

Perancangan dan Optimasi Sistem Hybrid Energy Harvesting untuk Wireless Sensor Network Pada Smart Agriculture

1st Irdani Sukma Ardihantoko

*Departement of Computer Engineering
Telkom University
Surabaya, Indonesia*

irdanisukma@student.telkomuniversity.ac.id2nd Mohammad Yanuar Hariyawan

*Departement of Computer Engineering
Telkom University
Surabaya, Indonesia*

myanuar@telkomuniversity.ac.id3rd Helmy Widyantara

*Department of Computer Engineering
Telkom University
Surabaya, Indonesia*

helmywidhyantara@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Perkembangan teknologi yang pesat telah mengubah berbagai sektor kehidupan, termasuk pertanian di Indonesia. Implementasi energi terbarukan seperti panel surya menjadi fokus utama untuk mengatasi masalah energi dan mendukung smart agriculture. Namun, keterbatasan energi pada node sensor menjadi tantangan utama dalam implementasi Wireless Sensor Network (WSN) jangka panjang di lingkungan pertanian. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pemanenan energi hibrida yang menggabungkan energi surya dan angin untuk mengatasi keterbatasan energi pada WSN. Tujuan utama adalah menganalisis performa sistem energi hibrida pada WSN. Solusi yang diusulkan meliputi perancangan dan optimasi sistem hybrid energy harvesting menggunakan turbin angin dan panel surya untuk implementasi WSN di lingkungan pertanian. Penelitian ini mengembangkan sistem kontrol relay berbasis mikrokontroler untuk mengatur pemanenan energi hibrida dari panel surya dan turbin angin untuk aplikasi pertanian cerdas. Perancangan dari sistem tersebut sudah bekerja secara optimal dan mampu mengatur pemanenan energi hibrida dengan tepat.

Kata Kunci - Coverage-Awareness, Hybrid Energy Harvesting, Manajemen Daya, Wireless Sensor Network (WSN).

I. PENDAHULUAN

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan kumpulan sensor berukuran kecil yang ditempatkan di suatu wilayah untuk mendeteksi, mengolah, dan mengirimkan data secara nirkabel ke pusat data atau perangkat lain. Dalam era pertanian modern, pemanfaatan Wireless Sensor Network (WSN) untuk memantau kondisi lingkungan dan meningkatkan produktivitas pertanian semakin penting. Wireless Sensor Network (WSN) telah merevolusi dalam sektor pertanian dengan mendukung aplikasi pertanian pintar memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara real-time dan presisi seperti pemantauan kelembaban tanah, suhu, dan kondisi lingkungan lainnya yang sangat penting untuk pengambilan keputusan tepat dalam praktik pertanian.

Sistem hybrid energy harvesting (EH) pada wireless sensor network (WSN) di lingkungan pertanian menunjukkan

potensi yang signifikan untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan. Pendekatan hybrid ini memungkinkan pemanfaatan energi dari radiasi matahari, dan pergerakan angin, sehingga meningkatkan ketersediaan daya untuk sensor nirkabel.

Penerapan teknologi WSN masih dihadapkan pada sejumlah tantangan, diantaranya adalah bergantung pada manajemen efisiensi daya. Keterbatasan pasokan energi bagi sensor dan perangkat mikro yang banyak digunakan di lapangan mengingat node sensor bergantung pada sumber daya terbatas seperti baterai seringkali menjadi kendala utama. Sebagian besar sistem WSN bergantung pada sumber energi berbasis baterai yang memiliki keterbatasan dalam hal masa pakai dan ketersediaan energi. Masalah ini semakin nyata dalam konteks pertanian presisi, di mana pemantauan yang akurat dan berkelanjutan sangat penting untuk pengambilan keputusan yang efisien, seperti irigasi otomatis dan manajemen lahan yang optimal. Salah satu pendekatan potensial untuk mengatasi masalah pasokan energi ini adalah dengan mengimplementasikan sistem pemanenan energi hibrida (energy harvesting) dari sumber daya terbarukan yang menggabungkan energi surya dan angin sebagai sumber energi untuk jaringan sensor menjadi solusi yang menjanjikan.

Sistem tersebut dapat meningkatkan ketersediaan daya bagi sensor sehingga memperpanjang umur operasional dan mengurangi ketergantungan pada penggantian baterai. Salah satu aspek penting yang perlu diterapkan adalah pendekatan coverage awareness yaitu kemampuan sistem untuk memastikan bahwa seluruh area yang ingin dipantau dengan efisien dapat terjangkau oleh sensor-sensor yang ada. Pendekatan coverage awareness akan diterapkan untuk memastikan cakupan jaringan yang optimal dan efisiensi energi melalui melakukan pengujian komprehensif untuk menganalisis performa sistem hybrid energy harvesting dalam berbagai kondisi lingkungan yang dinamis diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan system WSN berkelanjutan dan mendukung pertanian modern. Berangkat dari tantangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem yang menggabungkan energi surya dan angin dengan Wireless Sensor Network (WSN) untuk meningkatkan efisiensi energi dan cakupan pemantauan dalam sektor pertanian. Beberapa

penelitian terkini telah mengkaji penggunaan teknologi Wireless Sensor Networks (WSN) dalam pertanian pintar.

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa WSN memungkinkan pemantauan kondisi pertanian secara real-time, namun kendala energi menjadi hambatan utama. Mengidentifikasi bahwa penerapan teknik hemat energi dapat menjadi solusi untuk meningkatkan efisiensi energi dalam aplikasi pertanian. Meskipun menunjukkan potensi sebagai solusi hemat energi, teknologi ini masih berada dalam tahap pengembangan dan belum sepenuhnya selesai atau matang diimplementasikan dalam skala lapangan. Keterbatasan ini menimbulkan pertanyaan mengenai kinerja aktual dalam kondisi lingkungan nyata di sektor pertanian, kelemahan lainnya menghasilkan output daya yang rendah, terutama jika dibandingkan menggunakan sumber energi terbarukan lainnya, seperti energi dari panel surya dan turbin angin.

Contoh hasil dari salah satu penelitian terkait WSN ialah source node berhasil mengirimkan data, menerima parameter kontrol, serta melakukan proses kontrol sesuai data parameter kontrol yang diterima dari Sink berhasil mengirimkan data parameter kontrol ke source node, melakukan pengiriman data yang diterima dari source node ke database server. Nilai rata-rata masing-masing alat adalah, sensor suhu sebesar 1,81%, sensor kelembaban 0,95 % dan sensor intessitas sebesar 1,78 %. Berdasarkan hasil pengujian Multi-node dalam 1 sink jumlah node maksimal yang masih bisa mengirimkan data yaitu 5 node dengan persentase keberhasilan pengiriman data 30%, sedangkan jumlah node yang optimal dalam 1 sink adalah 3 node dengan persentase keberhasilan pengiriman data 70%[1].

Selain itu menjelaskan bahwa penerapan sumber energi terbarukan, misalnya energi dari panel surya dan turbin angin sangat cocok untuk memperpanjang umur operasional sistem WSN di lapangan, yang sekaligus mengurangi ketergantungan pada baterai. Dari penelitian ini mengabaikan fluktuasi energi dihasilkan melalui panel surya dan turbin angin akibat perubahan kondisi cuaca. Ketika terjadi mendung berkepanjangan atau kecepatan angin yang rendah, sistem mungkin mengalami penurunan daya yang signifikan, kemudian dari sisi penggunaan panel surya dan turbin angin, meskipun efektif, memerlukan biaya awal yang tinggi, terutama untuk skala pertanian kecil atau menengah[2].

Hal ini mencakup pengujian efektivitas pemanenan energi, efisiensi penggunaan energi, serta kemampuan sistem dalam menjaga cakupan yang optimal. Penelitian ini berfokus pada evaluasi kinerja dan efisiensi sistem hybrid energy harvesting pada WSN di lingkungan pertanian dengan mendokumentasikan hasil analisis pengujian sistem dalam berbagai kondisi lingkungan, analisis performa berdasarkan parameter desain, dan hasil penelitian yang detail.

Evaluasi kinerja sistem energy harvesting hybrid menunjukkan peningkatan signifikan dalam hal kepadatan daya yang dihasilkan, dengan rentang $1.96 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ hingga $2669 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ [3]. Namun, tantangan utama terletak pada optimalisasi parameter sistem seperti faktor pembagian spektrum dan parameter SWIPT hybrid untuk memaksimalkan throughput dan efisiensi energi[4].

Penggunaan algoritma optimasi seperti particle swarm optimization dapat membantu mengatasi tantangan ini. Secara keseluruhan, sistem EH hybrid menunjukkan potensi besar untuk menciptakan WSN yang mandiri energi di lingkungan pertanian, mendukung implementasi teknologi pertanian presisi dan Internet of Things (IoT) di sektor agrikultur[5].

Dengan melakukan analisis menyeluruh diharapkan sistem ini dapat memberikan solusi yang lebih efisien, berkelanjutan, dan adaptif dalam mendukung aplikasi WSN di sektor pertanian sehingga dapat dijadikan referensi bagi praktisi pertanian dalam mengimplementasikan solusi berbasis WSN yang ramah lingkungan dan hemat energi dalam mengoptimalkan manajemen daya berbasis energi terbarukan.

II. KAJIAN TEORI

A. Wireless Sensor Network (WSN)

Jaringan Sensor Nirkabel (Wireless Sensor Networks/WSN) adalah paradigma baru sistem tertanam waktu nyata yang digunakan untuk berbagai aplikasi di mana jaringan berbasis infrastruktur tradisional tidak memungkinkan[6]. WSN terdiri dari sejumlah besar node sensor dengan sumber daya terbatas, berbagai jenis kontrol, dan node gateway, yang memungkinkan pemantauan dan kontrol jarak jauh di industri seperti perawatan kesehatan, pertahanan, pertanian, dan manajemen bencana[7]. WSN memiliki beberapa karakteristik utama :

1. Keterbatasan sumber daya: Node biasanya bertenaga baterai dengan kemampuan komputasi yang terbatas.
2. Pengorganisasian mandiri dan multi-lompatan: Sensor membentuk jaringan dengan cara yang dapat mengatur dirinya sendiri dan menggunakan komunikasi multi-lompatan[8].
3. Pengumpulan dan pemrosesan data: WSN secara kooperatif merasakan, mengumpulkan, memproses, dan mengirimkan informasi tentang objek yang dirasakan di wilayah geografis yang tercakup[8].
4. Skalabilitas: Pengelompokan sering digunakan untuk mencapai skalabilitas tinggi dan alokasi sumber daya yang efisien[9].
5. Tantangan keamanan: Karena pertukaran informasi berharga di saluran yang tidak aman, keamanan menjadi perhatian penting dalam WSN[7].

Terlepas dari kemampuannya yang kuat, WSN menghadapi tantangan seperti efisiensi energi, keamanan, dan proses perutean yang rumit[10]. Para peneliti secara aktif mengerjakan solusi seperti protokol pengelompokan, perutean hemat energi, dan metode deteksi intrusi untuk mengatasi masalah ini dan meningkatkan kinerja WSN[6][11][8][9]. Ketika WSN terus berkembang, mereka memainkan peran penting dalam memungkinkan aplikasi Internet-of-Things (IoT) dan sistem cerdas di berbagai domain[12].

B. Manajemen Daya di Wireless Network Sensor (WSN)

Teknik manajemen daya di Wireless Sensor Network (WSN) dengan pemanenan energi surya dan angin serta

coverage awareness dan protokol hemat energi melibatkan beberapa aspek penting :

1. Teknik - Teknik Manajemen Daya

Pemanenan energi dari sumber surya dan angin dapat mengatasi keterbatasan baterai pada node sensor, meningkatkan masa hidup jaringan[3]. Teknik clustering merupakan pendekatan yang efektif untuk mengoptimalkan penggunaan energi. Protokol seperti GCEEC menggunakan pemilihan cluster head dari posisi centroid dan node gateway untuk mengurangi beban data dan meneruskannya ke base station, sehingga meningkatkan efisiensi energi[10].

2. Protokol Hemat Energi

Beberapa protokol inovatif telah dikembangkan untuk manajemen daya yang lebih baik. CPMA menggunakan algoritma Harmony Search untuk pemilihan cluster head online dan Artificial Bee Colony untuk optimasi parameter protokol, menghasilkan disipasi energi total yang lebih rendah[13]. Protokol clustering berbasis logika fuzzy dengan transmisi multi-hop juga terbukti unggul dalam menyeimbangkan beban dan meminimalkan konsumsi energi[6].

Untuk meningkatkan coverage awareness, penggunaan UAV sebagai data mule dapat membantu offloading node sensor dan mentransfer data pemantauan secara aman ke pusat kontrol[14]. Selain itu, protokol routing yang mempertimbangkan latensi dan efisiensi energi, serta teknik pemilihan next-hop yang cerdas, dapat mengoptimalkan cakupan jaringan sekaligus memperpanjang masa pakai WSN[15]. Dengan menggabungkan teknik-teknik ini, WSN dengan pemanenan energi dapat mencapai manajemen daya yang lebih efisien dan coverage yang lebih baik.

C. Pemanenan Energi

Pemanenan energi surya dan angin, serta teknologi penyimpanan energi, merupakan komponen penting dalam transisi menuju sistem energi terbarukan yang berkelanjutan. Sel surya fotovoltaik (PV) dan turbin angin menjadi sumber energi terbarukan yang paling banyak digunakan[16]. Namun, sifat intermiten dari sumber-sumber ini memerlukan solusi penyimpanan energi yang efektif.

1. Energi Surya

Pemanenan energi surya dengan panel surya yang sadar akan cakupan adalah bidang penelitian yang sedang berkembang dengan tujuan meningkatkan kinerja dan efisiensi sistem tenaga surya. Beberapa penelitian terbaru telah mengeksplorasi pendekatan inovatif untuk meningkatkan penangkapan dan pemanfaatan energi surya. Pendekatan ini bertujuan untuk memperluas potensi aplikasi teknologi surya sambil mempertahankan atau meningkatkan efisiensi konversi energi. Penelitian lebih lanjut di bidang ini dapat menghasilkan sistem energi surya yang lebih serbaguna dan dapat digunakan secara luas.

TABEL 1
(SPESIFIKASI SOLAR PANEL)

Electrical Characteristics	
Maksimum Power (Pmax)	50W

Maksimum Power Voltage (Vmp)	18V
Maksimum Power Current (Imp)	2.77A
Open Circuit Voltage (Voc)	22V
Open Circuit Current (Isc)	2.99A
Operating Temperature	-40° C – 85° C
Maksimum System Voltage	1000VDC
Tolerance (Tol)	+3% / -3%
Maksimum Series Fuse Rating	15A
Dimensi (mm)	770x540x25mm

2. Energi Angin

Pemanenan energi angin menggunakan turbin dengan kesadaran cakupan adalah bidang penelitian yang sedang berkembang yang bertujuan untuk mengoptimalkan kinerja ladang angin. Penggunaan strategi kontrol yang canggih dan model pembelajaran yang mendalam telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam meningkatkan prakiraan daya jangka pendek dan efisiensi ladang angin secara keseluruhan.

3. Teknologi Penyimpanan Energi

Beberapa teknologi penyimpanan energi yang menjanjikan termasuk baterai dan penyimpanan energi magnetik superkonduktor (SMES) yang dapat digunakan bersama dengan Dynamic Voltage Restorer (DVR) untuk mengatasi fluktuasi tegangan pada sistem hibrida PV-angin yang terhubung ke jaringan[19]. Selain itu, penyimpanan energi termal (TES) yang digabungkan dengan concentrated solar power (CSP) dapat memberikan fleksibilitas tambahan pada jaringan dengan penetrasi energi terbarukan yang tinggi[20].

Secara keseluruhan, integrasi teknologi pemanenan dan penyimpanan energi yang tepat sangat penting untuk mencapai sistem energi terbarukan yang andal dan efisien. Pengembangan lebih lanjut dalam bidang elektronika daya, perangkat semikonduktor baru, dan skema kontrol canggih akan terus memainkan peran kunci dalam transisi energi ini[16]. Selain itu, pendekatan inovatif seperti kain fotovoltaik[21] dan nanogenerator efek bayangan-tribo[22] menunjukkan potensi untuk aplikasi energi terbarukan yang lebih luas di masa depan.

D. Coverage – Awareness

Kesadaran cakupan dalam WSN mengacu pada kemampuan jaringan untuk secara efisien memantau dan mencakup area tertentu sambil mengoptimalkan konsumsi energi. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa node sensor ditempatkan secara strategis untuk memaksimalkan cakupan sekaligus mampu memanen energi yang cukup dari sumber tenaga surya dan angin.

Coverage awareness dalam optimasi manajemen daya di Wireless Sensor Network (WSN) mengacu pada kemampuan untuk memaksimalkan cakupan area sensing sambil meminimalkan konsumsi energi node sensor. Konsep ini penting karena berkaitan langsung dengan efektivitas dan

umur jaringan WSN[23]. Beberapa pendekatan utama untuk mengoptimalkan coverage awareness meliputi:

1. Penggunaan algoritma clustering untuk membagi jaringan menjadi kelompok-kelompok node yang efisien [6].
2. Penerapan teknik penjadwalan node untuk mengaktifkan/menonaktifkan sensor secara bergantian guna menghemat energi[24].
3. Optimasi penempatan node sensor menggunakan algoritma metaheuristik seperti Particle Swarm Optimization dan Grey Wolf Optimizer untuk memaksimalkan cakupan area 3D [23].
4. Pemanfaatan teknik duty cycling untuk mengurangi konsumsi energi node individual[25].

Secara keseluruhan, coverage awareness merupakan faktor kunci dalam merancang WSN yang efisien dan tahan lama. Pendekatan terbaru menggabungkan berbagai teknik optimasi seperti clustering, penjadwalan, dan penempatan node cerdas untuk mencapai keseimbangan optimal antara cakupan area, koneksi, dan efisiensi energi.

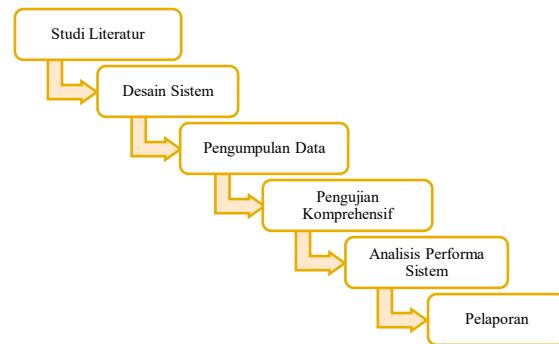
Algoritma kesadaran cakupan memainkan peran penting dalam mengoptimalkan manajemen daya di Jaringan Sensor Nirkabel (WSN). Algoritme ini bertujuan untuk mempertahankan jangkauan jaringan sekaligus meminimalkan konsumsi energi, sehingga memperpanjang masa pakai jaringan. Salah satu pendekatan untuk optimasi yang memperhatikan cakupan adalah penggunaan algoritma yang terinspirasi dari alam. Sebagai contoh, algoritma Lion Optimization (LO) telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam mencapai jangkauan jaringan yang optimal. Dibandingkan dengan gabungan Improved Genetic Algorithm dan Binary Ant Colony Algorithm (IGA-BACA) LO menunjukkan cakupan jaringan yang lebih baik dan tingkat konvergensi yang lebih cepat [26]. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma yang terinspirasi dari alam dapat secara efektif menyeimbangkan cakupan dan efisiensi energi dalam WSN.

Kesimpulannya, algoritma kesadaran cakupan, terutama yang terinspirasi dari alam, menunjukkan potensi besar dalam mengoptimalkan manajemen daya di WSN. Algoritma ini tidak hanya memperluas jangkauan jaringan, tetapi juga mendukung efisiensi energi dan memperpanjang masa pakai jaringan. Karena aplikasi WSN terus berkembang, penelitian lebih lanjut tentang teknik optimasi yang sadar cakupan akan sangat penting untuk mengembangkan jaringan sensor yang lebih efisien dan andal.

III. METODE

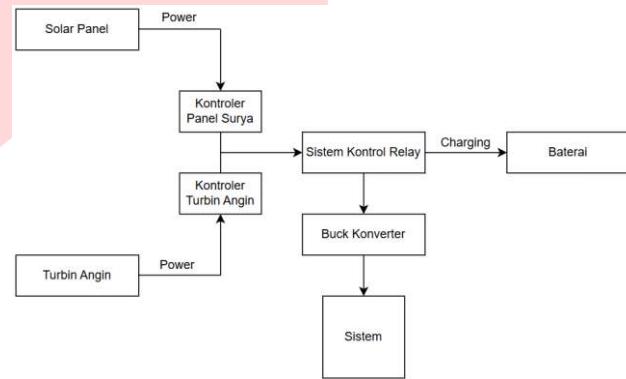
Penelitian ini menggunakan metode Research and Development, yang merupakan pendekatan untuk mengembangkan produk baru atau menyempurnakan produk yang ada melalui proses tertentu yang sistematis dan terencana yang bertujuan menciptakan solusi yang relevan dalam optimasi manajemen daya di WSN untuk pemanenan energi surya dan angin dengan coverage awareness. Dengan mengikuti tahapan sistematis, metode ini diharapkan bahwa produk yang dihasilkan tidak hanya berlandaskan teori tetapi

jugalah memiliki nilai efisiensi. Pada penelitian ini terdapat beberapa tahapan untuk menyelesaikan penelitian yang terdapat pada GAMBAR 1.



GAMBAR 1
(ALUR PENELITIAN)

A. Desain Sistem



GAMBAR 2
(DESAIN SISTEM)

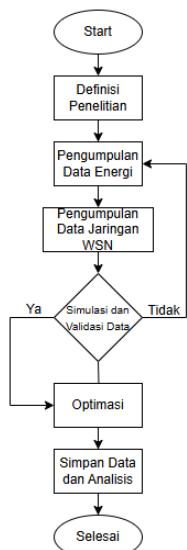
GAMBAR 2 menunjukkan sistem energi terbarukan hibrida yang menggabungkan tenaga angin dan matahari untuk menghasilkan listrik. Berikut ini adalah perincian dari sistem tersebut:

1. Generator Turbin Angin: Mengonversi energi angin menjadi energi mekanik, yang selanjutnya dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik.
2. Panel Surya: Mengonversi cahaya matahari menjadi energi listrik.
3. Kontroler: Alat yang digunakan untuk mengatur pengecasan baterai.
4. Sistem Kontrol Relay: Sistem yang digunakan mengatur pengecasan baterai dari salah satu energi yang memiliki nilai tegangan paling tinggi dari energi hibrida.
5. Baterai: Menampung energi listrik yang diperoleh dari panel surya dan turbin angin.
6. Buck Konverter: Alat yang digunakan untuk menurunkan tegangan sesuai kebutuhan sistem WSN.
7. Sistem: Wireless Sensor Network (WSN).

B. Pengumpulan Data

Pengumpulan data untuk sistem Hybrid Energy Harvesting dengan fokus pada optimasi manajemen daya dalam jaringan sensor nirkabel (Wireless Sensor Network/WSN) memerlukan pendekatan terintegrasi yang mencakup pengumpulan informasi dari berbagai sumber terkait pemanenan energi surya dan angin, serta aspek

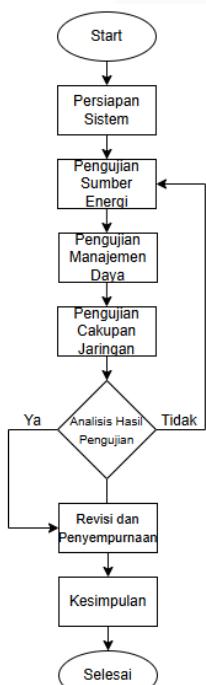
coverage-awareness. Berikut alur pengumpulan data untuk penelitian ini dijelaskan pada GAMBAR 3.



GAMBAR 3
(TAHAPAN PENGUMPULAN DATA)

C. Pengujian Komprehensif

Pengujian komprehensif untuk sistem Hybrid Energy Harvesting (HEH) dengan optimasi manajemen daya di WSN, yang memanfaatkan pemanenan energi surya dan angin dengan mempertimbangkan coverage-awareness, melibatkan berbagai aspek teknis. Tujuannya adalah untuk memastikan sistem berfungsi optimal, stabil, dan memenuhi kebutuhan jaringan sensor nirkabel secara berkelanjutan. Berikut adalah tahapan pengujian ini dijelaskan pada GAMBAR 4.



GAMBAR 4
(TAHAPAN PROSES PENGUJIAN)

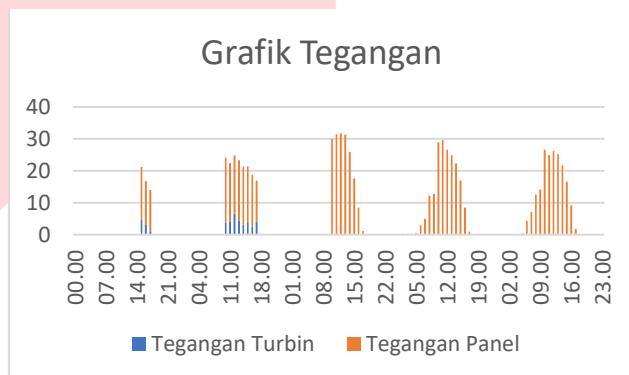
D. Analisis Performa Sistem

Analisis performa sistem hybrid energy harvesting yang memanfaatkan energi surya dan angin dengan optimasi manajemen daya dalam jaringan sensor nirkabel (WSN) yang mempertimbangkan coverage-awareness, melibatkan evaluasi menyeluruh terhadap efisiensi, keandalan, dan kemampuan adaptasi sistem.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

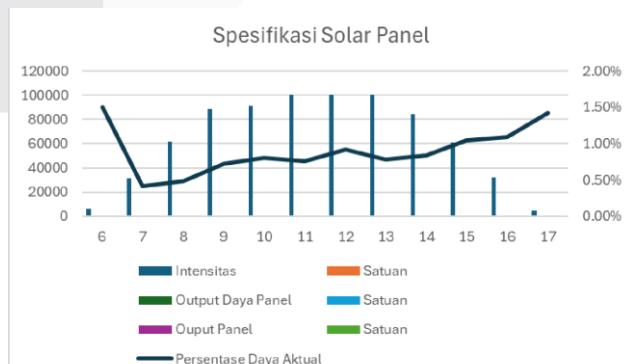
A. Performa Sistem Pemanenan Energi

Sebagai langkah awal dalam mengevaluasi kinerja sistem pemanenan energi, dilakukan pengujian daya yang dihasilkan oleh solar panel dan turbin angin. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar masing-masing sumber energi dalam berbagai kondisi lingkungan yang terdapat pada GAMBAR 5



GAMBAR 5
(GRAFIK TEGANGAN)

Berdasarkan GAMBAR 5 terlihat bahwa tegangan yang dihasilkan oleh panel surya secara konsisten lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan dari turbin angin. Tegangan panel surya terdapat mengalami peningkatan signifikan pada titik data 4 hingga data 9 dengan kisaran nilai antara 16 hingga 17 volt, yang mencerminkan performa optimal panel dalam kondisi tertentu, kemungkinan saat intensitas cahaya matahari berada pada puncaknya. Sebaliknya, tegangan dari turbin angin relatif konstan dan berada di bawah 2 volt, menunjukkan bahwa dalam rentang waktu pengamatan, turbin angin tidak menghasilkan kontribusi tegangan yang signifikan.



GAMBAR 6
(SPESIFIKASI SOLAR PANEL)

Pada GAMBAR 6 menunjukkan bahwa saat intensitas cahaya berada pada nilai maksimum yaitu 100.000 lux (pukul 11.00 – 13.00) menghasilkan daya maksimum sebesar 36.3 W. Sebaliknya pada intensitas rendah sebesar 4.435.78 lux (pukul 17.00) daya keluaran turun drastis menjadi 2.5 W. Hal ini mengindikasikan bahwa panel surya memiliki batas maksimum daya keluaran dimana merupakan batas efisiensi maksimum dari sel surya yang digunakan. Persentase daya aktual adalah perbandingan antara output aktual panel dengan perhitungan output daya maksimum panel surya.

B. Sistem Penyimpanan Energi

Sebagai bagian dari sistem pemanenan energi, unit penyimpanan energi memegang peranan penting dalam menjaga ketersediaan daya bagi jaringan sensor. Untuk mengevaluasi kinerja sistem penyimpanan ini, dilakukan pengujian terhadap proses pengisian baterai hingga mencapai kapasitas penuh. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui durasi pengisian serta efisiensi proses penyimpanan energi dari sumber terbarukan yang tersedia.

TABEL 2
(PENGISIAN BATERAI)

Mulai	Tegangan Baterai	Selesai	Tegangan Baterai	Durasi
11:30	12.92 V	15:45	14.00 V	4 jam 15 menit

Pada tabel TABEL 2 proses pengisian dimulai pukul 11:30 dengan tegangan awal 12.92 V atau 46%, setelah proses berlangsung selama 4 jam 15 menit tegangan baterai meningkat menjadi 14.00 V atau 100% pada pukul 15:45. Peningkatan tegangan sebesar 1.08 V atau 54% dalam durasi tersebut mengindikasikan bahwa sistem pemanenan energi mampu menyuplai daya yang cukup untuk melakukan pengisian secara bertahap. Durasi pengisian yang relatif stabil dan konsisten menunjukkan bahwa dalam rentang tersebut sistem mendapatkan pasokan energi yang memadai, terutama dari panel surya yang pada umumnya mencapai performa maksimal pada siang hingga sore hari.

C. Manajemen Daya

Pengujian manajemen daya dilakukan untuk menilai sejauh mana sistem dapat mengatur alokasi energi secara efisien dalam jaringan sensor. Fokus pengujian ini mencakup dua aspek utama, yaitu distribusi daya antar node sensor yang mencerminkan kemampuan sistem dalam menyalurkan energi sesuai kebutuhan, serta performa jaringan saat berada dalam kondisi daya rendah yang bertujuan untuk mengevaluasi kestabilan dan keberlanjutan operasi jaringan dalam situasi kritis.

TABEL 3
(KEBUTUHAN DAYA DALAM 1 HARI)

Komponen	Tegangan	Arus	Waktu aktif	Daya	Energi (Wh/Hari)
ESP32 (3)	5 V	160 mA	24 jam	1.09 W	26.16 W

ESP32 + Sensor (2)	5 V	175 mA	24 jam	0.81 W	19.44 W
Total				1.9 W	45.6 W

Berdasarkan GAMBAR 6 daya maksimum panel surya terjadi pada pukul 11:00 – 13:00 yaitu: 36.3 W. Panel menghasilkan daya secara signifikan selama 10 jam efektif (pukul 06:00 – 17:00) maka energi maksimum perhari = 36.3×0.4 (40 % efisiensi pwm solar charge controller) $\times 10$ jam = 145.2 W. Perbandingan energi yang dihasilkan dengan dibutuhkan bisa dilihat pada tabel TABEL 4.

TABEL 4
(PERBANDINGAN ENERGI)

Komponen	Nilai
Total energi dibutuhkan	45.6 Wh/hari
Total energi tersedia	145.2 Wh/hari
Surplus energi harian	99.6 Wh

Berdasarkan spesifikasi dari panel surya memiliki daya maksimum sebesar 50 W, dari data pengukuran pada waktu 06:00 – 17:00 total energi yang dihasilkan panel surya mencapai 145.2 Wh hari. Sementara sistem sensor yang terdiri dari tiga buah ESP32 dan dua ESP32 dengan sensor kelembaban tanah memiliki total kebutuhan energi sebesar 45.6 Wh per hari. Dengan demikian, sistem masih memiliki cadangan energi sebesar 99.6 Wh per hari yang dapat dialokasikan untuk pengisian baterai. Hal ini menunjukkan panel surya yang digunakan sangat memadai untuk menunjang kebutuhan operasional sistem WSN secara berkelanjutan.

D. Cakupan Jaringan

Untuk memastikan bahwa sistem mampu memantau area secara menyeluruh, dilakukan pengujian terhadap cakupan area jaringan sensor. Pengujian ini mencakup penilaian terhadap area cakupan efektif jaringan, yaitu sejauh mana node sensor dapat menjangkau dan memantau lingkungan secara optimal. Selain itu, dilakukan identifikasi terhadap area yang tidak terjangkau oleh jaringan, guna mengevaluasi potensi celah dalam sistem dan memberikan dasar perbaikan pada desain topologi jaringan sensor.

Dalam sistem jaringan sensor, cakupan jaringan menjadi parameter penting yang menentukan sejauh mana area dapat terpantau secara menyeluruh dan efektif. Untuk itu, perlu dilakukan pengujian terhadap area cakupan efektif jaringan guna mengetahui batas jangkauan aktual dari node sensor dalam kondisi operasional. Evaluasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa distribusi sensor telah mencakup wilayah yang diinginkan secara optimal tanpa adanya celah pemantauan.

TABEL 5
(KOMUNIKASI ANTAR NODE)

Jarak (Meter)	Ukuran Paket	Frekuensi Kirim	Total Paket Dikirim	Paket Hilang	Tingkat Kehilangan Paket

1	100	0.5 detik	100	0	0
5	100	0.5 detik	100	0	0
8	100	0.5 detik	100	0	0

Dalam hasil percobaan pada TABEL 5 parameter cakupan jaringan memiliki peran sentral dalam menentukan efektivitas pemantauan suatu wilayah. Evaluasi area cakupan menjadi penting guna memastikan bahwa penempatan node sensor telah mencakup seluruh wilayah target tanpa adanya celah pemantauan (monitoring gap) yang dapat mengganggu kontinuitas data atau mengurangi akurasi sistem secara keseluruhan.

Setelah dilakukan pengujian terhadap area cakupan efektif jaringan, langkah selanjutnya adalah mengidentifikasi area-area yang belum terjangkau oleh node sensor. Deteksi area tidak terjangkau ini penting untuk mengevaluasi potensi keterbatasan sistem dalam melakukan pemantauan menyeluruh, serta menjadi dasar dalam perbaikan atau penyesuaian distribusi node agar cakupan jaringan menjadi lebih optimal dan merata. Setelah dilakukan beberapa percobaan dapat disimpulkan bahwa untuk cakupan area rooftop kampus yang digunakan untuk pengujian, semua pengujian dilakukan tanpa ada kendala pengiriman data. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem wsn ini sangat efektif diimplementasikan pada area rooftop kampus.

E. Komunikasi Antar Node

Pengujian komunikasi antar node dilakukan untuk menilai keandalan sistem dalam mentransmisikan data di dalam jaringan sensor. Fokus utama pengujian ini adalah mengukur sejauh mana data dapat dikirimkan dari satu node ke node lainnya. Berdasarkan pengujian pada point area cakupan efektif jaringan bahwa komunikasi antar node sensor berhasil dan data dapat dikirim ke dalam data base Google Spreadsheet.

F. Kinerja Sistem

Untuk mengevaluasi kinerja keseluruhan sistem secara menyeluruh, dilakukan pengujian terhadap dua aspek penting yang menentukan efektivitas dan keberlanjutan operasional jaringan. Pertama, pengujian lifetime jaringan dalam berbagai skenario pemanenan energi bertujuan untuk mengetahui sejauh mana sistem dapat beroperasi dalam jangka waktu panjang dengan sumber energi yang tersedia. Kedua, pengujian terhadap kemampuan adaptasi sistem terhadap perubahan lingkungan dilakukan untuk menilai fleksibilitas dan ketangguhan jaringan dalam menghadapi kondisi yang dinamis di lapangan.

Lifetime atau masa pakai jaringan secara keseluruhan dalam konteks pemanenan energi sejauh mana sistem dapat mempertahankan fungsionalitas dan kestabilan operasional dalam jangka waktu tertentu, dengan mempertimbangkan efisiensi pemanenan energi, ketahanan komponen, dan strategi manajemen daya yang diterapkan.

TABEL 6
(DATA SISTEM WSN)

Waktu	Tegangan		Total Daya	Daya Node	Data Anggur

	Turbine	Tegangan Panel			Modus	Rata-rata
19/07/2025 16:00	0.23 V	13.04 V	2092 mW	605 mW	98	95.72
19/07/2025 16:30	0.14 V	13.01 V	2118 mW	582 mW	100	93.52
19/07/2025 17:00	0.15 V	12.92 V	2128 mW	593 mW	100	94.52
19/07/2025 17:30	0.45 V	12.58 V	2099 mW	591 mW	100	93.2

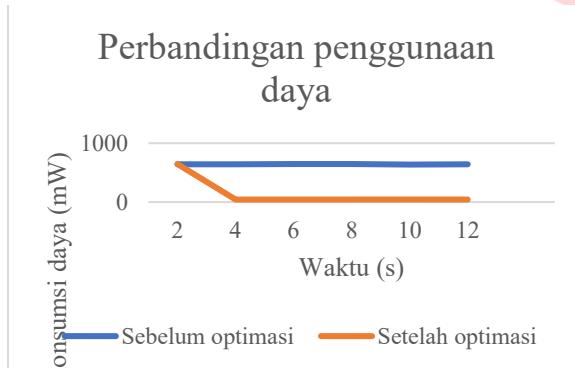
Berdasarkan data pengamatan yang dilakukan TABEL 6 pada pengambilan data dilakukan setiap 30 menit pada rentang waktu antara pukul 16:00 hingga 17:00. Tegangan panel surya menunjukkan konsistensi di kisaran 12.58 V hingga 13.04 V, sementara tegangan turbin angin tetap rendah yaitu antara 0.14 V hingga 0.45 V. Hal ini mengindikasikan bahwa panel surya menjadi contributor utama dalam sistem pemanenan energi. Total daya yang dihasilkan secara keseluruhan berkisar antara 2092 mW hingga 2128 mW dengan daya yang diserap oleh node sensor berkisar antara 582 mW hingga 605 mW.

G. Efisiensi Energi

Pengujian efisiensi energi pada sistem Wireless Sensor Network (WSN) yang dikembangkan untuk menganalisis perbandingan kinerja antara dua skenario pengiriman data dengan pendekatan manajemen daya yang berbeda. Skenario pertama menggunakan metode pengiriman data secara kontinyu tanpa penerapan mekanisme penghematan energi, sementara skenario kedua mengimplementasikan fitur deep sleep pada modul ESP32. Fitur deep sleep ini memungkinkan perangkat memasuki kondisi daya rendah selama interval tertentu yang bertujuan untuk menurunkan konsumsi energi tanpa mengorbankan kapabilitas komunikasi data. Penerapan fitur ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi pada sistem WSN yang merupakan aspek krusial dalam aplikasi sensor berbasis sumber daya terbatas. Melalui analisis komparatif antara kedua skenario tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi dampak penggunaan mode deep sleep terhadap efisiensi energi, serta mengkaji pengaruh strategi manajemen daya terhadap performa operasional dan keberlanjutan sistem WSN secara menyeluruh.

Bus Voltage: 5.10 V Shunt Voltage: 12.68 mV Load Voltage: 5.11 V Current: 127.00 mA Daya yang digunakan: 646.00 mW	Bus Voltage: 5.10 V Shunt Voltage: 12.68 mV Load Voltage: 5.11 V Current: 127.00 mA Daya yang digunakan: 646.00 mW
Bus Voltage: 5.16 V Shunt Voltage: 0.84 mV Load Voltage: 5.16 V Current: 8.40 mA Daya yang digunakan: 43.00 mW	Bus Voltage: 5.16 V Shunt Voltage: 0.84 mV Load Voltage: 5.16 V Current: 8.40 mA Daya yang digunakan: 43.00 mW
Bus Voltage: 5.16 V Shunt Voltage: 0.85 mV Load Voltage: 5.16 V Current: 8.40 mA Daya yang digunakan: 43.00 mW	Bus Voltage: 5.16 V Shunt Voltage: 0.85 mV Load Voltage: 5.16 V Current: 8.40 mA Daya yang digunakan: 43.00 mW
Bus Voltage: 5.16 V Shunt Voltage: 0.84 mV Load Voltage: 5.16 V Current: 8.40 mA Daya yang digunakan: 43.00 mW	Bus Voltage: 5.16 V Shunt Voltage: 0.84 mV Load Voltage: 5.16 V Current: 8.40 mA Daya yang digunakan: 43.00 mW
Bus Voltage: 5.16 V Shunt Voltage: 0.84 mV Load Voltage: 5.16 V Current: 8.40 mA Daya yang digunakan: 43.00 mW	Bus Voltage: 5.16 V Shunt Voltage: 0.84 mV Load Voltage: 5.16 V Current: 8.40 mA Daya yang digunakan: 43.00 mW
Bus Voltage: 5.16 V Shunt Voltage: 0.84 mV Load Voltage: 5.16 V Current: 8.40 mA Daya yang digunakan: 43.00 mW	Bus Voltage: 5.16 V Shunt Voltage: 0.84 mV Load Voltage: 5.16 V Current: 8.40 mA Daya yang digunakan: 43.00 mW

GAMBAR 7
(PENGUJIAN EFISIENSI WSN)



GAMBAR 8
(PERBANDINGAN PENGGUNAAN DAYA)

Berdasarkan hasil pengukuran terdapat pada GAMBAR 8 skenario tanpa optimasi menunjukkan konsumsi daya yang konsisten tinggi, yaitu berkisar antara 637 mW hingga 646 mW. Hal ini disebabkan oleh kondisi node sensor yang terus aktif selama proses pengiriman data berlangsung. Sebaliknya pada skenario dengan penerapan deep sleep konsumsi daya mengalami penurunan signifikan menjadi sekitar 43 – 44 mW saat node memasuki mode tidur dan hanya aktif saat melakukan transmisi data secara periodik.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan serangkaian pengujian yang telah dilakukan, sistem hybrid energy harvesting yang terdiri dari panel surya dan turbin angin secara umum mampu dalam menyediakan daya untuk WSN meskipun kontribusi kedua sumber tidak seimbang. Panel surya secara konsisten menjadi penyumbang utama daya dengan tegangan mencapai 18.03 V dan total energi harian hingga 145.2 Wh melampaui kebutuhan sistem sebesar 45.6 Wh per hari. Sementara itu turbin angin kurang optimal dengan tegangan rata-rata di bawah 1 V karena kecepatan angin di lokasi pengujian yang tidak mendukung. Tidak pernah terjadi switching otomatis ke sumber angin karena outputnya lebih rendah dibandingkan panel surya.

Berdasarkan hasil pengukuran, 100% daya yang digunakan sistem bersumber dari panel surya, karena output dari turbin angin tidak cukup untuk ke sistem pengisian baterai. Kontribusi dari panel surya yang sangat bergantung pada waktu dengan intensitas cahaya dengan output maksimal dicapai saat intensitas sinar matahari berada di kisaran 100.000 lux yaitu antara pukul 11.00 hingga 13.00. Sementara itu, turbin angin belum efektif dimanfaatkan karena kecepatan angin yang rendah. Keseimbangan kontribusi antara dua sumber energi dapat berubah tergantung pada kondisi cuaca, namun sistem tetap menjaga pasokan daya berkat peran panel surya dan pengaturan otomatis sumber berdasarkan tegangan tertinggi. Evaluasi ini menunjukkan bahwa sistem hybrid perlu disesuaikan dengan kondisi lingkungan dan penggunaan turbin angin akan lebih tepat di lokasi yang memiliki potensi angin yang stabil dan signifikan.

Efisiensi sistem dalam mengelola dan mendistribusikan daya antar node sensor terbukti cukup baik. Distribusi daya ke masing-masing node disesuaikan dengan mode operasionalnya yaitu deep sleep (sekitar 46-85 mW) dan mode aktif (sekitar 600 mW). Penyimpanan yang efisien memungkinkan pengisian baterai penuh dalam waktu sekitar 4 jam 15 menit hal ini sistem memiliki kinerja distribusi dan pengelolaan daya namun tetap memerlukan sumber daya yang mencukupi agar semua node dapat terus beroperasi.

Dengan sistem yang ada saat ini bisa menghasilkan total energi sampai 145.2 Wh mencukupi kebutuhan sistem sebesar 45.6 Wh per hari (25 Wh per 12 jam), dengan surplus energi mencapai 99.6 Wh sehingga bisa untuk pengisian baterai dengan kapasitas sebesar 96 Wh. Maka dengan demikian proses distribusi daya yang dihasilkan solar panel mencukupi daya yang dibutuhkan di saat siang hari, sedangkan di malam hari daya yang di perlukan oleh node sensor di salurkan melalui baterai.

REFERENSI

- [1] T. G. Agrinusa, A. Kurniawan, and A. Zaini, “Internet Of Things (IOT) untuk Pemantauan dan Pengendalian Urban Farming Menggunakan Metode Tanam dalam Ruang Berbasis Wireless Sensor Network,” Jurnal Teknik ITS, vol. 9, no. 1, 2020, doi: 10.12962/j23373539.v9i1.51952.
- [2] S. Dai, X. Li, C. Jiang, J. Ping, and Y. Ying, “Triboelectric nanogenerators for smart agriculture,” 2023. doi: 10.1002/inf2.12391.
- [3] M. M. Ahmad and F. U. Khan, “Review of vibration-based electromagnetic-piezoelectric hybrid energy harvesters,” 2021. doi: 10.1002/er.6253.
- [4] A. Prathima, D. S. Gurjar, H. H. Nguyen, and A. Bhardwaj, “Performance Analysis and Optimization of Bidirectional Overlay Cognitive Radio Networks with Hybrid-SWIPT,” IEEE Trans Veh Technol, vol. 69, no. 11, 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.3029067.
- [5] A. J. Williams, M. F. Torquato, I. M. Cameron, A. A. Fahmy, and J. Sienz, “Survey of Energy Harvesting Technologies for Wireless Sensor Networks,” IEEE Access, vol. 9, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3083697.
- [6] M. Adnan, L. Yang, T. Ahmad, and Y. Tao, “An Unequally Clustered Multi-hop Routing Protocol Based on

- Fuzzy Logic for Wireless Sensor Networks," IEEE Access, vol. 9, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3063097.
- [7] M. F. Moghadam, M. Nikooghadam, M. A. B. Al Jabban, M. Alishahi, L. Mortazavi, and A. Mohajerzadeh, "An Efficient Authentication and Key Agreement Scheme Based on ECDH for Wireless Sensor Network," IEEE Access, vol. 8, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2987764.
- [8] L. Jiang, Y. Yang, Y. Chen, and Q. Zhou, "Ultrasound-induced wireless energy harvesting: From materials strategies to functional applications," 2020. doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105131.
- [9] W. Osamy, A. A. El-Sawy, and A. Salim, "CSOCA: Chicken Swarm Optimization Based Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks," IEEE Access, vol. 8, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2983483.
- [10] K. N. Qureshi, M. U. Bashir, J. Lloret, and A. Leon, "Optimized Cluster-Based Dynamic Energy-Aware Routing Protocol for Wireless Sensor Networks in Agriculture Precision," J Sens, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/9040395.
- [11] O. R. Ahutu and H. El-Ocla, "Centralized Routing Protocol for Detecting Wormhole Attacks in Wireless Sensor Networks," IEEE Access, vol. 8, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2983438.
- [12] A. Mukherjee, D. K. Jain, P. Goswami, Q. Xin, L. Yang, and J. J. P. C. Rodrigues, "Back Propagation Neural Network Based Cluster Head Identification in MIMO Sensor Networks for Intelligent Transportation Systems," IEEE Access, vol. 8, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2971969.
- [13] Y. Han, G. Li, R. Xu, J. Su, J. Li, and G. Wen, "Clustering the Wireless Sensor Networks: A Meta-Heuristic Approach," IEEE Access, vol. 8, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3041118.
- [14] A. Khalifeh et al., "Wireless sensor networks for smart cities: Network design, implementation and performance evaluation," Electronics (Switzerland), vol. 10, no. 2, 2021, doi: 10.3390/electronics10020218.
- [15] R. Zagrouba and A. Kardi, "Comparative study of energy efficient routing techniques in wireless sensor networks," Information (Switzerland), vol. 12, no. 1, 2021, doi: 10.3390/info12010042.
- [16] Z. Tang, Y. Yang, and F. Blaabjerg, "Power electronics: The enabling technology for renewable energy integration," CSEE Journal of Power and Energy Systems, vol. 8, no. 1, 2022, doi: 10.17775/CSEEJPES.2021.02850.
- [17] R. Meka, A. Alaeddini, and K. Bhaganagar, "A robust deep learning framework for short-term wind power forecast of a full-scale wind farm using atmospheric variables," Energy, vol. 221, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.119759.
- [18] E. Simley, P. Fleming, and J. King, "Design and analysis of a wake steering controller with wind direction variability," Wind Energy Science, vol. 5, no. 2, 2020, doi: 10.5194/wes-5-451-2020.
- [19] E. M. Molla and C. C. Kuo, "Voltage Sag Enhancement of Grid Connected Hybrid PV-Wind Power System Using Battery and SMES Based Dynamic Voltage Restorer," IEEE Access, vol. 8, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3009420.
- [20] K. M. Kennedy et al., "The role of concentrated solar power with thermal energy storage in least-cost highly reliable electricity systems fully powered by variable renewable energy," Advances in Applied Energy, vol. 6, 2022, doi: 10.1016/j.adapen.2022.100091.
- [21] A. Satharasinghe, T. Hughes-Riley, and T. Dias, "An investigation of a wash-durable solar energy harvesting textile," Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 28, no. 6, 2020, doi: 10.1002/pip.3229.
- [22] Q. Zhang et al., "Shadow enhanced self-charging power system for wave and solar energy harvesting from the ocean," Nat Commun, vol. 12, no. 1, 2021, doi: 10.1038/s41467-021-20919-9.
- [23] Y. Du, "Method for the Optimal Sensor Deployment of WSNs in 3D Terrain Based on the DPSOVF Algorithm," IEEE Access, vol. 8, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3013106.
- [24] D. Thomas et al., "QoS-Aware Energy Management and Node Scheduling Schemes for Sensor Network-Based Surveillance Applications," IEEE Access, vol. 9, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3046619.
- [25] R. Sinde, F. Begum, K. Njau, and S. Kaijage, "Refining network lifetime of wireless sensor network using energy-efficient clustering and DRL-based sleep scheduling," Sensors (Switzerland), vol. 20, no. 5, 2020, doi: 10.3390/s20051540.
- [26] A. Singh, S. Sharma, and J. Singh, "Nature-inspired algorithms for Wireless Sensor Networks: A comprehensive survey," 2021. doi: 10.1016/j.cosrev.2020.100342.