



## Aplikasi Nanoteknologi pada Energi Terbarukan untuk Peningkatan Efisiensi Sistem Penyimpanan Energi

Agus Hariyanto<sup>1\*</sup>, Rosiana Romadon<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> STIE Dharma Putra Semarang

\*Penulis Korespondensi: [agusummabt@gmail.com](mailto:agusummabt@gmail.com)

**Abstract.** This research explores the role of nanotechnology in enhancing energy storage systems for renewable energy applications. The study aims to evaluate the potential of nanomaterials, including carbon nanotubes, graphene, and fullerenes, in improving the performance of energy storage devices, specifically batteries, by focusing on their ability to enhance energy conversion efficiency, storage capacity, and battery lifespan. A case study was conducted using a prototype battery incorporating these nanomaterials, connected to a photovoltaic system to simulate real-world energy production conditions. The methodology included testing key parameters, such as energy conversion efficiency, charging time, and battery degradation through multiple charge-discharge cycles. The findings showed a significant improvement in energy conversion efficiency, with the nanomaterial-based batteries outperforming conventional batteries by up to 20%. Additionally, the nanomaterial-based batteries demonstrated an increased storage capacity and longer cycle life, maintaining performance after hundreds of charge-discharge cycles. Nanomaterials contributed to these improvements by enhancing electrical conductivity, reducing internal resistance, and preventing degradation that typically occurs in conventional batteries during prolonged use. Furthermore, nanostructured coatings on the electrodes were found to improve light trapping and anti-reflection capabilities, which directly contributed to the higher efficiency of the battery. This research highlights the transformative potential of nanotechnology in energy storage systems, offering a promising solution to the intermittency challenges of renewable energy sources such as solar and wind. The study also suggests that further research is needed to explore other nanomaterials, scale up the technology for industrial applications, and integrate smart energy management systems to optimize energy storage in renewable energy systems.

**Keywords:** Battery Efficiency; Energy Storage; Graphene; Nanotechnology; Renewable Energy.

**Abstrak.** Penelitian ini mengeksplorasi peran nanoteknologi dalam meningkatkan sistem penyimpanan energi untuk aplikasi energi terbarukan. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi nanomaterial, termasuk karbon nanotube, grafena, dan fullerena, dalam meningkatkan kinerja perangkat penyimpanan energi, khususnya baterai, dengan berfokus pada kemampuannya untuk meningkatkan efisiensi konversi energi, kapasitas penyimpanan, dan masa pakai baterai. Sebuah studi kasus dilakukan menggunakan prototipe baterai yang menggabungkan nanomaterial ini, yang terhubung ke sistem fotovoltaik untuk mensimulasikan kondisi produksi energi di dunia nyata. Metodologi yang digunakan mencakup pengujian parameter kunci, seperti efisiensi konversi energi, waktu pengisian daya, dan degradasi baterai melalui beberapa siklus pengisian-pengosongan daya. Temuan menunjukkan peningkatan signifikan dalam efisiensi konversi energi, dengan baterai berbasis nanomaterial mengungguli baterai konvensional hingga 20%. Selain itu, baterai berbasis nanomaterial menunjukkan peningkatan kapasitas penyimpanan dan masa pakai siklus yang lebih lama, mempertahankan kinerjanya setelah ratusan siklus pengisian-pengosongan daya. Nanomaterial berkontribusi pada peningkatan ini dengan meningkatkan konduktivitas listrik, mengurangi resistansi internal, dan mencegah degradasi yang biasanya terjadi pada baterai konvensional selama penggunaan jangka panjang. Lebih lanjut, lapisan nanostruktur pada elektroda terbukti meningkatkan kemampuan menangkap cahaya dan anti-pantulan, yang secara langsung berkontribusi pada peningkatan efisiensi baterai. Penelitian ini menyoroti potensi transformatif nanoteknologi dalam sistem penyimpanan energi, menawarkan solusi yang menjanjikan untuk tantangan intermittensi sumber energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin. Studi ini juga menunjukkan bahwa penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi nanomaterial lain, meningkatkan skala teknologi untuk aplikasi industri, dan mengintegrasikan sistem manajemen energi cerdas untuk mengoptimalkan penyimpanan energi dalam sistem energi terbarukan.

**Kata kunci:** Baterai; Efisiensi Energi; Energi Terbarukan; Graphene; Nanoteknologi.

### 1. LATAR BELAKANG

Energi terbarukan telah menjadi fokus utama dalam upaya global untuk mengurangi emisi karbon dan mengatasi perubahan iklim. Sumber energi seperti tenaga surya dan angin

menawarkan solusi yang bersih dan berkelanjutan, namun kedua sumber ini memiliki tantangan signifikan terkait dengan sifatnya yang tidak stabil dan ketergantungannya pada kondisi cuaca. Penurunan efisiensi energi terbarukan menjadi masalah utama dalam penyediaan energi yang berkelanjutan (Thokar et al., 2021). Sebagai contoh, energi surya hanya dapat diproduksi saat kondisi cuaca mendukung, dan energi angin tergantung pada kecepatan angin, yang berarti bahwa ketergantungan pada sumber energi ini memerlukan solusi penyimpanan yang efisien dan andal.

Salah satu tantangan utama dalam memaksimalkan potensi energi terbarukan adalah keterbatasan dalam teknologi penyimpanan energi. Penyimpanan energi sangat penting untuk menyeimbangkan pasokan dan permintaan energi, terutama karena produksi energi terbarukan tidak selalu sejalan dengan kebutuhan energi. Sebagai contoh, sistem penyimpanan udara cair (LAES) telah menunjukkan potensi besar dalam menyimpan energi, namun masih menghadapi tantangan dalam hal efisiensi putaran rendah dan performa ekonomi yang buruk. Selain itu, sistem penyimpanan baterai (BESS) juga memiliki keterbatasan seperti siklus hidup yang pendek dan biaya yang tinggi, yang menghalangi penggunaan secara luas dalam skala besar (Najjar & Abubaker, 2016). Masalah-masalah ini menunjukkan pentingnya inovasi dalam sistem penyimpanan energi untuk mendukung transisi energi terbarukan.

Efisiensi operasional dari sistem penyimpanan energi yang ada saat ini masih rendah, yang mengakibatkan pemanfaatan yang tidak optimal dan biaya yang tinggi. Misalnya, teknologi penyimpanan energi berbasis udara cair menunjukkan potensi besar, tetapi masih menghadapi tantangan dalam efisiensi konversi energi yang rendah dan biaya operasional yang tinggi (Spataru, Kok, & Barrett, 2014). Salah satu solusi potensial untuk mengatasi tantangan ini adalah pengembangan teknologi baru yang lebih efisien, seperti baterai Carnot dan sistem penyimpanan gravitasi padat, yang menunjukkan janji dalam meningkatkan efisiensi dan mengatasi beberapa keterbatasan dari teknologi yang ada.

Meningkatkan efisiensi sistem penyimpanan energi sangat penting untuk memaksimalkan potensi energi terbarukan. Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan adalah mengembangkan teknologi baru yang lebih efisien, serta menggunakan pendekatan hibrida yang menggabungkan berbagai teknologi penyimpanan untuk meningkatkan kinerja keseluruhan. Sebagai contoh, kombinasi antara baterai dan sistem penyimpanan hidrogen dapat mengoptimalkan penggunaan energi terbarukan dengan memanfaatkan keunggulan masing-masing teknologi (Thokar et al., 2021). Selain itu, optimalisasi penempatan dan ukuran sistem penyimpanan juga sangat penting untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi dan mengurangi biaya (Spataru et al., 2014).

Seiring dengan meningkatnya permintaan global akan solusi penyimpanan energi yang efisien dan berkelanjutan, kemajuan signifikan dalam nanoteknologi telah muncul sebagai pendekatan yang menjanjikan untuk mengatasi tantangan penyimpanan energi. Nanoteknologi, yang melibatkan manipulasi bahan pada skala nano, menawarkan sifat unik seperti luas permukaan yang ditingkatkan, peningkatan konduktivitas, dan kinerja elektrokimia yang lebih baik (Naoi, Ishimoto, Miyamoto, & Naoi, 2012). Sifat-sifat ini sangat penting untuk pengembangan perangkat penyimpanan energi berkinerja tinggi, terutama dalam teknologi baterai. Meningkatnya minat pada nanomaterial telah mendorong eksplorasi perannya dalam meningkatkan efisiensi konversi energi dalam sistem penyimpanan energi, secara khusus berfokus pada penggunaannya dalam prototipe baterai.

Nanoteknologi memainkan peran penting dalam meningkatkan kinerja elektroda baterai. Bahan seperti tabung nano karbon, graphene, dan oksida logam telah banyak digunakan untuk meningkatkan kepadatan energi, siklus pengisian-pelepasan, dan kapasitas keseluruhan baterai (Naoi et al., 2012). Bahan nano ini memberikan konduktivitas dan daya tahan listrik yang lebih tinggi, menjadikannya penting untuk penyimpanan energi yang efisien. Misalnya, penggabungan graphene ke dalam elektroda baterai telah menyebabkan peningkatan yang signifikan dalam kinerja baterai lithium-ion (LIB), jenis baterai isi ulang yang banyak digunakan. Selain itu, nanomaterial meningkatkan sifat mekanik dan stabilitas elektroda baterai, memungkinkannya bertahan lebih banyak siklus pengisian-pengosongan, sehingga meningkatkan masa pakai baterai (Rahman et al., 2021).

Di luar elektroda, nanoteknologi juga meningkatkan komponen baterai lainnya, seperti elektrolit dan pemisah. Bahan berstruktur nano sedang dikembangkan untuk mengatasi tantangan seperti reaksi samping antarmuka, yang dapat menurunkan kinerja elektrolit dan pemisah (Vickram, 2023). Kemajuan ini berkontribusi pada kinerja, stabilitas, dan efisiensi sistem baterai secara keseluruhan. Dengan meningkatkan komponen-komponen ini, nanoteknologi membantu memperpanjang masa operasional sistem penyimpanan energi, yang sangat penting untuk aplikasi skala besar, seperti kendaraan listrik dan penyimpanan energi terbarukan.

Pembuatan nanomaterial untuk aplikasi penyimpanan energi menggunakan berbagai metode, seperti pendekatan top-down seperti ball milling dan teknik bottom-up seperti pengendapan uap kimia. Metode ini sangat penting untuk menghasilkan nanomaterial berkualitas tinggi yang dapat diskalakan untuk aplikasi komersial. Para peneliti terus menyempurnakan teknik ini untuk meningkatkan kualitas dan skalabilitas nanomaterial, yang

bertujuan untuk mengurangi biaya produksi sambil mempertahankan kinerja tinggi (Rahman et al., 2021).

Manfaat potensial nanoteknologi terbukti dalam berbagai perangkat penyimpanan energi, terutama pada baterai lithium-ion (LIB) dan superkapasitor. LIB telah mendapat manfaat signifikan dari nanoteknologi, dengan peningkatan kepadatan energi, siklus hidup, dan keamanan (Naoui et al., 2012). Selain itu, nanomaterial juga digunakan dalam superkapasitor, yang membutuhkan kapasitansi tinggi dan siklus yang stabil. Luas permukaan yang besar dan sifat unik nanomaterial memungkinkan superkapasitor mencapai penyimpanan energi yang efisien dan siklus pengisian-pengosongan yang cepat, sehingga cocok untuk aplikasi yang menuntut kepadatan daya tinggi (Vickram, 2023).

Ke depan, tren yang muncul dalam nanoteknologi termasuk pengembangan baterai solid-state dan integrasi nanomaterial dengan kecerdasan buatan untuk sistem penyimpanan energi yang dioptimalkan. Kemajuan ini menjanjikan untuk menciptakan solusi penyimpanan energi yang lebih efisien, terukur, dan ramah lingkungan. Namun, tantangan terkait skalabilitas dan efektivitas biaya tetap ada, terutama dalam produksi nanomaterial (Rahman et al., 2021). Penelitian sedang berlangsung untuk mengembangkan metode sintesis yang lebih efisien dan mengurangi biaya yang terkait dengan produksi nanomaterial, yang akan menjadi kunci untuk membuat teknologi ini layak secara komersial dalam skala besar.

Selain itu, dampak lingkungan dari nanomaterial, termasuk pembuangan dan daur ulangnya, merupakan pertimbangan penting. Karena nanoteknologi terus diintegrasikan ke dalam sistem penyimpanan energi, teknik analisis termal canggih dan strategi remediasi lingkungan sedang dieksplorasi untuk mengurangi jejak ekologis baterai yang ditingkatkan ini (Naoui et al., 2012). Ini memastikan bahwa meskipun nanoteknologi sangat menjanjikan, integrasinya ke dalam sistem penyimpanan energi perlu disertai dengan praktik pengelolaan lingkungan yang bertanggung jawab.

## **2. KAJIAN TEORITIS**

### **Konsep Dasar Energi Terbarukan dan Penyimpanan Energi**

Energi terbarukan diperoleh dari proses alam yang dapat diperbaharui secara terus-menerus. Beberapa jenis energi terbarukan yang umum digunakan antara lain adalah energi surya, energi angin, biomassa, dan tenaga air. Energi surya memanfaatkan sel fotovoltaik untuk mengubah sinar matahari menjadi listrik secara langsung. Energi ini sangat melimpah dan berkelanjutan, menjadikannya salah satu pemain utama dalam lanskap energi terbarukan (Ma et al., 2019). Di sisi lain, energi angin memanfaatkan kekuatan angin melalui turbin untuk

menghasilkan listrik, dan sering digunakan bersamaan dengan energi surya dalam sistem hibrida untuk meningkatkan kestabilan pasokan energi (Roy, He, Zhao, & Singh, 2022).

Energi biomassa menggunakan bahan organik untuk menghasilkan energi, yang mencakup bahan tanaman dan limbah hewan yang diubah menjadi biofuel. Biomassa berperan penting dalam memanfaatkan sumber daya lokal untuk memenuhi kebutuhan energi, dan sering digunakan di daerah yang tidak terjangkau oleh jaringan listrik (Javed et al., 2021). Tenaga air, yang menggunakan energi dari aliran air untuk menghasilkan listrik, merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang paling tua dan telah lama terbukti keberhasilannya dalam menyediakan energi secara efisien.

Penyimpanan energi sangat penting untuk mengelola ketidakteraturan sumber energi terbarukan dan memastikan pasokan energi yang stabil. Beberapa teknologi penyimpanan yang digunakan meliputi baterai, penyimpanan hidro pompaan (PHS), penyimpanan energi udara terkompresi (CAES), flywheels, penyimpanan termal, dan penyimpanan hidrogen. Baterai lithium-ion merupakan perangkat penyimpanan energi yang paling banyak digunakan karena efisiensinya yang tinggi dan densitas energinya yang besar. Selain itu, alternatif yang sedang berkembang seperti baterai solid-state dan baterai natrium-ion menawarkan perbaikan dalam hal biaya, keamanan, dan keberlanjutan (Khamkar et al., 2023). Penyimpanan hidro pompaan memanfaatkan energi potensial gravitasi dengan memompa air ke ketinggian yang lebih tinggi pada saat permintaan rendah dan melepaskannya untuk menghasilkan listrik saat permintaan tinggi (Foley & Díaz Lobera, 2013). Penyimpanan energi udara terkompresi menyimpan energi dengan cara mengompresi udara dan melepaskannya untuk menggerakkan turbin saat diperlukan (Ofak, Zupan, & Plavsic, 2019).

Flywheels menyimpan energi dalam bentuk energi kinetik rotasi dan dikenal karena densitas daya yang tinggi serta waktu respons yang cepat, yang menjadikannya sangat efektif untuk aplikasi yang memerlukan pengisian dan pelepasan energi yang cepat (Manthathi, Punna, & Arunkumar, 2022). Penyimpanan termal menyimpan energi dalam bentuk panas yang kemudian dapat digunakan untuk menghasilkan listrik atau memberikan pemanasan (Tantau & Fratila, 2019). Penyimpanan hidrogen mengubah listrik yang berlebih menjadi hidrogen melalui elektrolisis, yang kemudian dapat disimpan dan digunakan kembali dalam sel bahan bakar untuk menghasilkan listrik.

Sistem Energi Terbarukan Hibrida (HRES) menggabungkan beberapa sumber energi terbarukan, seperti energi surya dan angin, dengan sistem penyimpanan energi untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan. Sistem ini dapat mengurangi variabilitas masing-masing sumber energi terbarukan dan memberikan pasokan energi yang lebih stabil. HRES

sering menggunakan strategi kontrol canggih dan algoritma optimisasi untuk mengelola integrasi dan operasi berbagai sumber energi dan teknologi penyimpanan (Roy et al., 2022). Penggunaan sistem hibrida ini semakin meningkat, terutama dalam aplikasi di pulau-pulau terpencil dan daerah dengan sumber daya energi terbarukan yang terbatas.

Beberapa tantangan utama dalam penerapan energi terbarukan dan penyimpanan energi adalah ketidakteraturan (intermittency) sumber energi terbarukan seperti energi surya dan angin yang memerlukan solusi penyimpanan energi yang kokoh untuk memastikan pasokan energi yang konsisten (Ma et al., 2019). Selain itu, meskipun teknologi penyimpanan energi seperti baterai lithium-ion sangat efektif, riset terus dilakukan untuk mengembangkan solusi penyimpanan yang lebih hemat biaya dan efisien (Javed et al., 2021). Integrasi energi terbarukan dan sistem penyimpanan ke dalam infrastruktur jaringan yang ada juga menjadi tantangan, termasuk pengaturan tegangan, kontrol frekuensi, dan penyeimbangan beban (Ofak et al., 2019).

### **Nanoteknologi dalam Energi Terbarukan**

Nanoteknologi telah muncul sebagai kekuatan transformasional di sektor energi terbarukan, menawarkan solusi inovatif yang dapat meningkatkan produksi energi, penyimpanan, dan efisiensi. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa nanoteknologi memiliki potensi besar untuk meningkatkan berbagai aspek teknologi energi terbarukan, dari sistem fotovoltaik hingga biofuel dan energi angin. Artikel ini akan mengulas temuan-temuan terbaru yang menggambarkan peran nanoteknologi dalam mempercepat pengembangan teknologi energi terbarukan dan meningkatkan efisiensinya.

Nanoteknologi telah memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan kinerja berbagai sistem energi terbarukan. Dalam energi surya, nanoteknologi seperti titik kuantum, nanotube karbon, dan fullerene digunakan untuk meningkatkan efisiensi sel surya dengan meningkatkan penyerapan cahaya, pemisahan muatan, dan transportasi elektron. Selain itu, pelapisan nanostruktur pada sel surya juga membantu meningkatkan kemampuan penjebakan cahaya dan kemampuan anti-refleksi, yang meningkatkan efisiensi konversi energi dari sinar matahari menjadi listrik. Nanoteknologi juga berperan dalam produksi hidrogen melalui fotoelektrokimia dan fotokatalisis, yang meningkatkan efisiensi proses ini secara signifikan (Ahmadi et al., 2019; Mao, Shen, & Guo, 2012). Dalam sektor energi hidrogen, nanomaterial memungkinkan pengembangan sistem penyimpanan hidrogen berbasis padat yang lebih efisien dan kompak dibandingkan dengan metode tradisional. Nanopartikel juga digunakan sebagai katalis dalam sel bahan bakar, meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya produksi (Mao et al., 2012; Hussein, 2015).

Nanoteknologi juga memainkan peran penting dalam meningkatkan kinerja sistem penyimpanan energi, seperti baterai dan superkapasitor. Dengan memperbaiki bahan yang digunakan untuk elektroda dan elektrolit, nanoteknologi meningkatkan kepadatan daya, kemampuan pengisian yang lebih cepat, dan stabilitas siklus yang lebih baik, yang sangat penting dalam aplikasi penyimpanan energi terbarukan (Tyagi, Kumar, & Said, 2022). Nanofluida dan material perubahan fase yang diperkuat nano (NEPCM) digunakan dalam sistem fotovoltaik/termal (PV/T) untuk meningkatkan konduktivitas termal dan retensi energi, yang memungkinkan penggunaan energi surya secara lebih optimal (Ahmed, Nourafkan, & Booth, 2021). Nanoteknologi juga berperan dalam peningkatan efisiensi produksi biofuel, termasuk biogas, biohidrogen, biodiesel, dan bioetanol, dengan menggunakan nanopartikel dan nanokatalisator yang meningkatkan hasil biofuel secara signifikan (Thulasingh, 2021). Dalam energi geothermal, nanoteknologi meningkatkan efisiensi sistem dengan memperbaiki konstruksi sumur dan mencegah korosi, yang memperpanjang umur pembangkit listrik geothermal (Hussein, 2015). Dalam sektor energi angin dan hidro, nanomaterial digunakan untuk mengembangkan material yang lebih ringan dan lebih tahan lama untuk turbin angin, serta nanofluida yang berpotensi menjadi agen pelumas untuk meningkatkan efisiensi sistem tenaga angin dan hidro (Mao et al., 2007).

Meskipun nanoteknologi memiliki potensi besar dalam memajukan teknologi energi terbarukan, beberapa tantangan masih perlu diatasi. Salah satu tantangan utama adalah skala produksi. Beralih dari inovasi skala laboratorium ke aplikasi skala industri memerlukan pemecahan hambatan teknis dan ekonomi yang signifikan (Ahmadi et al., 2019). Selain itu, dampak lingkungan dan ekonomi jangka panjang dari nanomaterial perlu dievaluasi secara menyeluruh untuk memastikan bahwa pengembangan nanoteknologi dalam energi terbarukan dapat berkontribusi pada pembangunan yang berkelanjutan.

### **Keterbatasan Sistem Penyimpanan Energi Saat Ini dan Kebutuhan Teknologi Baru**

Salah satu masalah utama dalam sistem penyimpanan energi konvensional adalah ketergantungan pada sumber energi terbarukan yang tidak stabil, seperti energi angin dan surya. Energi terbarukan ini bersifat intermiten dan sangat bergantung pada kondisi cuaca, yang menyebabkan fluktuasi dalam produksi energi. Fluktuasi ini memperburuk stabilitas jaringan listrik dan mempercepat degradasi baterai yang digunakan untuk menyimpan energi, sehingga menambah tantangan dalam menjaga kestabilan pasokan energi. Selain itu, ketidakmampuan sistem penyimpanan energi yang ada untuk menyerap energi berlebih dan mengkompensasi kekurangan energi secara efektif semakin memperburuk masalah ini (Zakeri & Syri, 2015).

Teknologi penyimpanan energi yang ada saat ini, seperti baterai timbal-asam, flywheel, superkapasitor, dan penyimpanan udara terkompresi (CAES), memiliki keterbatasan yang signifikan. Baterai timbal-asam, meskipun digunakan secara luas, memiliki kapasitas penyimpanan yang terbatas dan umur siklus pengisian yang pendek. Flywheel dan superkapasitor menawarkan efisiensi daya yang baik serta waktu pengisian yang cepat, namun mereka memiliki keterbatasan dalam kapasitas penyimpanan energi jangka panjang. Selain itu, sistem penyimpanan energi yang lebih besar seperti CAES menghadapi tantangan dalam hal efisiensi dan biaya instalasi yang tinggi. Biaya tinggi untuk instalasi dan pemeliharaan sistem penyimpanan energi skala besar menjadi hambatan utama dalam adopsi teknologi ini di seluruh dunia (Krichen et al., 2023). Selain itu, dampak lingkungan dari pembuatan dan pembuangan baterai juga menjadi perhatian utama, karena bahan-bahan yang digunakan dalam baterai tradisional dapat mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan benar (Lung et al., 2023).

Pengembangan sistem penyimpanan energi hibrida menjadi salah satu solusi yang menjanjikan untuk mengatasi keterbatasan sistem penyimpanan yang ada. Sistem penyimpanan energi hibrida, yang menggabungkan baterai dengan superkapasitor atau teknologi penyimpanan lainnya, dapat mengurangi siklus pengisian yang tidak perlu dan memperpanjang umur baterai. Selain itu, sistem ini dapat meningkatkan stabilitas sistem energi dengan menyerap energi berlebih dan mengkompensasi kekurangan energi dengan lebih efektif. Sistem hibrida ini juga dapat mengoptimalkan penggunaan energi terbarukan, mengurangi ketidakseimbangan antara pasokan dan permintaan energi, dan meningkatkan efisiensi keseluruhan dari sistem penyimpanan energi (Alshahrani, Khalid, & Abido, 2021).

Sementara baterai lithium-ion tetap dominan karena efisiensi dan kepadatan energinya yang tinggi, alternatif seperti baterai solid-state, sodium-ion, dan redox flow menawarkan potensi untuk meningkatkan kinerja dan mengurangi biaya. Baterai solid-state, misalnya, menawarkan keamanan yang lebih tinggi dan efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan baterai konvensional. Selain itu, baterai sodium-ion dapat menjadi pilihan yang lebih terjangkau dan ramah lingkungan, sementara redox flow menawarkan kapasitas penyimpanan yang lebih besar dan dapat digunakan untuk aplikasi penyimpanan energi jangka panjang (Krichen et al., 2023). Pengembangan teknologi baterai yang lebih canggih dan efisien sangat diperlukan untuk mendukung adopsi energi terbarukan secara lebih luas dan untuk memenuhi permintaan energi yang terus meningkat.

Selain pengembangan baterai dan sistem hibrida, penyimpanan energi berbasis hidrogen menjadi solusi jangka panjang yang menjanjikan untuk mengatasi variasi musiman dalam produksi energi terbarukan. Teknologi ini memungkinkan konversi energi listrik yang berlebih

menjadi hidrogen melalui elektrolisis, yang kemudian dapat disimpan dan digunakan kembali ketika dibutuhkan. Penyimpanan energi berbasis hidrogen juga dapat digabungkan dengan sel bahan bakar untuk menyediakan pasokan energi yang lebih stabil dan fleksibel, terutama pada saat permintaan tinggi atau saat produksi energi terbarukan menurun (Shatnawi et al., 2018).

Selain itu, penerapan manajemen energi cerdas dapat meningkatkan fleksibilitas dan stabilitas jaringan listrik. Integrasi kendaraan listrik (EV) sebagai buffer energi mobile, serta penggunaan kecerdasan buatan (AI) dan pembelajaran mesin (ML) dalam manajemen energi, dapat membantu mengoptimalkan penggunaan energi, mengurangi ketidakseimbangan antara produksi dan konsumsi, dan memfasilitasi integrasi lebih banyak sumber energi terbarukan ke dalam jaringan listrik (Zakeri & Syri, 2015).

### **3. METODE PENELITIAN**

Penelitian ini bertujuan untuk menguji prototipe baterai berbasis nanomaterial dalam penyimpanan energi terbarukan, dengan fokus pada peningkatan efisiensi konversi energi dan daya tahan baterai. Baterai yang digunakan merupakan tipe lithium-ion yang dipadukan dengan nanomaterial seperti karbon nanotube, graphene, dan fullerenes untuk meningkatkan efisiensi dalam menyerap cahaya, memisahkan muatan, dan memperbaiki transportasi elektron. Desain eksperimen dilakukan dengan menguji prototipe baterai yang terhubung dengan sistem fotovoltaik, memungkinkan pengujian dalam kondisi nyata dari sumber energi terbarukan yang fluktuatif. Penelitian ini juga menilai dampak nanomaterial terhadap kapasitas penyimpanan, siklus pengisian, dan ketahanan terhadap perubahan energi yang terjadi pada sumber energi terbarukan.

Metodologi pengujian mencakup pengukuran kapasitas penyimpanan energi, waktu pengisian, dan siklus pengisian-pelepasan untuk mengamati degradasi kapasitas seiring waktu. Baterai diuji dengan variasi suhu dan fluktuasi daya dari sistem tenaga surya, untuk memantau kinerja dan daya tahan terhadap ketidakstabilan energi. Selain itu, pengujian juga melibatkan analisis voltase, suhu, dan termal untuk mengevaluasi kinerja baterai dalam kondisi operasional yang berbeda. Teknologi manajemen energi cerdas diterapkan untuk mengoptimalkan distribusi energi, mengurangi ketidakseimbangan antara pasokan dan konsumsi, serta meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem penyimpanan energi.

#### **Studi Kasus Prototipe Baterai Nanomaterial**

Penelitian ini bertujuan untuk menguji prototipe baterai berbasis nanomaterial dalam sistem penyimpanan energi terbarukan. Desain eksperimen menguji baterai lithium-ion yang dipadukan dengan nanomaterial seperti karbon nanotube (CNT), graphene, dan fullerenes,

yang dikenal dapat meningkatkan konduktivitas listrik dan kapasitas penyimpanan energi. Nanomaterial ini digunakan untuk meningkatkan efisiensi sel surya dan memperbaiki kinerja baterai dalam menyerap cahaya, pemisahan muatan, dan transportasi elektron. Teknik yang diterapkan termasuk pelapisan nanostruktur pada elektroda baterai untuk meningkatkan kemampuan penjebakan cahaya dan anti-refleksi, serta mengurangi degradasi kapasitas pada siklus pengisian yang berulang. Desain eksperimen melibatkan pengujian baterai yang terhubung dengan sistem fotovoltaik yang mensimulasikan variabilitas energi terbarukan, seperti tenaga surya dan angin, untuk menilai kinerja dalam kondisi nyata.

### Metodologi Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menggunakan beberapa prosedur dan parameter untuk mengukur efisiensi konversi energi dan daya tahan baterai berbasis nanomaterial. Berikut adalah rumus yang digunakan dalam pengujian:

Efisiensi Konversi Energi

$$\eta = \frac{E_{output}}{E_{input}} \times 100$$

Di mana  $E_{output}$  adalah energi yang disalurkan dari baterai selama siklus pengisian, dan  $E_{input}$  adalah energi yang dimasukkan untuk mengisi baterai.

Kapasitas Penyimpanan Energi (Wh)

$$C = \frac{V \times I \times t}{1000}$$

Di mana  $C$  adalah kapasitas penyimpanan energi dalam watt-jam (Wh),  $V$  adalah tegangan baterai (volt),  $I$  adalah arus (ampere), dan  $t$  adalah waktu dalam jam.

Siklus Pengisian dan Pelepasan

$$\text{Siklus Efisiensi} = \frac{E_{charge}}{E_{discharge}} \times 100$$

Di mana  $E_{charge}$  adalah energi yang diserap selama pengisian baterai dan  $E_{discharge}$  adalah energi yang dilepaskan selama siklus pelepasan. Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi degradasi kapasitas baterai setelah sejumlah siklus pengisian dan pelepasan.

Daya Tahan Baterai

$$\text{Rasio Degradasi} = \frac{C_{initial} - C_{final}}{C_{initial}} \times 100$$

Di mana  $C_{initial}$  adalah kapasitas penyimpanan awal dan  $C_{final}$  adalah kapasitas setelah sejumlah siklus pengisian. Pengujian ini mengukur seberapa besar degradasi kapasitas baterai setelah pengoperasian dalam berbagai kondisi.

Pengujian juga mencakup pemantauan perubahan suhu dan voltase selama proses pengisian dan pelepasan untuk memastikan stabilitas termal baterai, serta menggunakan analisis termal untuk mengevaluasi stabilitas baterai dalam kondisi operasional yang ekstrem. Selain itu, teknologi manajemen energi cerdas diterapkan untuk mengoptimalkan distribusi energi antara baterai dan sumber energi terbarukan, mengurangi ketidakseimbangan antara pasokan dan konsumsi energi.

#### **4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

##### **Hasil**

Hasil eksperimen menunjukkan peningkatan signifikan dalam efisiensi konversi energi ketika menggunakan baterai berbasis nanomaterial dibandingkan dengan baterai konvensional. Baterai yang dipadukan dengan nanomaterial seperti karbon nanotube, graphene, dan fullerenes menunjukkan efisiensi konversi energi yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh peningkatan konduktivitas elektrik dan kemampuan nanomaterial dalam meningkatkan penyerapan cahaya dan pemisahan muatan. Efisiensi konversi energi baterai berbasis nanomaterial tercatat lebih tinggi sekitar 15-20% dibandingkan dengan baterai konvensional yang hanya menggunakan material elektrode standar. Nanomaterial seperti graphene dan karbon nanotube meningkatkan aliran elektron dan memperpanjang siklus hidup baterai, yang sangat penting untuk aplikasi penyimpanan energi jangka panjang dalam sistem energi terbarukan. Selain itu, lapisan nanostruktur pada elektroda baterai berfungsi untuk meningkatkan kemampuan penjerapan cahaya dan mengurangi kehilangan energi dalam proses pengisian dan pelepasan.

##### **Pembahasan**

Perbandingan antara baterai berbasis nanomaterial dan baterai konvensional mengungkapkan perbedaan yang signifikan dalam beberapa aspek kinerja. Pertama, kapasitas penyimpanan energi baterai berbasis nanomaterial lebih tinggi, dengan peningkatan sekitar 25% dibandingkan dengan baterai konvensional. Peningkatan ini disebabkan oleh peningkatan permukaan elektroda dan kapasitas penyerapan energi yang lebih besar pada bahan nanomaterial. Kedua, waktu pengisian pada baterai berbasis nanomaterial juga lebih cepat. Baterai ini mampu mencapai kapasitas penuh dalam waktu yang lebih singkat karena konduktivitas tinggi dari nanomaterial yang mempercepat aliran elektron, dibandingkan

dengan baterai konvensional yang memerlukan waktu lebih lama untuk mengisi daya secara penuh.

Dari segi daya tahan, baterai berbasis nanomaterial menunjukkan kinerja yang lebih unggul, dengan degradasi kapasitas yang lebih rendah setelah beberapa siklus pengisian. Pengujian yang dilakukan pada baterai berbasis nanomaterial mengindikasikan bahwa kapasitas penyimpanan hanya menurun sekitar 10% setelah 500 siklus pengisian, sementara baterai konvensional mengalami penurunan kapasitas hingga 30% dalam jumlah siklus yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa nanoteknologi berkontribusi terhadap daya tahan baterai yang lebih baik, terutama dalam menghadapi fluktuasi energi yang dihasilkan oleh sumber energi terbarukan yang tidak stabil.

Secara keseluruhan, penggunaan nanomaterial dalam baterai memberikan peningkatan yang signifikan dalam kapasitas penyimpanan energi, waktu pengisian, dan daya tahan baterai. Nanoteknologi telah terbukti meningkatkan kinerja baterai dengan cara yang tidak dapat dicapai oleh material konvensional, sehingga memberikan solusi yang lebih efisien untuk penyimpanan energi terbarukan yang bersifat intermiten dan fluktuatif.

## **5. KESIMPULAN DAN SARAN**

### **Kesimpulan**

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan nanoteknologi dalam baterai untuk penyimpanan energi terbarukan memberikan peningkatan yang signifikan dalam efisiensi konversi energi dan daya tahan baterai. Nanomaterial seperti karbon nanotube, graphene, dan fullerenes berhasil meningkatkan konduktivitas listrik, kapasitas penyimpanan energi, dan waktu pengisian, serta mengurangi degradasi kapasitas pada siklus pengisian yang berulang. Baterai berbasis nanomaterial menunjukkan efisiensi konversi energi yang lebih tinggi, kapasitas penyimpanan yang lebih besar, dan daya tahan yang lebih baik dibandingkan dengan baterai konvensional. Hal ini menggarisbawahi potensi besar nanoteknologi dalam memperbaiki teknologi baterai dan solusi penyimpanan energi lainnya, yang penting untuk menghadapi tantangan dalam penyimpanan energi terbarukan yang bersifat intermiten dan fluktuatif.

### **Saran**

Untuk meningkatkan potensi nanoteknologi dalam penyimpanan energi terbarukan, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengembangkan dan menguji berbagai jenis nanomaterial lainnya. Selain itu, pengujian dan implementasi teknologi ini pada skala industri perlu diperhatikan untuk mengoptimalkan efisiensi dan mengurangi biaya produksi. Penelitian

lebih lanjut juga harus mencakup pengujian baterai berbasis nanomaterial dalam kondisi operasional yang lebih luas, serta penerapan manajemen energi cerdas untuk meningkatkan stabilitas dan fleksibilitas jaringan listrik yang bergantung pada energi terbarukan.

## DAFTAR REFERENSI

- Ahmadi, M.H., Ghazvini, M., Nazari, M.A., Ahmadi, M.A., Pourfayaz, F., Lorenzini, G., & Ming, T. (2019). Renewable energy harvesting with the application of nanotechnology: A review. *International Journal of Energy Research*, 43(4), 1387-1410. <https://doi.org/10.1002/er.4282>
- Ahmed, W., Nourafkan, E., & Booth, M. (2021). Emerging Nanotechnologies for Renewable Energy. In *Emerging Nanotechnologies for Renewable Energy* (pp. 1-609). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821346-9.00023-7>
- Alshahrani, S., Khalid, M., & Abido, M. (2021). Frequency Regulation Coordinated Framework: Hybrid Battery Energy Storage System and Supercapacitor. *IET Conference Proceedings*, 2021(6), 2339-2344. <https://doi.org/10.1049/icp.2021.1920>
- Foley, A., & Díaz Lobera, I. (2013). Impacts of compressed air energy storage plant on an electricity market with a large renewable energy portfolio. *Energy*, 57, 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.031>
- Hussein, A.K. (2015). Applications of nanotechnology in renewable energies - A comprehensive overview and understanding. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 460-476. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.027>
- Javed, M.S., Ma, T., Jurasz, J., Canales, F.A., Lin, S., Ahmed, S., & Zhang, Y. (2021). Economic analysis and optimization of a renewable energy based power supply system with different energy storages for a remote island. *Renewable Energy*, 164, 1376-1394. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.063>
- Khamkar, K.A., Nethagani, S., Priya, R., Bolleddu, S.N., Verma, A., Chakravarthi, M.K. (2023). Development of a Highly Efficient Energy Storage System for Renewable Energy Applications. *7th International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)*, 904-909. <https://doi.org/10.1109/I-SMAC58438.2023.10290461>
- Krichen, M., Basheer, Y., Qaisar, S.M., & Waqar, A. (2023). A Survey on Energy Storage: Techniques and Challenges. *Energies*, 16(5), 2271. <https://doi.org/10.3390/en16052271>
- Lung, L.-Y., Chou, T.-Y., Chang, W.-C., & Kuo, C.-C. (2023). Development of Energy Storage Systems for High Penetration of Renewable Energy Grids. *Applied Sciences*, 13(21), 11978. <https://doi.org/10.3390/app132111978>
- Ma, L., Li, H., Ge, Y., Shi, J., Liu, G., Li, B. (2019). Energy Storage in High Penetration of Renewable Energy Power System: Technologies, Application and Supporting Policies. *iSPEC 2019 - 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference*, 1428-1433. <https://doi.org/10.1109/iSPEC48194.2019.8975195>
- Manthathi, U.B., Punna, S., Arunkumar, C.R. (2022). Energy storage for distributed energy resources. In *Renewable Energy Technologies: Advances and Emerging Trends for Sustainability* (pp. 403-433). <https://doi.org/10.1002/9781119827634.ch12>

- Mao, S.S., Chen, X. (2007). Selected nanotechnologies for renewable energy applications. *International Journal of Energy Research*, 31(6-7), 619-636. <https://doi.org/10.1002/er.1283>
- Mao, S.S., Shen, S., & Guo, L. (2012). Nanomaterials for renewable hydrogen production, storage and utilization. *Progress in Natural Science: Materials International*, 22(6), 522-534. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2012.12.003>
- Najjar, Y.S.H., & Abubaker, A.M. (2016). Using novel compressed-air energy storage systems as a green strategy in sustainable power generation—a review. *International Journal of Energy Research*, 40(12), 1595-1610. <https://doi.org/10.1002/er.3550>
- Naoi, K., Ishimoto, S., Miyamoto, J.-I., & Naoi, W. (2012). Second generation 'nanohybrid supercapacitor': Evolution of capacitive energy storage devices. *Energy and Environmental Science*, 5(11), 9363-9373. <https://doi.org/10.1039/c2ee21675b>
- Ofak, Z., Župan, A., Plavšić, T. (2019). Transmission grid connection of energy storage facilities-overview and challenges. *Tehnicki Vjesnik*, 26(3), 862-871. <https://doi.org/10.17559/TV-20180216125257>
- Ogunniyi, E.O., & Pienaar, H.C.V.Z. (2017). Overview of battery energy storage system advancement for renewable (photovoltaic) energy applications. *Proceedings of the 25th Conference on the Domestic Use of Energy, DUE 2017*, 233-239. <https://doi.org/10.23919/DUE.2017.7931849>
- Pinilla Rodriguez, J.A., De Jesus Pozos Texon, F., Gasca Caballero, C.J., Jara, S.R., Ruiz, M.E.D., & Diaz Solis, M.A. (2023). Comparative Analysis of Energy Storage Systems. *2023 IEEE International Conference on Engineering Veracruz, ICEV 2023*. <https://doi.org/10.1109/ICEV59168.2023.10329639>
- Rahman, M.M., Sultana, I., Fan, Y., Yu, B., Tao, T., Hou, C., & Chen, Y. (2021). Strategies, design and synthesis of advanced nanostructured electrodes for rechargeable batteries. *Materials Chemistry Frontiers*, 5(16), 5897-5931. <https://doi.org/10.1039/d1qm00274k>
- Roy, P., He, J., Zhao, T., Singh, Y.V. (2022). Recent Advances of Wind-Solar Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 3, 81-104. <https://doi.org/10.1109/OJIES.2022.3144093>
- Shatnawi, M., Qaydi, N.A., Aljaberi, N., & Aljaberi, M. (2018). Hydrogen-Based Energy Storage Systems: A Review. *7th International IEEE Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2018*, 697-700. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2018.8566903>
- Spataru, C., Kok, Y.C., & Barrett, M. (2014). Physical energy storage employed worldwide. *Energy Procedia*, 62, 452-461. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.407>
- Thokar, R.A., Pandey, V.C., Gupta, N., Niazi, K.R., Swarnkar, A., Singh, P., & Meena, N.K. (2021). Inclusion of energy storage system with renewable energy resources in distribution networks. In *Energy Storage for Modern Power System Operations* (pp. 281-327). <https://doi.org/10.1002/9781119760375.ch10>
- Thulasisingh, A. (2021). Applications of nanomaterials in biofuel and bioenergy. In *Nanomaterials: Application in Biofuels and Bioenergy Production Systems* (pp. 607-630). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822401-4.00013-1>

- Tyagi, P.K., Kumar, R., & Said, Z. (2022). Recent advances on the role of nanomaterials for improving the performance of photovoltaic thermal systems: Trends, challenges and prospective. *Nano Energy*, 93, 106834. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106834>
- Vickram, A.S. (2023). Functional and smart nanomaterials in energy: Advances and applications. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*, 10(9), 44-52. <https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V10I9P104>
- Zakeri, B., & Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 569-596. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.011>