

Studi literatur sistem penyimpanan energi berbasis baterai: jenis, kinerja dan aplikasinya di sistem energi terbarukan

Rifqi Dwi Kurniawan¹, Mulia Parlaungan Hsb¹, Reihan Akbar Sitompul¹

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Medan Estate, Medan, Sumatera Utara, Indonesia.

Penulis Korespondensi : (e-mail: rifqi.axf@gmail.com)

ABSTRAK

Sistem penyimpanan energi berbasis baterai (Battery Energy Storage Systems/BESS) merupakan komponen penting dalam mendukung transisi menuju sistem energi terbarukan yang andal dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji jenis-jenis teknologi baterai yang digunakan dalam penyimpanan energi, mengevaluasi performanya, serta menelaah aplikasinya dalam integrasi dengan sumber energi terbarukan. Metode yang digunakan adalah studi literatur sistematis terhadap berbagai publikasi ilmiah, buku referensi, dan laporan teknis dalam kurun waktu lima belas tahun terakhir. Hasil kajian menunjukkan bahwa baterai lithium-ion menjadi teknologi yang paling dominan karena memiliki efisiensi tinggi, densitas energi besar, dan respons operasional cepat. Selain itu, teknologi seperti flow battery, flywheel, dan pumped hydro energy storage (PHES) juga memiliki potensi besar dalam aplikasi berskala besar dan jangka panjang. Tantangan utama yang dihadapi antara lain adalah biaya investasi awal yang tinggi, degradasi performa seiring waktu, dan kebutuhan manajemen termal. Namun demikian, prospek pengembangan teknologi baterai generasi baru dan integrasinya dengan sistem cerdas seperti smart grid dan IoT menunjukkan arah positif bagi implementasi BESS di masa depan.

KATA KUNCI baterai ; penyimpanan energi ; energi terbarukan ; lithium-ion ; sistem hybrid.

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan kebutuhan energi global yang semakin meningkat, bersamaan dengan kekhawatiran akan dampak negatif terhadap lingkungan akibat penggunaan bahan bakar fosil, telah mendorong percepatan pengembangan sumber energi terbarukan [1]. Secara khusus, energi surya dan angin telah berkembang pesat sebagai alternatif utama dalam usaha mengurangi emisi karbon dan menciptakan sistem energi yang berkelanjutan [2]. Namun demikian, energi terbarukan memiliki karakteristik yang unik, yakni sifatnya yang intermiten dan sangat bergantung pada kondisi lingkungan serta cuaca, menyebabkan fluktuasi daya yang tidak terhindarkan dan tantangan dalam pengelolaan energi secara stabil dan kontinu [1].

Untuk mengatasi tantangan ini, salah satu solusi strategis yang banyak diadopsi adalah penerapan Sistem Penyimpanan Energi Berbasis Baterai (*Battery Energy Storage Systems*, BESS). Teknologi ini memungkinkan penyimpanan energi ketika produksi melebihi konsumsi, serta penggunaan energi yang tersimpan pada saat produksi energi dari sumber terbarukan menurun atau ketika permintaan energi meningkat [3]. Dalam perannya tersebut, BESS bertindak sebagai penyeimbang dan stabilisator dalam jaringan listrik,

memastikan keberlanjutan pasokan energi serta menjaga kestabilan sistem secara keseluruhan [1].

Dalam beberapa dekade terakhir, BESS telah mengalami perkembangan signifikan dari sisi teknologi maupun skala aplikasinya. Di antara berbagai jenis teknologi baterai yang tersedia, baterai lithium-ion telah menjadi pilihan paling populer di pasar penyimpanan energi karena keunggulannya seperti efisiensi tinggi, densitas energi yang besar, siklus hidup yang panjang, serta penurunan biaya produksi yang signifikan [1]. Meskipun begitu, penggunaan lithium-ion juga menghadapi tantangan tertentu seperti degradasi performa baterai seiring waktu, potensi risiko termal, serta kebutuhan akan sistem manajemen baterai (*Battery Management Systems*, BMS) yang canggih untuk menjaga kestabilan operasi baterai dan memperpanjang masa pakainya [1].

Selain lithium-ion, berbagai teknologi alternatif juga semakin mendapat perhatian, misalnya baterai alir (*flow batteries*), yang memiliki kelebihan dalam hal kapasitas besar serta umur panjang, meskipun efisiensinya masih relatif lebih rendah dibandingkan dengan lithium-ion [1]. Sementara itu, sistem penyimpanan energi mekanis seperti *flywheel energy storage systems* (FESS) menawarkan keunggulan dalam hal respons yang cepat

serta kemampuan untuk menangani fluktuasi daya secara signifikan, tetapi sistem ini memiliki kelemahan dalam tingginya laju *self-discharge* yang menyebabkan kehilangan energi jika disimpan dalam waktu lama [3].

Di sisi lain, teknologi mekanis *pumped hydro energy storage* (PHES) masih dianggap sebagai metode penyimpanan energi paling matang dan memiliki kapasitas penyimpanan yang sangat besar serta biaya operasi rendah dalam jangka panjang, meskipun memerlukan investasi awal yang cukup tinggi dan infrastruktur yang kompleks [4]. Kombinasi berbagai teknologi dalam bentuk sistem *hybrid*, seperti penggabungan baterai lithium-ion dengan superkapasitor atau *flywheel*, semakin dikembangkan untuk mengoptimalkan kelebihan masing-masing teknologi dan meningkatkan efisiensi penyimpanan serta kestabilan sistem secara keseluruhan [2].

Mengingat pentingnya peranan BESS dalam mendukung integrasi energi terbarukan, diperlukan kajian mendalam mengenai jenis-jenis teknologi baterai yang tersedia, evaluasi kinerja operasional masing-masing, serta analisis aplikasinya dalam berbagai konteks sistem energi terbarukan. Penelitian ini bertujuan untuk menjawab tantangan tersebut dengan melakukan tinjauan literatur komprehensif terhadap perkembangan terkini di bidang sistem penyimpanan energi berbasis baterai, khususnya untuk memperjelas potensi, peluang, serta hambatan dalam implementasinya di berbagai sektor energi terbarukan.

2. BAHAN DAN METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan metode studi literatur. Seluruh data yang dianalisis berasal dari sumber sekunder, berupa jurnal ilmiah nasional maupun internasional, buku referensi akademik, laporan teknis lembaga energi, serta prosiding konferensi yang relevan. Literatur yang digunakan dipilih dari publikasi dalam rentang waktu 2009 hingga 2024, dengan pertimbangan untuk menjangkau informasi yang mutakhir sekaligus mencakup perkembangan historis yang signifikan dalam *battery energy storage systems* (BESS).

Pengumpulan data dilakukan melalui pencarian literatur pada berbagai *database* akademik seperti *IEEE Xplore*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, dan *MDPI*. *Keyword* yang digunakan dalam proses pencarian meliputi: “*battery energy storage system*”, “*lithium-ion battery*”, “*flow battery*”, “*hybrid battery*”, serta “*renewable energy integration*”. Artikel yang ditemukan diseleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Kriteria inklusi meliputi kesesuaian topik dengan fokus penelitian, publikasi dalam bahasa Indonesia atau *English*, serta berasal dari sumber yang terverifikasi. Sementara itu, artikel yang bersifat non-ilmiah, tidak relevan dengan sistem penyimpanan energi, atau tidak menyajikan informasi yang lengkap, dikeluarkan dari analisis.

Analisis data dilakukan secara kualitatif melalui tahapan reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan. Reduksi data dilakukan dengan menyaring informasi yang relevan dari sumber-sumber yang telah dikumpulkan. Penyajian data dilakukan dalam bentuk

narasi deskriptif dan, bila diperlukan, dalam bentuk tabel atau diagram untuk memperjelas isi. Selanjutnya, penarikan kesimpulan dilakukan melalui sintesis terhadap temuan-temuan utama dalam literatur, untuk menjawab fokus kajian dan memberikan arahan terhadap penelitian selanjutnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Jenis Teknologi Baterai

Jenis-jenis teknologi baterai dalam sistem penyimpanan energi memiliki karakteristik yang berbeda-beda tergantung pada komposisi kimia, struktur penyimpanan, dan tujuan aplikasinya. Berdasarkan hasil studi literatur, terdapat lima teknologi utama yang sering digunakan dalam *battery energy storage systems* (BESS), yaitu *lithium-ion battery*, *flow battery*, *flywheel energy storage system*, *pumped hydro energy storage* (PHES), dan sistem *hybrid*.

Lithium-ion battery merupakan teknologi paling banyak digunakan karena memiliki keunggulan berupa efisiensi tinggi (90–95%), densitas energi besar, dan siklus hidup yang cukup panjang. Baterai ini sangat cocok untuk sistem energi terbarukan seperti *photovoltaic* (PV) dan turbin angin, serta kendaraan listrik karena ukurannya yang ringkas dan waktu respon yang cepat [1] [2].

Flow battery, khususnya jenis *vanadium redox*, menawarkan siklus hidup yang sangat panjang dan kapasitas penyimpanan besar. Teknologi ini memungkinkan pemisahan antara kapasitas daya dan energi, sehingga cocok untuk aplikasi jangka panjang. Meskipun efisiensinya lebih rendah dibandingkan *lithium-ion*, baterai ini unggul dalam hal keamanan dan stabilitas operasional [1].

Flywheel menyimpan energi dalam bentuk energi kinetik menggunakan cakram berputar. Sistem ini memiliki respon yang sangat cepat dan tidak mengalami degradasi kimia, membuatnya ideal untuk *frequency regulation* dan sistem yang memerlukan waktu tanggap dalam hitungan milidetik [3].

Pumped hydro energy storage (PHES) adalah bentuk penyimpanan energi mekanis yang telah lama digunakan dan memiliki efisiensi tinggi serta umur pakai panjang. Energi disimpan dalam bentuk air yang dipompa ke reservoir atas saat beban rendah, dan dilepaskan kembali ke turbin saat beban tinggi. Kelemahannya adalah kebutuhan lokasi geografis khusus dan infrastruktur yang besar [4] [5].

Terakhir, sistem *hybrid* merupakan gabungan dari dua atau lebih teknologi penyimpanan untuk mengoptimalkan performa dan efisiensi sistem. Misalnya, kombinasi antara *lithium-ion battery* dan *supercapacitor* dapat meningkatkan waktu respon sekaligus memperpanjang umur baterai utama [2].

Dengan beragam pilihan teknologi ini, pemilihan jenis baterai dalam sistem energi terbarukan perlu mempertimbangkan kebutuhan spesifik dari sisi teknis, ekonomi, dan geografis agar hasil yang dicapai optimal.

B. Parameter Evaluasi Kerja

Evaluasi terhadap kinerja *battery energy storage systems* (BESS) dilakukan dengan mengacu pada

sejumlah parameter teknis utama. Parameter ini digunakan untuk mengukur efektivitas dan efisiensi masing-masing teknologi baterai dalam berbagai konteks aplikasi, khususnya dalam mendukung sistem energi terbarukan. Lima parameter utama yang paling sering digunakan adalah efisiensi siklus (*round-trip efficiency*), densitas energi (*energy density*), siklus hidup (*cycle life*), waktu respon (*response time*), dan stabilitas termal (*thermal stability*).

Round-trip efficiency menunjukkan seberapa besar energi yang dapat dipulihkan dibandingkan dengan energi yang disimpan. *Lithium-ion battery* memiliki efisiensi tertinggi, mencapai 90–95% [1], sementara *flow battery* dan *PHES* memiliki efisiensi yang lebih rendah, berkisar antara 70–85% [4].

Energy density mengacu pada jumlah energi yang dapat disimpan per satuan massa atau volume. *Lithium-ion battery* unggul dalam hal ini dengan nilai lebih dari 200 Wh/kg, menjadikannya sangat cocok untuk aplikasi yang membutuhkan ruang kompak seperti kendaraan listrik dan sistem rumah tangga [1]. *Flow battery* dan *PHES* memiliki densitas energi lebih rendah karena memerlukan volume penyimpanan yang besar.

Cycle life menggambarkan seberapa banyak siklus pengisian dan pengosongan yang dapat dilakukan oleh baterai sebelum kapasitasnya menurun secara signifikan. *Flow battery* dan *PHES* memiliki *cycle life* yang sangat panjang, dapat mencapai lebih dari 10.000 siklus [4], sementara *lithium-ion* berkisar antara 2.000 hingga 8.000 siklus tergantung desain dan manajemen baterainya [2].

Response time menjadi krusial untuk aplikasi yang memerlukan kestabilan daya cepat, seperti *frequency regulation*. *Flywheel* dan *supercapacitor* mampu merespons dalam hitungan milidetik, sangat cocok untuk menjaga kestabilan sistem [3]. *Lithium-ion* sendiri memiliki waktu respon yang cepat dalam skala detik, sedangkan *PHES* jauh lebih lambat karena melibatkan proses mekanis.

Terakhir, *thermal stability* merupakan aspek penting untuk menjamin keamanan baterai. *Lithium-ion battery* rentan terhadap *thermal runaway*, terutama jika tidak dilengkapi dengan sistem manajemen termal yang canggih. Sebaliknya, *flow battery* dan *PHES* menunjukkan stabilitas termal yang baik karena tidak menghasilkan panas berlebih selama proses operasi [5].

Dari kelima parameter tersebut, dapat disimpulkan bahwa tidak ada satu teknologi yang unggul dalam semua aspek. Oleh karena itu, pemilihan teknologi baterai harus disesuaikan dengan kebutuhan sistem, baik dari sisi skala penyimpanan, frekuensi siklus, efisiensi energi, hingga kestabilan jangka panjang.

C. Aplikasi dalam Energi Terbarukan

Penggunaan *battery energy storage systems (BESS)* dalam sistem energi terbarukan semakin berkembang sebagai solusi atas sifat intermiten dari sumber energi seperti *photovoltaic (PV)* dan angin. Sistem ini memungkinkan penyimpanan energi saat produksi melebihi kebutuhan dan mendistribusikannya kembali saat pasokan dari sumber utama menurun, sehingga mendukung kestabilan dan keandalan sistem tenaga.

Dalam integrasi dengan pembangkit listrik tenaga surya (*solar photovoltaic*), *BESS* digunakan untuk menyimpan energi yang dihasilkan pada siang hari agar dapat dimanfaatkan pada malam hari atau saat cuaca mendung. Teknologi *lithium-ion battery* merupakan pilihan utama dalam aplikasi ini karena efisiensi tinggi dan kemampuan respon cepat terhadap fluktuasi beban [2].

Dalam pembangkit listrik tenaga angin, fluktuasi angin yang tak menentu menyebabkan ketidakteraturan output daya. Oleh karena itu, sistem *BESS*, khususnya kombinasi antara *lithium-ion battery* dan *flywheel*, digunakan untuk meredam ketidakteraturan tersebut dengan memberikan respon daya secara cepat [3]. *Flywheel energy storage systems* memiliki keunggulan dalam kecepatan respon dan keandalan jangka panjang untuk stabilisasi frekuensi.

Sistem *microgrid*, baik yang berdiri sendiri maupun yang terhubung ke jaringan utama, juga banyak memanfaatkan *BESS* untuk menjamin kontinuitas daya dan efisiensi distribusi energi. Teknologi seperti *flow battery* dan *PHES* lebih cocok untuk *microgrid* berskala besar karena mampu menyimpan energi dalam kapasitas besar dengan siklus hidup yang panjang [4] [1]. Di Indonesia sendiri, integrasi *BESS* dengan *microgrid* berbasis tenaga surya mulai diterapkan di kawasan terpencil, terutama untuk elektrifikasi wilayah 3T [6].

Selain itu, *BESS* mendukung pertumbuhan kendaraan listrik (*electric vehicles*) dan infrastruktur pengisian ulang. *Lithium-ion battery* menjadi pilihan utama dalam sistem penyimpanan energi kendaraan karena densitas energi tinggi dan ukuran yang kompak. Dalam konsep *vehicle-to-grid (V2G)*, kendaraan listrik bahkan dapat bertindak sebagai penyimpanan energi terdistribusi untuk mendukung stabilisasi beban pada jaringan listrik [1].

Penggunaan *BESS* juga dimanfaatkan dalam program *peak shaving*, yaitu mengurangi beban puncak dengan menyimpan energi saat permintaan rendah dan menggunakannya saat permintaan tinggi. Model ini membantu optimalisasi biaya operasional dan efisiensi sistem [5].

D. Tantangan dan Implementasi

Meskipun *battery energy storage systems (BESS)* menawarkan solusi signifikan dalam mendukung integrasi energi terbarukan, implementasinya masih menghadapi berbagai tantangan, baik dari sisi teknis, ekonomi, lingkungan, maupun regulasi.

Dari sisi teknis, salah satu kendala utama adalah degradasi performa baterai seiring waktu penggunaan. Misalnya, *lithium-ion battery* mengalami penurunan kapasitas akibat siklus pengisian dan pengosongan yang berulang, serta rentan terhadap risiko *thermal runaway* apabila tidak disertai sistem manajemen termal yang baik [1]. Selain itu, beberapa teknologi seperti *flow battery* dan *PHES* memerlukan infrastruktur fisik tambahan seperti tangki cairan dan reservoir, yang membatasi fleksibilitas penerapannya di area tertentu [1].

Dari sisi ekonomi, biaya investasi awal untuk penerapan *BESS* masih relatif tinggi, terutama pada

sistem *lithium-ion* dan sistem hibrida. Meskipun biaya produksi baterai menurun dalam beberapa tahun terakhir, biaya pemeliharaan, penggantian komponen, serta kebutuhan infrastruktur tambahan tetap menjadi hambatan [4]. Selain itu, skala ekonomi dan kebijakan subsidi masih belum merata di banyak negara berkembang.

Tantangan lingkungan juga menjadi perhatian serius. Proses produksi baterai memerlukan material seperti *lithium*, *kobalt*, dan *nikel*, yang penambangannya berdampak terhadap lingkungan dan sosial. Selain itu, limbah baterai bekas pakai sulit dikelola secara aman dan berkelanjutan jika tidak ada sistem daur ulang yang efisien [5].

Dari aspek regulasi, masih banyak negara yang belum memiliki kerangka hukum atau standar teknis yang mendukung penggunaan dan pengembangan BESS. Kebijakan insentif, mekanisme tarif, serta standar interkoneksi dengan jaringan utama masih belum optimal, sehingga menghambat adopsi teknologi ini secara lebih luas [1].

Dengan mengatasi tantangan-tantangan tersebut melalui inovasi teknologi, dukungan kebijakan yang progresif, serta sistem daur ulang dan pemeliharaan yang efisien, implementasi BESS di masa depan dapat menjadi lebih efektif dan berkelanjutan.

E. Prospek Pengembangan

Meskipun menghadapi berbagai tantangan teknis dan non-teknis, prospek pengembangan *battery energy storage systems (BESS)* sangat menjanjikan seiring meningkatnya kebutuhan akan energi bersih, stabil, dan berkelanjutan. Inovasi teknologi, dukungan kebijakan, serta integrasi dengan sistem energi pintar menjadi faktor kunci dalam mempercepat adopsi BESS di masa depan.

Dari sisi teknologi, penelitian dan pengembangan terus dilakukan untuk menciptakan generasi baru baterai yang memiliki efisiensi lebih tinggi, siklus hidup lebih panjang, dan tingkat keamanan yang lebih baik. Teknologi seperti *solid-state battery*, *sodium-ion*, dan *lithium-sulfur battery* sedang dikembangkan sebagai alternatif dari *lithium-ion* konvensional karena potensi biaya produksi yang lebih rendah dan kinerja yang lebih stabil [1].

Selain itu, integrasi BESS dengan sistem *smart grid* dan teknologi berbasis *Internet of Things (IoT)* membuka peluang efisiensi baru dalam pemantauan dan pengendalian energi secara real-time. Konsep ini memungkinkan pembacaan beban secara langsung, pengaturan daya otomatis, serta deteksi dini terhadap gangguan sistem. Pendekatan ini sejalan dengan visi pengembangan sistem kelistrikan masa depan yang terdesentralisasi dan otonom [7] [5].

Dari aspek kebijakan, banyak negara mulai mengembangkan regulasi dan insentif khusus untuk penyimpanan energi, termasuk dukungan terhadap proyek percontohan, pembebasan pajak, dan tarif khusus bagi pengguna sistem penyimpanan energi terbarukan. Hal ini menunjukkan pengakuan yang semakin luas terhadap peran strategis BESS dalam transisi menuju sistem energi rendah karbon [4].

Kesadaran global terhadap pentingnya keberlanjutan juga mendorong munculnya model ekonomi sirkular yang menekankan pada proses daur ulang baterai dan penggunaan material yang lebih ramah lingkungan. Upaya ini selaras dengan target *net zero emissions* dan pengurangan ketergantungan terhadap sumber daya tak terbarukan.

Dengan arah perkembangan teknologi yang progresif dan dukungan kebijakan yang semakin kuat, BESS diproyeksikan akan menjadi salah satu pilar utama dalam sistem energi masa depan yang cerdas, efisien, dan berkelanjutan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi literatur yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. *Battery energy storage systems (BESS)* berperan penting dalam menjaga stabilitas dan keandalan sistem energi terbarukan, khususnya yang bersifat intermiten seperti tenaga surya dan angin. BESS memungkinkan penyimpanan dan pelepasan energi secara fleksibel, sehingga mendukung efisiensi sistem secara keseluruhan.
2. Terdapat berbagai jenis teknologi baterai yang digunakan dalam sistem BESS, antara lain *lithium-ion battery*, *flow battery*, *flywheel*, *pumped hydro energy storage (PHES)*, dan sistem *hybrid*. Masing-masing memiliki karakteristik, keunggulan, dan keterbatasan tersendiri sesuai konteks aplikasinya.
3. Evaluasi kinerja baterai melibatkan parameter seperti efisiensi siklus, densitas energi, siklus hidup, waktu respon, dan stabilitas termal. Tidak ada satu teknologi yang unggul di semua aspek, sehingga pemilihan jenis baterai harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik sistem.
4. BESS telah banyak diterapkan dalam sistem pembangkit tenaga surya, angin, *microgrid*, kendaraan listrik (*electric vehicles*), dan manajemen beban seperti *peak shaving* dan *frequency regulation*.
5. Tantangan utama dalam implementasi BESS meliputi degradasi performa, biaya investasi awal yang tinggi, permasalahan lingkungan dalam produksi dan pembuangan baterai, serta belum meratanya dukungan regulasi di berbagai wilayah.
6. Perkembangan teknologi baterai generasi baru seperti *solid-state*, *sodium-ion*, dan *lithium-sulfur*, serta integrasi BESS dengan *smart grid* dan *Internet of Things (IoT)*, menunjukkan prospek yang sangat menjanjikan dalam mendukung transisi menuju sistem energi yang bersih, efisien, dan berkelanjutan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Zhang *dkk.*, "Review of Battery Energy Storage Systems: Advancements and Applications in Power Systems," *Energy Systems*.
- [2] A. S. Zulkarnaen, B. Winardi, dan B. Setiyono, "Desain Dan Simulasi Sistem Plts Dengan Penyimpanan Baterai Menggunakan Bidirectional Dc-Dc

- Converter Dengan Metode Proportional-Integral Di Sma Negeri 4 Semarang Menggunakan Matlab Simulink,” *Transient*, vol. 9, no. 4, hlm. 503–510, Des 2020.
- [3] N. N Z dan A. A A, “Flywheel Energy Storage Systems and their Applications: A Review,” *IJETT*, vol. 72, no. 4, hlm. 209–215, Apr 2024.
- [4] M. K. Domfeh, F. A. Diawuo, K. Akpoti, E. O. Antwi, dan A. T. Kabo-bah, “Lessons for pumped hydro energy storage systems uptake,” dalam *Pumped Hydro Energy Storage for Hybrid Systems*, Elsevier, 2023, hlm. 137–154.
- [5] B. M. Buchholz dan Z. Styczynski, *Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [6] Muhammad Rifaldi, N. R. Alham, N. Izzah, M. N. Ihsan, dan M. Sugianto, “Analisis Efisiensi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya sebagai Sumber Energi Baru Terbarukan,” *Retrotekin*, vol. 1, no. 1, hlm. 16–24, Jul 2023.
- [7] J. A. Momoh, *Smart grid: fundamentals of design and analysis*. dalam IEEE Press series on power engineering. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.