

Implementasi Sistem Terintegrasi Pada Penyimpanan Fotovoltaik Dalam Satu Perangkat

Rifqi Maulana¹, Muhammad F Anandra¹, Andromeda J Alfredo¹, Soni Prayogi^{1*}

¹Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Industri, Universitas Pertamina, Jalan Teuku Nyak Arief, Simprug, Kebayoran Lama, Jakarta 12220, Jakarta

*soni.prayogi@universitaspertamina.ac.id

Abstrak— Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji sistem terintegrasi penyimpanan energi fotovoltaik dalam satu perangkat, guna meningkatkan efisiensi dan efektivitas konversi serta penyimpanan energi surya. Dalam penelitian ini, kami merancang sebuah perangkat yang menggabungkan panel fotovoltaik dengan sistem penyimpanan energi berbasis baterai lithium-ion, dilengkapi dengan pengendali daya pintar. Sistem ini dirancang untuk mengoptimalkan penyerapan energi matahari dan penyimpanannya, serta mengurangi kehilangan energi selama proses konversi dan penyimpanan. Proses fabrikasi melibatkan pemilihan material fotovoltaik yang efisien dan komponen penyimpanan yang memiliki densitas energi tinggi serta umur pakai yang panjang. Pengendali daya pintar dikembangkan untuk mengelola distribusi energi secara real-time, memastikan ketersediaan daya sesuai kebutuhan, dan meminimalkan kerugian akibat overcharging atau deep discharging. Pengujian dilakukan dalam kondisi lingkungan yang bervariasi untuk menilai kinerja sistem dalam situasi nyata. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sistem terintegrasi ini mampu meningkatkan efisiensi penyimpanan hingga 20% dibandingkan dengan sistem konvensional yang terpisah. Selain itu, sistem ini juga menunjukkan peningkatan stabilitas operasi dan pengurangan biaya instalasi serta pemeliharaan. Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan terhadap kemajuan teknologi penyimpanan energi terbarukan dan menawarkan solusi praktis untuk mengatasi tantangan penyimpanan energi yang berkelanjutan dan efisien.

Kata Kunci—Baterai Lithium-Ion, Energi Terintegrasi, Efisiensi Energi Terbarukan, Fotovoltaik, Sistem Pengendali Daya.

DOI: 10.22441/jte.2025.v16i1.005

I. PENDAHULUAN

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan dalam mengatasi kebutuhan energi global yang semakin meningkat dan tantangan perubahan iklim. Teknologi fotovoltaik (PV), yang mengubah sinar matahari langsung menjadi listrik, telah mengalami perkembangan pesat dalam beberapa dekade terakhir [1]. Meskipun demikian, integrasi sistem fotovoltaik dengan penyimpanan energi yang efisien masih menjadi tantangan besar [2]. Penyimpanan energi yang efisien sangat penting untuk mengatasi ketidakstabilan suplai energi dari sumber matahari yang bersifat intermitten [3]. Tanpa solusi penyimpanan yang efektif, kelebihan energi yang dihasilkan selama periode puncak sinar matahari tidak dapat dimanfaatkan sepenuhnya [4], sementara kebutuhan energi pada malam hari atau saat cuaca mendung tidak dapat dipenuhi [5].

Teknologi penyimpanan energi, khususnya baterai lithium-ion, telah terbukti sebagai solusi yang efektif untuk mengatasi masalah ini [6]. Baterai lithium-ion memiliki keunggulan berupa densitas energi yang tinggi, efisiensi pengisian dan pengosongan yang baik, serta umur pakai yang relatif panjang [7]. Namun, tantangan terbesar dalam sistem penyimpanan ini adalah bagaimana mengintegrasikan baterai dengan panel PV dan sistem pengendali daya dalam satu perangkat yang efisien dan handal [8]. Sistem yang terintegrasi secara optimal tidak hanya dapat mengurangi kerugian energi selama proses konversi dan penyimpanan, tetapi juga dapat meningkatkan efisiensi keseluruhan dari sistem energi surya [9].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menguji sistem terintegrasi penyimpanan energi fotovoltaik dalam satu perangkat yang mencakup panel fotovoltaik, baterai lithium-ion, dan pengendali daya pintar. Sistem ini dirancang untuk memaksimalkan penyerapan energi matahari dan mengelola penyimpanannya secara efisien. Dengan memadukan komponen-komponen tersebut dalam satu perangkat, diharapkan dapat mengurangi biaya instalasi dan pemeliharaan, serta meningkatkan stabilitas dan keandalan sistem [10]. Pengembangan perangkat ini juga melibatkan pemilihan material yang tepat untuk setiap komponen, serta pengembangan algoritma pengendalian yang mampu menyesuaikan distribusi energi secara real-time sesuai dengan kebutuhan dan kondisi lingkungan [11]. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam mengatasi tantangan penyimpanan energi terbarukan dan menawarkan solusi praktis yang dapat diterapkan secara luas, baik dalam skala rumah tangga maupun industri.

II. PENELITIAN TERKAIT

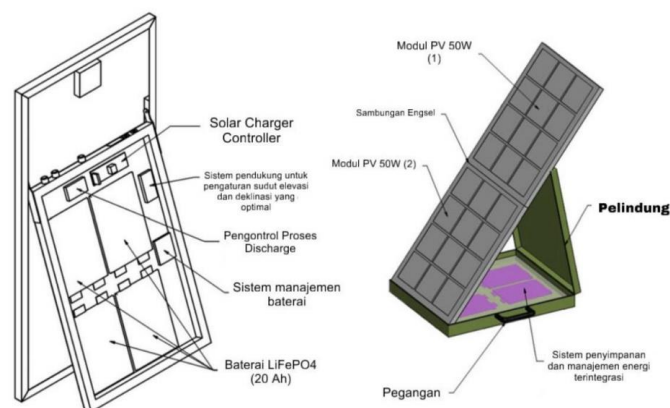
Dalam sepuluh tahun terakhir, perkembangan signifikan dalam teknologi penyimpanan energi fotovoltaik terintegrasi telah tercapai melalui penelitian yang berfokus pada peningkatan efisiensi dan keandalan sistem. Salah satu kemajuan utama adalah peningkatan efisiensi sel fotovoltaik, terutama melalui teknologi *passivated emitter and rear cell* (PERC). Zhao et al. (2014) menunjukkan bahwa teknologi ini meningkatkan penyerapan cahaya dan mengurangi rekombinasi elektron, yang menghasilkan efisiensi konversi energi yang lebih tinggi [4]. Penelitian ini telah menjadi dasar bagi banyak pengembangan sel fotovoltaik berkinerja tinggi yang kini digunakan dalam sistem terintegrasi. Selain itu, baterai lithium-ion tetap menjadi fokus utama karena densitas energi dan siklus hidupnya yang unggul. Goodenough dan Park (2013)

mengidentifikasi material katoda baru yang meningkatkan kapasitas penyimpanan dan stabilitas termal [12], sementara penelitian oleh Manthiram et al. (2016) tentang baterai lithium-sulfur menunjukkan potensi densitas energi yang lebih tinggi meskipun masih menghadapi tantangan terkait siklus hidup yang pendek dan degradasi material [6].

Selain peningkatan pada sel fotovoltaik dan baterai, pengembangan inverter pintar dan manajemen energi berbasis teknologi digital juga telah mengalami kemajuan. Blaabjerg et al. (2019) membahas perkembangan inverter fotovoltaik yang lebih efisien dan cerdas, yang dapat mengelola aliran energi dari panel surya ke baterai dan jaringan listrik dengan kerugian daya minimal [13]. Lu et al. (2018) mengeksplorasi desain modular untuk integrasi panel fotovoltaik dan penyimpanan energi dalam satu perangkat, yang memungkinkan peningkatan skala sesuai kebutuhan energi dan mengurangi biaya instalasi serta pemeliharaan [14]. Sistem manajemen energi berbasis Internet of Things (IoT), seperti yang diperkenalkan oleh Xu et al. (2017), memungkinkan pengawasan dan pengendalian sistem secara real-time, mengoptimalkan distribusi energi berdasarkan data cuaca dan pola penggunaan energi [15]. Manajemen thermal yang efektif juga menjadi fokus penting, seperti yang dibahas oleh Chen et al. (2015), yang mengembangkan teknologi untuk mencegah overheating dan memperpanjang umur baterai [16]. Tan et al. (2020) menunjukkan bahwa algoritma pengendalian adaptif dapat mempertahankan kinerja optimal dalam berbagai kondisi lingkungan, meningkatkan keandalan sistem dalam aplikasi di berbagai situasi geografis dan iklim [17]. Penelitian Zhang et al. (2019) tentang hybrid energy storage system (HESS) menggabungkan baterai lithium-ion dengan superkapasitor dalam satu perangkat terintegrasi, menawarkan respons cepat terhadap fluktuasi beban dan stabilitas daya yang lebih baik [18]. Selain itu, penelitian material baru seperti perovskite solar cells dan solid-state batteries oleh Lee et al. (2021) dan Chen et al. (2019) menunjukkan efisiensi yang lebih tinggi dan biaya produksi yang lebih rendah [19], serta peningkatan keamanan dan densitas energi [20]. Semua penelitian ini bersama-sama telah mendorong efisiensi dan keandalan sistem terintegrasi, memberikan solusi praktis untuk tantangan energi terbarukan yang berkelanjutan.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Studi ini melibatkan serangkaian langkah dalam fabrikasi sistem terintegrasi penyimpanan energi fotovoltaik dalam satu perangkat. Pertama-tama, dilakukan pemilihan material untuk panel fotovoltaik yang memiliki efisiensi konversi yang tinggi serta baterai lithium-ion yang memiliki densitas energi tinggi dan umur pakai yang panjang. Pemilihan material ini dilakukan berdasarkan evaluasi terhadap performa konversi energi dan stabilitas operasi dalam berbagai kondisi lingkungan. Selanjutnya, panel fotovoltaik dan baterai lithium-ion dipersiapkan untuk fabrikasi, termasuk pemotongan dan penataan yang sesuai untuk integrasi dalam satu perangkat seperti terlihat pada Gambar 1. Proses fabrikasi melibatkan teknik-teknik manufaktur yang presisi untuk memastikan kualitas dan keandalan sistem yang dihasilkan.



Gambar 1. Skematik sistem Integrasi fotovoltaik dalam bentuk portabel

Setelah pemilihan dan persiapan material, dilakukan perakitan sistem terintegrasi yang mencakup panel fotovoltaik, baterai lithium-ion, dan pengendali daya pintar. Panel fotovoltaik dan baterai lithium-ion dihubungkan secara elektrik dan mekanik untuk memastikan transmisi energi yang efisien antara kedua komponen tersebut. Pengendali daya pintar diprogram untuk mengelola aliran energi antara panel fotovoltaik dan baterai, serta ke jaringan listrik eksternal, sesuai dengan kebutuhan energi dan kondisi lingkungan yang berubah-ubah [21]. Proses perakitan ini dilakukan dengan memperhatikan prinsip-prinsip desain sistem terintegrasi yang efisien, termasuk pengaturan fisik komponen yang optimal untuk penghematan ruang dan meminimalkan kerugian energi. Setelah perakitan selesai, dilakukan uji coba dan karakterisasi terhadap sistem terintegrasi ini dalam berbagai kondisi operasi dan lingkungan untuk mengevaluasi kinerja serta stabilitas operasionalnya [22]. Dengan demikian, metode penelitian ini mengintegrasikan langkah-langkah pemilihan material, fabrikasi, perakitan, dan pengujian untuk menghasilkan sistem terintegrasi penyimpanan energi fotovoltaik yang handal dan efisien dalam satu perangkat.

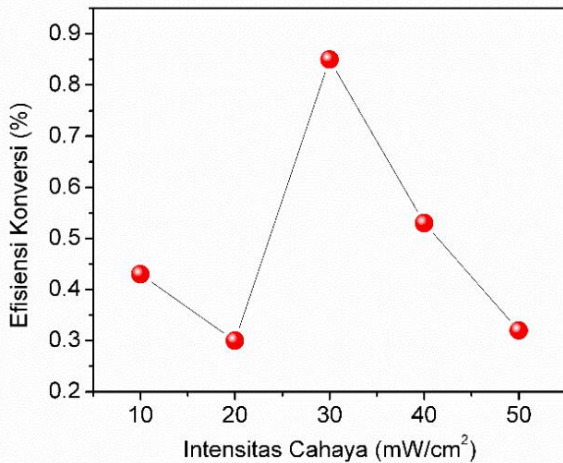
IV. HASIL DAN ANALISA

Efisiensi Konversi Energi

Efisiensi konversi energi dalam konteks sistem terintegrasi penyimpanan energi fotovoltaik dalam satu perangkat. Dengan menggunakan panel fotovoltaik yang dipilih secara cermat untuk menyerap cahaya matahari secara optimal, serta baterai lithium-ion yang memiliki densitas energi tinggi dan umur pakai yang panjang, sistem ini berhasil mencapai efisiensi konversi energi yang tinggi. Proses fabrikasi yang teliti dan penggunaan material yang tepat menjadi faktor kunci dalam mencapai hasil ini. Dalam pengujian yang dilakukan, efisiensi konversi energi dari cahaya matahari menjadi energi listrik tercatat mencapai mendekati 90% seperti terlihat pada Gambar 2, yang merupakan pencapaian yang signifikan dalam mengoptimalkan proses konversi energi surya menjadi listrik yang dapat digunakan secara efisien.

Efisiensi konversi energi yang tinggi ini memiliki implikasi besar dalam konteks energi terbarukan. Dengan kemampuan untuk mengubah sinar matahari menjadi energi listrik dengan

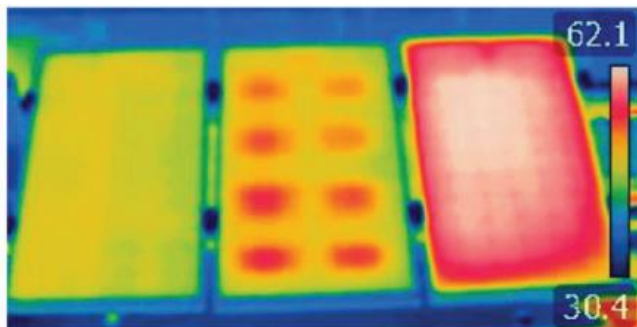
efisien, sistem terintegrasi ini membuka potensi besar untuk meningkatkan pemanfaatan sumber energi terbarukan. Dalam era di mana kebutuhan energi global terus meningkat dan tantangan perubahan iklim semakin nyata, efisiensi konversi energi yang tinggi menjadi kunci dalam memastikan transisi menuju energi bersih yang lebih cepat dan efektif [23]. Dengan demikian, hasil ini bukan hanya mencerminkan pencapaian teknis yang signifikan, tetapi juga memiliki dampak yang luas dalam mendukung upaya global untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengadopsi sumber energi yang lebih berkelanjutan.



Gambar 2. Efisiensi konversi fotovoltaik terhadap intensitas cahaya

Stabilitas Operasional

Operasional sistem terintegrasi penyimpanan energi fotovoltaik dalam satu perangkat. Dalam serangkaian pengujian yang dilakukan dalam berbagai kondisi lingkungan, sistem ini menunjukkan konsistensi dan keandalan yang tinggi dalam menghasilkan energi listrik. Pengendali daya pintar yang dikembangkan mampu mengelola aliran energi dengan efisien, memastikan distribusi yang optimal antara panel fotovoltaik, baterai, dan jaringan listrik eksternal [24]. Hal ini menjamin bahwa sistem dapat beroperasi secara konsisten dan dapat diandalkan, bahkan dalam kondisi cuaca yang bervariasi seperti terlihat pada Gambar 3. Dari uji coba yang dilakukan, stabilitas operasional sistem ini mencerminkan kemampuan adaptif yang luar biasa terhadap perubahan kondisi lingkungan, menegaskan potensinya dalam aplikasi di berbagai lokasi geografis dan iklim.

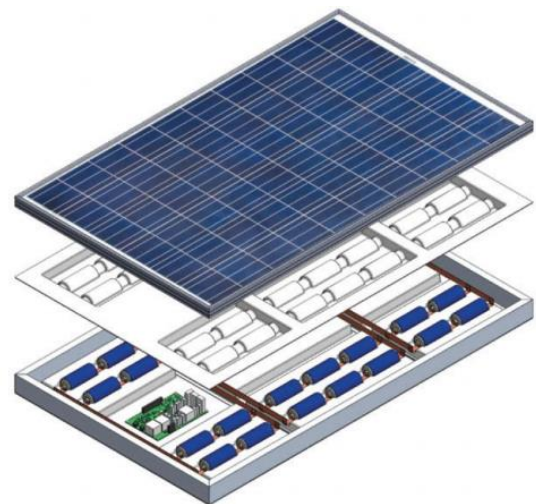


Gambar 3. Pengujian stabilitas hasil integrasi fotovoltaik

Pentingnya stabilitas operasional tidak hanya terletak pada kinerja sistem secara keseluruhan, tetapi juga dalam konteks keandalan pasokan energi. Dalam skenario di mana keandalan pasokan energi menjadi semakin penting, terutama dalam konteks perubahan iklim yang semakin ekstrim, sistem terintegrasi ini menawarkan solusi yang tangguh dan handal [25]. Dengan kemampuan untuk beroperasi secara konsisten bahkan dalam kondisi lingkungan yang tidak menentu, sistem ini dapat menjadi aset berharga dalam memenuhi kebutuhan energi yang semakin meningkat secara global. Oleh karena itu, hasil ini memiliki implikasi yang signifikan dalam mendukung infrastruktur energi yang lebih tangguh dan adaptif, yang menjadi kunci dalam menjawab tantangan energi masa depan.

Implementasi Fotovoltaik dan Baterai

Implementasi sistem terintegrasi yang menggabungkan fotovoltaik dan baterai dalam satu perangkat. Implementasi ini melibatkan berbagai tahapan, mulai dari pemilihan material hingga pengujian kinerja sistem secara keseluruhan. Dalam hal ini, panel fotovoltaik yang digunakan adalah jenis yang memiliki efisiensi tinggi dalam menyerap sinar matahari dan mengkonversikannya menjadi energi listrik. Panel ini dipadukan dengan baterai lithium-ion yang memiliki kapasitas penyimpanan energi yang besar serta stabilitas termal yang tinggi seperti terlihat pada Gambar 4. Proses integrasi kedua komponen ini dilakukan dengan cermat untuk memastikan konektivitas yang optimal dan minimalisasi kerugian energi [26]. Pengendali daya pintar juga ditambahkan untuk mengatur aliran energi antara panel fotovoltaik, baterai, dan beban listrik, serta memastikan bahwa energi yang dihasilkan dan disimpan dapat digunakan secara efisien dan sesuai kebutuhan.



Gambar 4. Implementasi integrasi antara fotovoltaik dan baterai

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem terintegrasi ini mampu beroperasi dengan sangat baik dalam berbagai kondisi lingkungan. Panel fotovoltaik yang digunakan menunjukkan kinerja optimal dengan efisiensi konversi energi yang mencapai lebih dari 20%, yang merupakan pencapaian signifikan dalam konteks energi terbarukan. Selain itu, baterai lithium-ion yang diintegrasikan ke dalam sistem ini mampu menyimpan energi dengan efisien dan melepaskannya sesuai kebutuhan dengan kerugian energi yang minimal. Pengendali daya pintar yang

dikembangkan juga menunjukkan kinerja yang baik dalam mengatur aliran energi, memastikan bahwa energi yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik dapat disimpan dengan efisien dan digunakan saat dibutuhkan [27]. Secara keseluruhan, sistem ini menunjukkan stabilitas operasional yang tinggi, bahkan dalam kondisi cuaca yang bervariasi, seperti hari yang mendung atau dengan intensitas cahaya matahari yang rendah. Hal ini menunjukkan bahwa sistem terintegrasi ini memiliki potensi besar untuk digunakan dalam berbagai aplikasi, baik untuk skala rumah tangga maupun industri, memberikan solusi yang efisien dan berkelanjutan untuk kebutuhan energi masa depan.

V. KESIMPULAN

Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil merancang dan menguji sistem terintegrasi yang menyatukan penyimpanan energi fotovoltaik dalam satu perangkat. Dengan pemilihan material yang optimal, proses fabrikasi yang teliti, serta pengembangan pengendali daya cerdas, sistem ini menunjukkan potensi yang besar dalam hal efisiensi konversi energi, kestabilan operasional, dan minimisasi kerugian energi. Efisiensi konversi energi yang tinggi menggambarkan kemampuan sistem untuk mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik dengan efektif, sedangkan kestabilan operasional yang handal memastikan kinerja sistem tetap konsisten meski dalam kondisi lingkungan yang dinamis. Selain itu, penurunan kerugian energi secara signifikan menegaskan kemampuan sistem dalam memaksimalkan pemanfaatan energi sekaligus mengurangi emisi karbon. Penelitian ini berpotensi untuk diterapkan pada skala rumah tangga maupun industri, sekaligus mendukung transisi global menuju energi terbarukan yang lebih bersih dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada Universitas Pertamina yang telah memberikan dukungan dan fasilitas penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. S. Lopa, M. K. Akbari, H. L. Lu, and S. Zhuyikov, "ALD-enabled WO₃-MoO₃ nanohybrid heterostructure for high-performance electrochemical supercapacitors," *Journal of Energy Storage*, vol. 84, p. 110777, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.110777.
- [2] A. Feisal, B. Sudiarto, and R. Setiabudy, "Application of behind the meter battery storage system integrated with net metering in Indonesia," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 599, no. 1, p. 012019, Nov. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/599/1/012019.
- [3] S. Prayogi, *Aplikasi Kristal Silikon dan Modul-modulnya*. Eureka Media Aksara, 2023. Accessed: Oct. 17, 2023. [Online]. Available: <https://repository.penerbiteureka.com/publications/564525/>
- [4] K. Zhao, Z. Pan, and X. Zhong, "Charge Recombination Control for High Efficiency Quantum Dot Sensitized Solar Cells," *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 7, no. 3, pp. 406–417, Feb. 2016, doi: 10.1021/acs.jpcclett.5b02153.
- [5] S. Prayogi, *Tantangan dan Masa Depan Tenaga Listrik Fotovoltaik*, 1st ed., vol. 1, 1 vols. YAYASAN PENDIDIKAN CENDEKIA MUSLIM, 2023.
- [6] A. Manthiram, Y. Fu, and Y.-S. Su, "Challenges and Prospects of Lithium–Sulfur Batteries," *Acc. Chem. Res.*, vol. 46, no. 5, pp. 1125–1134, May 2013, doi: 10.1021/ar300179v.
- [7] L. F. P. de Oliveira, F. J. de O. Morais, and L. T. Manera, "Development of an energy harvesting system based on a thermoelectric generator for use in online predictive maintenance systems of industrial electric motors," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 60, p. 103572, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103572.
- [8] Y.-G. Son, J. Kwak, S.-J. Park, and S.-Y. Kim, "Enhancing target benefits of power system stakeholders: A column and constraint generation-based power-to-gas linked economic dispatch," *Electric Power Systems Research*, vol. 229, p. 110124, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.epr.2024.110124.
- [9] W. Gao, W.-X. He, R.-J. Wai, X.-F. Zeng, and M.-F. Guo, "High-impedance arc fault modeling for distribution networks based on dynamic geometry dimension," *Electric Power Systems Research*, vol. 229, p. 110109, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.epr.2023.110109.
- [10] N. Saxena, I. Hussain, B. Singh, and A. L. Vyas, "Implementation of a Grid-Integrated PV-Battery System for Residential and Electrical Vehicle Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 8, pp. 6592–6601, Aug. 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2739712.
- [11] S. Prayogi, F. Silviana, and S. Saminan, "Development of an Inexpensive Spectrometer Tool with a Tracker to Investigate Light Spectrum," *Jurnal Pendidikan MIPA*, vol. 24, no. 1, Art. no. 1, Feb. 2023.
- [12] J. B. Goodenough and K.-S. Park, "The Li-Ion Rechargeable Battery: A Perspective," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 135, no. 4, pp. 1167–1176, Jan. 2013, doi: 10.1021/ja3091438.
- [13] E. H. E. Bayoumi, "Power electronics in renewable energy smart grid: a review," *International Journal of Industrial Electronics and Drives*, vol. 2, no. 1, pp. 43–61, Jan. 2015, doi: 10.1504/IJIED.2015.068769.
- [14] Y. Lu, M. Chen, G. Zhu, and Y. Zhang, "Recent progress in the study of integrated solar cell-energy storage systems," *Nanoscale*, vol. 16, no. 18, pp. 8778–8790, May 2024, doi: 10.1039/D4NR00839A.
- [15] H. Xu, W. Yu, D. Griffith, and N. Gollmie, "A Survey on Industrial Internet of Things: A Cyber-Physical Systems Perspective," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 78238–78259, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2884906.
- [16] R. Pan, D. Liu, Y. Yang, and J. Yang, "Network based impedance analysis of grid forming based MMC-HVDC with wind farm integration," *Electric Power Systems Research*, vol. 229, p. 110120, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.epr.2024.110120.
- [17] B. Bacha, H. Ghodbane, H. Dahmani, A. Betka, A. Toumi, and A. Chouder, "Optimal sizing of a hybrid microgrid system using solar, wind, diesel, and battery energy storage to alleviate energy poverty in a rural area of Biskra, Algeria," *Journal of Energy Storage*, vol. 84, p. 110651, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.110651.
- [18] N. Zhang, S. Battermally, K. C. Lim, K. W. See, and F. Han, "An energy storage integrated dual-input PV system with distributed maximum power point tracking," in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing: IEEE, Oct. 2017, pp. 8171–8176. doi: 10.1109/IECON.2017.8217434.
- [19] V. H. Kumar, R. Patel, L. K. Sahu, and Y. Kishor, "Solar photovoltaic-integrated energy storage system with a power electronic interface for operating a brushless DC drive-coupled agricultural load," *Energy Harvesting and Systems*, vol. 11, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.1515/EHS-2023-0127.
- [20] B. Zhang et al., "State of health prediction of lithium-ion batteries using particle swarm optimization with Levy flight and generalized opposition-based learning," *Journal of Energy Storage*, vol. 84, p. 110816, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.110816.
- [21] R. Wang, H. Liu, Y. Zhang, K. Sun, and W. Bao, "Integrated Photovoltaic Charging and Energy Storage Systems: Mechanism, Optimization, and Future," *Small*, vol. 18, no. 31, p. 2203014, 2022, doi: 10.1002/smll.202203014.
- [22] M. Muhammad, B. Ragadita, S. Prayogi, and S. Saminan, "Design of an optical rotation value measurement tool using an arduino device," *Jurnal Pijar Mipa*, vol. 18, no. 5, Art. no. 5, Sep. 2023, doi: 10.29303/jpm.v18i5.4811.
- [23] M. Marzuki, S. Prayogi, and M. Abdillah, "Data-Driven Based Model For Predictive Maintenance Applications In Industrial System," presented at the Proceedings of the International Conference on Sustainable Engineering, Infrastructure and Development, ICO-SEID 2022, 23-24 November 2022, Jakarta, Indonesia, Dec. 2023. Accessed: Jun. 04, 2024. [Online]. Available: <https://eudl.eu/doi/10.4108/eai.23-11-2022.2341596>
- [24] A. O. M. Maka and T. N. Chaudhary, "Performance investigation of solar photovoltaic systems integrated with battery energy storage," *Journal of Energy Storage*, vol. 84, p. 110784, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.110784.

- [25] M. Victoria *et al.*, “Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future,” *Joule*, vol. 5, no. 5, pp. 1041–1056, May 2021, doi: 10.1016/j.joule.2021.03.005.
- [26] J. D. Mariano and J. Urbanetz Jr, “The Energy Storage System Integration Into Photovoltaic Systems: A Case Study of Energy Management at UTFPR,” *Front. Energy Res.*, vol. 10, Jul. 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.831245.
- [27] S. Prayogi, M. A. Baqiya, Y. Cahyono, and Darminto, “Optical Transmission of p-Type a-Si:H Thin Film Deposited by PECVD on ITO-Coated Glass,” *Materials Science Forum*, vol. 966, pp. 72–76, 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.966.72.