (DoS) dengan skor akurasi F1 mencapai 95%, lebih baik	Penelitian ini menggunakan simulasi berbasis MATLAB/Simulink untuk menguji efektivitas kontroler SDM dan metode deteksi serangan siber pada empat sistem mikrogrid yang berbeda. Kontroler SDM menggunakan pengambilan sampel cepat dan mekanisme umpan balik untuk menjaga stabilitas tegangan dan mengurangi harmonisa. Sementara itu, metode deteksi serangan berbasis <i>SAMME AdaBoost</i> menawarkan keunggulan dalam masalah klasifikasi multi-kelas, dengan pembaruan bobot pengklasifikasi yang lebih cepat dan akurasi yang lebih tinggi. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan stabilitas daya mikrogrid

No	Penulis dan Tahun	Judul	Deskripsi Temuan	
			Sistem Energi Terbarukan	Fisika Komputasi
			dibandingkan metode ensemble tradisional.	tetapi juga memperkuat keamanan sibernya.
15	Hector Bastida, Ivan De la Cruz-Loredo, Pranaynil Saikia, dan Carlos E. Ugalde-Loo (2024)	Discrete-time State-of-Charge Estimator for Latent Heat Thermal Energy Storage Units Based on a Recurrent Neural Network [25]	Artikel ini mengembangkan pendekatan baru untuk memperkirakan <i>State-of-Charge</i> (SoC) pada unit penyimpanan energi termal berbasis panas laten (<i>Latent Heat Thermal Energy Storage</i> , LHTES) menggunakan <i>Recurrent Neural Network</i> (RNN) dengan struktur <i>Long Short-Term Memory</i> (LSTM). Sistem penyimpanan ini sangat berguna untuk menyeimbangkan pasokan dan permintaan energi, khususnya dalam integrasi energi terbarukan yang bersifat intermiten. Metode ini menawarkan peningkatan efisiensi komputasi yang signifikan dibandingkan pengamat non-linier diskrit tradisional. RNN berbasis LSTM memungkinkan pengambilan sampel fleksibel tanpa mengorbankan akurasi, dengan tingkat kesalahan kuadrat rata-rata (<i>Root Mean Square Error</i> , RMSE) di bawah 0,73% dan kesalahan absolut rata-rata (<i>Mean Absolute Error</i> , MAE) di bawah 0,41%.	Estimator SoC berbasis RNN ini dilatih menggunakan <i>MATLAB's Deep Learning Toolbox</i> dengan data simulasi dari model berbasis fisika. Metode ini menggunakan operasi matriks sederhana dibandingkan dengan persamaan diferensial non-linier pada pengamat tradisional, sehingga mengurangi beban komputasi secara drastis. Pengujian menunjukkan bahwa estimasi waktu komputasi turun dari 284 μs menjadi 12 μs , meningkatkan efisiensi hingga 24 kali lipat. Selain itu, interval pengambilan sampel dapat diperpanjang dari 0,5 detik menjadi 300 detik tanpa kehilangan akurasi, menunjukkan bahwa metode ini ideal untuk penerapan dalam pengelolaan energi termal yang memerlukan kontrol dinamis yang efisien dan ekonomis.

Pengembangan dan integrasi sistem energi terbarukan menghadirkan tantangan yang kompleks, mulai dari ketidakstabilan jaringan hingga pengelolaan daya yang kurang efisien [26]. Temuan dari artikel-artikel yang telah dianalisis menunjukkan bahwa pendekatan multidisiplin diperlukan untuk menjawab tantangan ini, terutama melalui optimasi teknologi, strategi pengelolaan daya, dan kontrol cerdas [27].

Pada aspek ketahanan dan stabilitas sistem, beberapa artikel seperti Artikel 1 [11] dan Artikel 4 [14] berfokus pada peningkatan

keandalan jaringan dalam menghadapi fluktuasi energi terbarukan, terutama dari angin dan surya. Skema tindakan remedial terdesentralisasi pada artikel 1 [11] menjadi solusi praktis untuk mengurangi beban jaringan berlebih, sementara metode *Extendable Latin Hypercube Importance Sampling* pada artikel 4 [14] menunjukkan keunggulan dalam mengevaluasi keandalan sistem secara efisien. Pendekatan ini menunjukkan bahwa ketahanan sistem tidak hanya bergantung pada manajemen beban, tetapi juga pada kemampuan untuk

mengevaluasi dan mengantisipasi risiko secara proaktif.

Dalam hal kontrol dan pengelolaan daya, Artikel 5 [15] dan Artikel 9 [19] memberikan wawasan tentang pentingnya desain kontrol yang adaptif. Kontrol prediktif berbasis teori pada Artikel 5 [15] menunjukkan keunggulan dalam mengatasi kompleksitas operasi generator berbasis angin, dengan efisiensi komputasi yang tinggi dan tingkat harmonik arus yang rendah. Di sisi lain, logika *fuzzy* berbasis aturan pada Artikel 9 [19] unggul dalam menghadapi ketidakpastian input, seperti fluktuasi daya PV dan beban jaringan. Hal ini menggarisbawahi bahwa kontrol berbasis kecerdasan buatan, seperti logika *fuzzy*, dapat melengkapi kontrol berbasis teori untuk menghasilkan solusi yang lebih robust dan fleksibel.

Optimasi sistem energi hibrid (HRES) juga menjadi tema utama dalam beberapa artikel, seperti Artikel 2 [12], Artikel 7 [17], dan Artikel 11 [21]. Metode optimasi berbasis algoritma evolusi, seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO) pada Artikel 2 [12], menawarkan efisiensi tinggi dalam menentukan konfigurasi optimal sistem hibrid, terutama dalam kondisi yang melibatkan ketidakpastian. Sementara itu, pendekatan SSDP dan *Ordinal Optimization* pada Artikel 7 [17] memberikan solusi untuk desain sistem yang lebih hemat biaya dalam skala besar. Logika *fuzzy* berbasis aturan Artikel 11 [21] menjadi tambahan penting dengan kemampuannya mengelola input yang tidak pasti, memberikan fleksibilitas yang sangat dibutuhkan dalam pengelolaan energi berbasis PV. Dengan menggabungkan metode optimasi ini, sistem HRES masa depan dapat mencapai keseimbangan antara efisiensi, biaya, dan fleksibilitas operasional.

Pada aspek stabilitas frekuensi dan dinamika sistem, Artikel 6 [16] dan Artikel 10 [20] menyoroti peran penting teknologi kontrol frekuensi dalam sistem daya dengan penetrasi tinggi energi terbarukan. Regulasi frekuensi cepat menggunakan inersia sintetis pada Artikel 6 [16] memberikan respons instan terhadap gangguan, sementara strategi berbasis teori permainan pada Artikel 10 [20] menawarkan pendekatan jangka panjang untuk mendistribusikan daya secara kooperatif di antara subsistem. Pendekatan-pendekatan ini menunjukkan bahwa stabilitas frekuensi

membutuhkan kombinasi solusi respons cepat dan strategi distribusi yang terencana.

Secara keseluruhan, artikel-artikel ini menunjukkan bahwa pengembangan sistem energi terbarukan yang andal dan efisien memerlukan integrasi dari berbagai pendekatan teknologi. Pendekatan yang memadukan pengelolaan daya berbasis kontrol cerdas, optimasi algoritma, dan strategi distribusi daya yang inovatif akan menjadi kunci untuk menjawab tantangan energi global di masa depan. Pendalaman lebih lanjut dalam integrasi teknologi ini akan menghasilkan sistem energi yang lebih stabil, hemat biaya, dan ramah lingkungan.

Beberapa artikel lainnya juga menunjukkan pendekatan inovatif dalam optimasi berbasis pembelajaran mesin, keamanan siber, dan pengelolaan energi termal. Penggabungan model fisik dengan algoritma pembelajaran mesin [23] memberikan fleksibilitas dan akurasi tinggi dalam pengelolaan daya dan ekonomi sistem energi multi-energi (MES). Keamanan siber dalam sistem BESS berbasis PV [24] diperkuat dengan kontroler *Sigma Delta Modulation* (SDM) dan algoritma *SAMME AdaBoost*, meningkatkan stabilitas daya dan keamanan operasional sistem. Selain itu, penggunaan *Recurrent Neural Network* (RNN) dalam estimasi *State-of-Charge* (SoC) [25] meningkatkan efisiensi komputasi hingga 24 kali lipat dan memungkinkan pengelolaan energi yang lebih dinamis dan ekonomis.

Secara keseluruhan, artikel-artikel ini menunjukkan bahwa pengembangan sistem energi terbarukan yang andal dan efisien membutuhkan integrasi berbagai pendekatan teknologi. Pendekatan yang menggabungkan manajemen daya berbasis kontrol cerdas, optimalisasi algoritme, dan strategi distribusi daya yang inovatif akan menjadi kunci untuk mengatasi tantangan energi global di masa depan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penerapan fisika komputasi dalam pengembangan sistem energi terbarukan memberikan kontribusi yang signifikan dalam mengatasi tantangan ketidakstabilan jaringan listrik, manajemen daya, dan optimalisasi

sumber energi. Simulasi berbasis perangkat keras, algoritma optimasi, serta kontrol berbasis kecerdasan buatan seperti logika fuzzy, kontrol prediktif, dan pembelajaran mesin terbukti mampu meningkatkan efisiensi, stabilitas, dan keamanan sistem energi hibrid. Selain itu, pendekatan interdisipliner seperti teori permainan, evaluasi keandalan berbasis simulasi probabilistik, dan kontroler cerdas berbasis Sigma Delta Modulation (SDM) menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan efisiensi operasional dan keamanan siber pada sistem energi terbarukan. Penggunaan *Recurrent Neural Network* (RNN) dalam pengelolaan energi termal juga memperlihatkan peningkatan efisiensi komputasi hingga 24 kali lipat, memberikan fleksibilitas dan akurasi tinggi dalam pengelolaan daya. Temuan-temuan ini menunjukkan pentingnya integrasi teknologi dalam mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan, hemat biaya, dan ramah lingkungan.

Saran

Penelitian di masa depan disarankan untuk memperluas implementasi fisika komputasi dalam sistem energi terbarukan dengan fokus pada beberapa aspek penting. Pertama, pengembangan metode simulasi dan kontrol yang lebih efisien serta adaptif terhadap kondisi lingkungan yang dinamis perlu menjadi prioritas utama. Selanjutnya, integrasi kecerdasan buatan dengan algoritma optimasi harus dilakukan untuk memaksimalkan efisiensi sistem energi dalam skala besar. Lebih lanjut, pengujian empiris terhadap teknologi dan metode yang diusulkan dalam skenario dunia nyata sangat diperlukan untuk memastikan kepraktisan dan keandalannya. Terakhir, penelitian lintas disiplin yang mencakup aspek sosial, ekonomi, dan kebijakan perlu dikembangkan untuk mendukung adopsi sistem energi terbarukan secara global.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Manahara S, Putri SK, W ISK. Tantangan transisi energi terbarukan di Indonesia. *J Innov Mater Energy, Sustain Eng* 2023;1:78–92. <https://doi.org/10.61511/jimese.v1i1.2023.259>.
- [2] Adedeji PA, Olatunji OO, Madushele N, Ajayeoba AO. Chapter 4 - Soft computing in renewable energy system modeling. *Des Anal Appl Renew Energy Syst* 2021;79–102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824555-2.00026-5>.
- [3] Kumar S, Amano RS. Approach to Solve Renewable Energy Problems. *Adv Energy Combust Saf Sustain* 2021;441–76.
- [4] Schaefer JL, Siluk JCM, Baierle IC, Nara EOB. A Scientometric Approach to Analyze Scientific Development on Renewable Energy Sources. *J Data Inf Sci* 2021;6:87–119. <https://doi.org/10.2478/jdis-2021-0009>.
- [5] Al-Othman A, Tawalbeh M, Martis R, Dhou S, Orhan M, Qasim M, et al. Artificial intelligence and numerical models in hybrid renewable energy systems with fuel cells: Advances and prospects. *Energy Convers Manag* 2022;253:115154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115154>.
- [6] Esther S, Singh SK, Goswami AK, Sinha N. Recent challenges in vehicle to grid integrated renewable energy system: a review. *2018 Second Int. Conf. Intell. Comput. Control Syst.*, 2018, p. 427–35.
- [7] Maulana FI, Adi PDP, Hari NH, Hamim M, Lestari D. Applications of artificial intelligence in renewable energy: a bibliometric analysis of the scientific production indexed in scopus. *E3S Web Conf* 2024;501. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450101016>.
- [8] Mercier-Laurent E, Kayakutlu G. Energy Future: Innovation Based on Time, Synergy and Innovation Factors. *Energy Manag. Comput. Intell. with Theory Appl.*, 2018, p. 545–54.
- [9] van Dinter R, Tekinerdogan B, Catal C. Automation of systematic literature reviews: A systematic literature review. *Inf Softw Technol* 2021;136. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2021.106589>.
- [10] Shamseer L, Moher D, Clarke M, Gherzi D, Liberati A, Petticrew M, et al.

- Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (prisma-p) 2015: Elaboration and explanation. *BMJ* 2015;349:1–25. <https://doi.org/10.1136/bmj.g7647>.
- [11] Tushar, Nie Z, Srivastava A, Basumallik S. Measuring and Enabling Transmission Systems Resiliency With Renewable Wind Energy Systems. *IEEE Trans Ind Appl* 2024;60:2321–31.
- [12] Batista NE, Carvalho PCM, Fernández-Ramírez LM, Braga APS. Optimizing methodologies of hybrid renewable energy systems powered reverse osmosis plants. *Renew Sustain Energy Rev* 2023;182:113377. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113377>.
- [13] Jin L, He Y, Zhang CK, Jiang L, Yao W, Wu M. Delay-dependent stability of load frequency control with adjustable computation accuracy and complexity. *Control Eng Pract* 2023;135:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105518>.
- [14] Cai J, Hao L, Xu Q, Zhang K. Reliability assessment of renewable energy integrated power systems with an extendable Latin hypercube importance sampling method. *Sustain Energy Technol Assessments* 2022;50:101792. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101792>.
- [15] Mossa MA, Gam O, Bianchi N. Dynamic Performance Enhancement of a Renewable Energy System for Grid Connection and Stand-Alone Operation with Battery Storage. *Energies* 2022;15:1–43. <https://doi.org/10.3390/en15031002>.
- [16] Gudimindla H, K MS, Sandhya S. Performance analysis of Grid Integrated Hybrid Renewable Energy System configuration application to Residential Buildings. 2021 Int. Conf. Syst. Comput. Autom. Netw., 2021, p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICSCAN53069.2021.9526500>.
- [17] Rapizza MR, Canevese SM. Fast frequency regulation and synthetic inertia in a power system with high penetration of renewable energy sources: Optimal design of the required quantities. *Sustain Energy, Grids Networks* 2020;24:100407. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100407>.
- [18] Engineering C. American University of Beirut Optimal Design of Hybrid Renewable Energy n.d.
- [19] Vlad C, Ceangă E, Barbu M, Vilanova R. Prediction techniques in control of energy micro-systems based on renewable sources. 2017 21st Int Conf Syst Theory, Control Comput ICSTCC 2017 2017:803–8. <https://doi.org/10.1109/ICSTCC.2017.8107135>.
- [20] Althubaiti M, Bernard M, Musilek P. Fuzzy logic controller for hybrid renewable energy system with multiple types of storage. *Can Conf Electr Comput Eng* 2017. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2017.7946738>.
- [21] Zuo Y, Li X. Game theory applied in system of renewable power generation with HVDC out-sending facilitated by hundred megawatts Battery Energy Storage Station. 2016 IEEE Symp. Ser. Comput. Intell., 2016, p. 1–5.
- [22] Hashmi N, Khan SA. Power energy management for a grid-connected PV system using rule-base fuzzy logic. *Proc - AIMS* 2015, 3rd Int Conf Artif Intell Model Simul 2016:31–6. <https://doi.org/10.1109/AIMS.2015.15>.
- [23] Ding X, Wang Y, Guo P, Sun W, Harrison GP, Lv X, et al. A novel physical and data-driven optimization methodology for designing a renewable energy, power to gas and solid oxide fuel cell system based on ensemble learning algorithm. *Energy* 2024;313. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134002>.
- [24] Saiara SA, Ali MH. Sigma Delta Modulation Controller and Associated Cybersecurity Issues with Battery Energy Storage Integrated with PV-Based Microgrid. *Energies* 2024;17:6463.
- [25] Bastida H, De la Cruz-Loredo I, Saikia P, Ugalde-Loo CE. Discrete-time state-of-charge estimator for latent heat thermal energy storage units based on a recurrent neural network. *Appl Energy*

- 2024;371:123526.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123526>.
- [26] Martinot E. Grid Integration of Renewable Energy: Flexibility, Innovation, and Experience. *Annu Rev Environ Resour* 2016;41:223–51. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085725>.
- [27] Amir N, Efendy M, Akhmad S, Wahyu FM, Firman Surya Putra R. Optimalisasi Penggunaan Energi Terbarukan untuk Desa Mandiri Energi dan Ramah Lingkungan. *Rekayasa* 2023;16:42–8. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v16i1.19119>.