

SMART SYSTEM UNTUK PEMANTAUAN DAN OPTIMASI KINERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA

Erlan Taneza dan Firdaus^{*)}

Magister Rekaya Elektro, Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14.5, Sleman, Yogyakarta 55584, Indonesia

^{*)}E-mail: 23925009@students.uii.ac.id, ^{*)}firdaus@uui.ac.id

Abstrak

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menjadi salah satu solusi utama dalam pemanfaatan energi terbarukan. Namun, tantangan dalam pemantauan, perawatan, dan optimasi kinerja PLTS tetap menjadi isu penting yang harus diatasi. Artikel ini mengeksplorasi peran *smart system* berbasis *Internet of Things (IoT)*, kecerdasan buatan (*AI*), dan *machine learning (ML)* dalam meningkatkan efisiensi operasional PLTS. Melalui *systematic literature review*, penelitian ini mengidentifikasi berbagai metode dan teknologi yang telah digunakan untuk pemantauan, deteksi, prediksi, dan optimasi kinerja PLTS. Hasil menunjukkan bahwa *smart system* dapat meningkatkan efisiensi pemantauan hingga 95%, akurasi prediksi kerusakan hingga 110,8%, dan output energi hingga 130% dibandingkan pendekatan manual-konvensional. Penggunaan teknologi ini memberikan solusi efektif dalam menghadapi tantangan operasional PLTS dan meningkatkan kinerja jangka panjangnya. Temuan ini menawarkan panduan praktis dan rekomendasi untuk pengembangan lebih lanjut dalam pengelolaan PLTS berbasis teknologi cerdas.

Kata kunci: Smart system, Optimasi, Efisiensi PLTS, Sistem Monitoring

Abstract

Solar Power Plants (PLTS) have become one of the primary solutions for harnessing renewable energy. However, challenges in monitoring, maintenance, and performance optimization remain critical issues that need to be addressed. This article explores the role of smart systems based on the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), and Machine learning (ML) in enhancing the operational efficiency of PLTS. Through a systematic literature review, this research identifies various methods and technologies used for monitoring, detection, prediction, and performance optimization of PLTS. The results demonstrate that smart systems can improve monitoring efficiency by up to 95%, fault prediction accuracy by 110.8%, and energy output by 130% compared to conventional manual approaches. The adoption of these technologies offers effective solutions to operational challenges in PLTS and enhances their long-term performance. These findings provide practical guidance and recommendations for further development in smart technology-driven PLTS management.

Keywords: Smart systems, Optimization, Efficiency of SPPs, Monitoring Systems

1. Pendahuluan

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu solusi utama dalam pemanfaatan energi terbarukan untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Dengan meningkatnya permintaan energi serta kebutuhan akan solusi yang ramah lingkungan, PLTS menawarkan potensi besar dalam penyediaan energi bersih dan berkelanjutan. Indonesia, dengan potensi energi surya yang sangat besar dan rata-rata intensitas radiasi matahari mencapai 4,8 kWh/m²/hari, menjadi salah satu negara dengan prospek pengembangan PLTS yang sangat menjanjikan. Potensi ini menciptakan peluang untuk meningkatkan kontribusi sektor energi terbarukan terhadap kebutuhan energi nasional [1] [2].

Namun, meskipun memiliki potensi besar, sistem PLTS menghadapi tantangan signifikan dalam hal pemantauan, perawatan, dan optimasi kinerjanya. Pengelolaan PLTS yang tidak optimal dapat mengakibatkan kerusakan pada panel surya, penurunan efisiensi, serta hilangnya potensi energi yang seharusnya dapat dimanfaatkan secara maksimal [3]. Masalah ini sebagian besar disebabkan oleh keterbatasan metode pemantauan konvensional, yang tidak mampu menyediakan data *real-time* secara menyeluruh dan memiliki keterbatasan dalam mendeteksi serta memperbaiki masalah secara dini [4]. Data menunjukkan bahwa efisiensi operasional PLTS konvensional dapat mengalami penurunan hingga 15-20% dibandingkan dengan potensi kinerjanya yang optimal [5].

Perkembangan teknologi seperti *smart system* yang mencakup *Internet of Things (IoT)*, *machine learning*, dan automasi telah menawarkan solusi inovatif untuk mengatasi tantangan tersebut [6]. Teknologi ini memungkinkan pemantauan *real-time* yang lebih efisien, optimasi kinerja yang lebih baik, serta perawatan yang lebih responsif terhadap potensi masalah [7] [8]. *IoT* mendukung integrasi sensor dan perangkat pintar untuk memantau kondisi panel surya, lingkungan, serta sistem distribusi energi secara berkelanjutan. Sementara itu, *machine learning* telah digunakan untuk memprediksi kinerja sistem PLTS dan mendeteksi anomali atau potensi kerusakan pada sistem lebih dini [9] [10] [11].

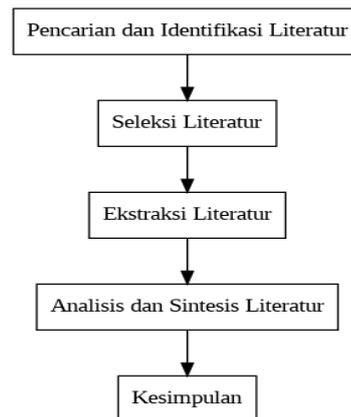
Penerapan teknologi *smart system* berbasis *Internet of Things (IoT)*, kecerdasan buatan (AI), dan *machine learning (ML)* telah terbukti mampu meningkatkan efisiensi operasional PLTS. Studi terbaru menunjukkan bahwa penggunaan *smart system* dapat meningkatkan efisiensi pemantauan hingga 95% dan mempercepat deteksi serta perbaikan kerusakan, yang berkontribusi pada peningkatan output energi. Penelitian oleh Tradacete-Ágreda et al. [4] menunjukkan bahwa penerapan *IoT* dalam pemantauan *real-time* dapat mengurangi waktu respons terhadap masalah hingga 50% dibandingkan dengan metode konvensional. Sementara itu, penelitian oleh Mehta [10] mengungkapkan bahwa pengintegrasian algoritma Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) dengan *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* dapat meningkatkan efisiensi produksi energi hingga 25% dalam kondisi lingkungan yang berubah-ubah. Meskipun teknologi *smart system* menawarkan potensi besar dalam meningkatkan efisiensi PLTS, tantangan dalam penerapannya, seperti kebutuhan untuk koneksi internet yang stabil, biaya awal yang tinggi, dan integrasi teknologi yang kompleks, perlu diatasi.

Studi literatur ini bertujuan untuk mengeksplorasi penerapan *smart system* dalam pemantauan dan optimasi kinerja PLTS dengan membaginya menjadi tiga kelompok utama: pemantauan, deteksi dan prediksi, serta optimasi. Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis sistematis terhadap implementasi *smart system* berbasis *IoT* dan AI yang mengintegrasikan berbagai teknologi untuk pemantauan *real-time*, deteksi dini kerusakan, dan optimasi output energi. Dengan pendekatan ini, penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi adaptif untuk meningkatkan efisiensi operasional PLTS dan mendukung pengembangan energi terbarukan yang lebih berkelanjutan.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan metode literature review untuk mengumpulkan dan menganalisis berbagai studi yang relevan dengan implementasi *smart system* dalam sistem pemantauan dan pengoptimalan PLTS. Pendekatan

ini bertujuan untuk mengidentifikasi, menilai, dan menyintesis hasil penelitian sebelumnya yang telah diterbitkan dalam jurnal-jurnal ilmiah serta konferensi yang berkaitan dengan *smart system* dan PLTS. Metode literature review dipilih karena mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai perkembangan teknologi yang telah diterapkan serta potensi inovasi di masa depan. Tahapan-tahapan systematic literature review dalam studi ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Systemtic Literatur Review

2.1. Pengumpulan Literatur

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur dengan tujuan untuk menganalisis dan menyusun temuan dari berbagai jurnal serta artikel ilmiah terkait penggunaan *smart system* dalam pemantauan dan optimasi kinerja PLTS. Metode studi literatur dipilih karena memungkinkan peneliti untuk mengumpulkan, meninjau, dan menganalisis data sekunder dari berbagai sumber ilmiah yang relevan dengan topik. Proses studi literatur mencakup tahapan pencarian, seleksi, dan evaluasi hasil penelitian terdahulu yang membahas implementasi *smart system*, seperti *IoT*, *machine learning*, dan automasi dalam konteks PLTS.

Proses pengumpulan literatur dilakukan melalui akses ke database ilmiah seperti *Google Scholar*, *ScienceDirect*, dan *Crossref*. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian artikel meliputi "*Smart System*", "*Internet of Things*", "Pemantauan Pembangkit Listrik Tenaga Surya", "Optimasi Kinerja PLTS", "Sistem Monitoring *Real-time*", dan "Efisiensi PLTS". Artikel yang dipilih harus memenuhi kriteria seleksi, seperti diterbitkan dalam rentang waktu 5 tahun terakhir dan memiliki relevansi tinggi dengan topik *smart system*, *IoT*, serta optimasi kinerja PLTS. Data yang dikumpulkan berasal dari artikel jurnal yang memenuhi kriteria tersebut.

Data yang diekstraksi dari literatur akan dianalisis dan disintesis untuk mengidentifikasi pola serta keunggulan berbagai strategi *smart system* yang telah diterapkan

dalam penelitian sebelumnya. Analisis dilakukan secara kualitatif dengan mengelompokkan temuan berdasarkan jenis teknologi dan metode yang digunakan, serta membandingkan efektivitas masing-masing teknologi. Berdasarkan hasil sintesis data, kesimpulan disusun untuk merangkum temuan utama terkait penerapan *smart system* dalam pemantauan dan optimasi kinerja PLTS. Selain itu, rekomendasi akan diberikan untuk penerapan praktis serta arah penelitian di masa depan.

2.2. Seleksi Literatur

Proses seleksi dilakukan dengan dua tahap: pertama, menilai kesesuaian abstrak dan judul untuk memastikan relevansi; kedua, mengevaluasi metodologi dan hasil penelitian dalam teks penuh. Artikel yang tidak memenuhi kriteria kualitas, seperti kurangnya data empiris atau analisis yang tidak mendalam, dikeluarkan dari studi ini. Dari hasil penelusuran, diperoleh 40 artikel yang membahas PLTS dan telah diseleksi. Data tersebut ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pencarian literatur dari database ilmiah

No.	Database	Jumlah Artikel Awal
1	Google Scholar	18
2	ScienceDirect	15
3	Crossref	7
Total		40

2.3. Ekstraksi Literatur

Proses ekstraksi data dalam penelitian ini dilakukan secara sistematis untuk memastikan bahwa setiap informasi relevan dari artikel yang dipilih dapat diidentifikasi dan disintesis secara komprehensif. Data diekstraksi dari setiap artikel dengan fokus pada beberapa elemen utama, seperti jenis teknologi yang digunakan, parameter yang dianalisis, metodologi yang diterapkan, dan hasil utama yang dilaporkan. Proses ini diawali dengan membaca teks penuh artikel untuk memastikan kesesuaian isi dengan fokus penelitian. Setiap artikel dianalisis menggunakan pendekatan berbasis kategori. Artikel yang terkait dengan *smart system* untuk PLTS dikelompokkan ke dalam tiga kategori utama: pemantauan, deteksi dan prediksi, serta optimasi. Data kemudian diorganisasikan dalam tabel untuk memudahkan analisis komparatif. Misalnya, untuk kategori pemantauan, informasi seperti jenis sensor yang digunakan (misalnya, sensor suhu, kelembapan, atau intensitas cahaya), metode transmisi data (WiFi, LoRa, atau Bluetooth), dan platform penyimpanan data (cloud atau lokal) dicatat secara terstruktur. Dari hasil penelusuran, diperoleh 40 artikel yang membahas PLTS dan telah diseleksi. Data tersebut ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 2. Hasil Pencarian Literatur

No.	Kategori	Jumlah Artikel
1	Pemantauan	12
2	Deteksi dan Prediksi	15
3	Optimasi	13
Total		40

2.4. Sintetis Literatur

Data yang telah diekstraksi kemudian disintesis untuk mengidentifikasi pola, tren, serta keunggulan dan kelemahan dari setiap metode yang dianalisis. Sintesis ini dilakukan dengan mengelompokkan informasi berdasarkan kategori penelitian seperti pemantauan, deteksi dan prediksi, serta optimasi. Pendekatan ini membantu dalam memahami bagaimana teknologi berbeda diterapkan, efektivitasnya dalam konteks PLTS, serta gap penelitian yang ada untuk pengembangan lebih lanjut.

Selanjutnya, laporan akhir disusun untuk merangkum temuan utama terkait berbagai strategi peningkatan kinerja sistem fotovoltaik, serta memberikan rekomendasi untuk implementasi praktis dan arahan penelitian di masa depan. Laporan ini bertujuan untuk memberikan wawasan yang komprehensif tentang bagaimana teknologi *smart system* dapat diintegrasikan secara efektif dalam pengelolaan PLTS, mengatasi tantangan yang ada, dan meningkatkan efisiensi serta kinerja operasional sistem.

Proses analisis data dilakukan dengan mengidentifikasi pola dan tren dalam penggunaan teknologi. Setiap temuan dibandingkan berdasarkan efektivitas teknologi yang digunakan, seperti efisiensi pemantauan real-time, akurasi deteksi, dan kemampuan optimasi output energi. Analisis kualitatif dilakukan untuk mengelompokkan teknologi berdasarkan keunggulan dan tantangannya, misalnya potensi peningkatan efisiensi energi dan biaya awal yang diperlukan.

Selain itu, data kuantitatif yang dilaporkan dalam artikel, seperti persentase peningkatan efisiensi misalnya, 95% untuk pemantauan real-time atau tingkat akurasi prediksi seperti 94% menggunakan algoritma LSTM, digunakan untuk membandingkan hasil antar studi. Analisis ini didukung dengan referensi empiris dari studi-studi sebelumnya untuk memastikan validitas temuan.

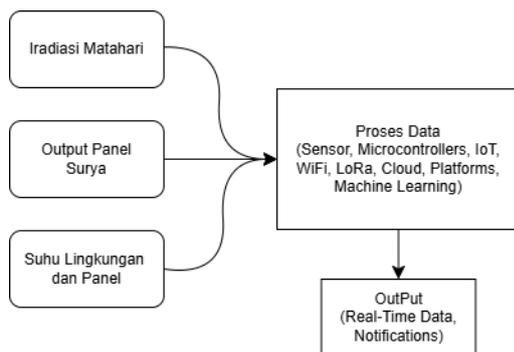
Studi ini bertujuan untuk mengeksplorasi penerapan sistem cerdas dalam pemantauan dan optimasi kinerja PLTS dengan membaginya menjadi tiga kategori utama: pemantauan, deteksi dan prediksi, serta optimasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana teknologi berbasis *Internet of Things (IoT)* dan kecerdasan buatan (AI) dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas operasional PLTS di Indonesia, sambil mempertimbangkan tantangan dalam integrasi teknologi

cerdas dan biaya implementasinya. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan wawasan tentang strategi terbaik untuk meningkatkan kinerja PLTS melalui teknologi smart system, serta memberikan rekomendasi untuk implementasi praktis dan arahan penelitian di masa depan yang mendukung pengembangan energi terbarukan yang berkelanjutan.

3. Hasil dan Analisis

Hasil studi literatur ini mengidentifikasi 40 artikel yang relevan dengan penerapan *smart system* untuk pemantauan dan optimasi kinerja PLTS. Artikel-artikel ini dikelompokkan ke dalam tiga kategori utama, yaitu: Pemantauan (12 artikel), Deteksi dan Prediksi (15 artikel), serta Optimasi (13 artikel). Pengelompokan ini mencerminkan fokus utama penelitian terkait pengelolaan PLTS berbasis teknologi cerdas. Studi literatur ini menegaskan bahwa teknologi smart system, khususnya yang berbasis *IoT* dan *machine learning*, memberikan solusi yang signifikan untuk mengatasi tantangan dalam pengelolaan PLTS. Teknologi ini memungkinkan pemantauan yang lebih mendalam, prediksi yang lebih akurat, dan optimasi yang lebih efisien dibandingkan metode konvensional. Namun, terdapat tantangan yang perlu diperhatikan, seperti biaya awal yang tinggi, kebutuhan infrastruktur teknologi yang memadai, dan adaptasi terhadap kondisi operasional lokal. Dengan demikian, hasil ini memberikan arah yang jelas untuk pengembangan lebih lanjut, terutama dalam menciptakan solusi yang lebih terjangkau dan adaptif terhadap berbagai kondisi lingkungan.

3.1. Teknologi Pemantauan untuk Sistem PLTS



Gambar 2. Diagram Blok Sistem Pemantauan PLTS

Teknologi *IoT* diterapkan untuk pemantauan *real-time* terhadap kondisi panel surya dan lingkungan sekitarnya. Sensor yang terintegrasi mengumpulkan data mengenai intensitas cahaya, suhu, dan output energi yang dihasilkan. Data dari sensor-sensor tersebut diproses oleh mikrokontroler dan kemudian dikirim ke platform *cloud* melalui jaringan WiFi atau LoRa, sebagaimana ditunjukkan pada Blok Diagram Gambar 2.

Teknologi pemantauan berbasis *Internet of Things (IoT)* memberikan kemudahan dalam pengumpulan data secara *real-time* untuk berbagai parameter kritis pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), seperti suhu panel, intensitas cahaya, kelembapan lingkungan, dan output energi. Integrasi sensor dengan platform berbasis *cloud* tidak hanya memungkinkan akses data secara langsung, tetapi juga meningkatkan visibilitas operasional dan mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat. Misalnya, studi yang dilakukan oleh Tradacete-Ágreda et al. mengungkapkan bahwa penerapan teknologi *IoT* dapat mengurangi waktu respons terhadap anomali hingga 50% dibandingkan metode pemantauan manual. Hal ini menunjukkan potensi *IoT* dalam meningkatkan efisiensi pengelolaan PLTS [4]. Di daerah terpencil, tantangan infrastruktur sering menjadi kendala dalam penerapan teknologi pemantauan. Namun, penggunaan jaringan LoRa (*Long Range*) telah membuktikan kemampuannya untuk memastikan pengumpulan data yang konsisten meskipun infrastruktur internet yang memadai tidak tersedia. LoRa memungkinkan perangkat *IoT* untuk berkomunikasi dalam jarak jauh dengan konsumsi daya yang rendah, sehingga cocok untuk kondisi geografis yang sulit dijangkau. Meski begitu, beberapa tantangan seperti gangguan sinyal, interferensi, atau masalah kompatibilitas perangkat *IoT* masih dapat menghambat kinerja sistem. Untuk mengatasi hal ini, pengembangan solusi tambahan seperti penerapan jaringan mesh dapat membantu meningkatkan redundansi komunikasi dan keandalan sistem. Jaringan mesh memungkinkan setiap perangkat berfungsi sebagai node yang saling terhubung, sehingga data tetap dapat diteruskan meskipun salah satu node mengalami gangguan. Secara keseluruhan, integrasi teknologi *IoT* dalam pemantauan PLTS membuka peluang besar untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan daya guna sistem secara keseluruhan. Tabel 3 menyajikan ringkasan berbagai implementasi teknologi pemantauan berbasis *IoT* pada PLTS dari sejumlah penelitian, yang mencakup keunggulan, tantangan, serta solusi yang diterapkan di berbagai skenario operasional.

Berdasarkan Teknologi pemantauan pada PLTS yang diuraikan dalam Tabel 3 menunjukkan variasi perangkat keras, parameter yang dipantau, dan metode pengiriman data yang digunakan. Sensor seperti sensor irradiance, suhu, kelembapan, dan pyranometer memainkan peran kunci dalam menyediakan data lingkungan yang relevan untuk menganalisis efisiensi sistem. Sistem berbasis *IoT* yang memanfaatkan perangkat seperti NodeMCU, ESP8266, dan Arduino memastikan pengolahan data yang efisien dan integrasi yang fleksibel ke platform *cloud* seperti ThinkSpeak dan Firebase.

Keunggulan teknologi pemantauan berbasis *IoT* terletak pada kemampuannya untuk menyediakan data *real-time*, yang memungkinkan operator PLTS untuk segera mengidentifikasi dan menangani masalah sebelum terjadi

kerusakan besar. Sebagai contoh, Tradacete-Ágreda et al. menunjukkan bahwa penggunaan sensor *IoT* dapat mengurangi waktu respons hingga 50%, memberikan manfaat langsung berupa peningkatan efisiensi operasional.

pada kemampuan operator untuk mengelola data yang dihasilkan, memastikan interoperabilitas perangkat keras, dan mengatasi tantangan infrastruktur. Dengan pendekatan yang tepat, teknologi ini dapat berkontribusi signifikan pada keberlanjutan dan efisiensi operasional PLTS.

Tabel 3. Penelitian Terkait Teknolgi Pemantauan PLTS

No	Pemantauan	Parameter yang Dipantau	Sensor	Pengiriman Data	Penyimpanan Data
1	Kondisi Lingkungan	Suhu (Panel Surya, Lingkungan), Kelembapan Relatif, Intensitas Cahaya	Sensor irradiance, sensor suhu, sensor kelembapan, Pyranometer, BME680 [12] NodeMCU, BH1750, DHT11, INA219, LM35, Arduino Uno, Modul WiFi ESP8266, Sensor Intensitas Cahaya GY-49	WiFi, BLE WiFi	Cloud [4] Cloud [1], (ThinkSpeak)[16], Google Firebase [17], Blynk [2]
2	Kinerja Panel Surya	Arus, Tegangan, Daya, Energi Listrik	Sensor Arus, Sensor Tegangan, Sensor Daya, Modul INA219, Sensor Suhu LM35DZ Esp32, LDR sensor, sensor INA2019 [13], PZEM-017, Node MCU esp8266 [14], Sensor Tegangan, Modul Ethernet Shield W5100 Arduino Uno [15]	Jaringan Data (LAN)	Penyimpanan terpusat di server, SD Card Memory [18]
3	Kinerja Sistem	Sudut Pergerakan, Faktor Daya, Nilai Pembayaran, Kondisi Sistem, Yield/Produktivitas Inverter, Karakteristik Kurva Arus-Tegangan	PZEM 004T, Relay Driver Module, Arduino, Node MCU esp8266 [6]	WiFi, LoRa	Server lokal, Web server (Blynk <i>IoT</i>) [19]

Namun, terdapat beberapa tantangan utama dalam implementasi teknologi ini, terutama di daerah dengan infrastruktur jaringan yang terbatas. Meskipun teknologi seperti LoRa dapat digunakan untuk mengatasi kendala ini, penggunaannya sering kali terbatas oleh jangkauan transmisi dan kecepatan data. Selain itu, integrasi perangkat keras yang berbeda memerlukan keahlian teknis yang memadai, yang dapat menjadi kendala di lokasi terpencil atau bagi operator yang kurang berpengalaman.

Dalam konteks keamanan data, penggunaan platform berbasis *cloud* juga menimbulkan risiko tertentu, seperti potensi kebocoran data atau serangan siber. Oleh karena itu, implementasi langkah-langkah keamanan seperti enkripsi data dan autentikasi multi-faktor sangat penting untuk memastikan integritas sistem. Lebih lanjut, efisiensi pemantauan yang tinggi juga memberikan dampak langsung pada optimasi kinerja sistem PLTS. Misalnya, data yang diperoleh dari sensor dapat digunakan untuk menyesuaikan posisi panel surya secara dinamis menggunakan teknologi seperti dual-axis tracker, yang dapat meningkatkan efisiensi energi hingga 130%. Selain itu, data lingkungan seperti intensitas cahaya dan suhu dapat membantu mengidentifikasi pola degradasi panel surya, memungkinkan perawatan preventif dilakukan secara tepat waktu. Secara keseluruhan, teknologi pemantauan berbasis *IoT* menawarkan solusi yang menjanjikan untuk mengatasi keterbatasan metode konvensional. Namun, keberhasilannya sangat tergantung

3.2. Teknologi Deteksi dan Prediksi untuk Sistem PLTS

Deteksi dan prediksi merupakan aspek kunci dalam mencegah kerusakan pada PLTS. Algoritma *machine learning* seperti Random Forest Regression (RFR) dan Long Short-Term Memory (LSTM) terbukti mampu meningkatkan akurasi prediksi produksi energi hingga 94% [20]. Selain itu, penelitian oleh Mehta et al. (2024) [10] menyoroti bahwa penggabungan algoritma ML dengan model cuaca lokal dapat mengurangi ketidakpastian produksi energi akibat variabilitas cuaca. Algoritma prediksi ini dapat membantu menentukan waktu yang paling optimal untuk perawatan serta memberikan estimasi produksi energi harian atau bulanan.

Integrasi teknologi deteksi dan prediksi dalam PLTS berkontribusi pada optimalisasi pemanfaatan energi surya. Dengan adanya sistem pemantauan cerdas, operator dapat melakukan penyesuaian otomatis terhadap operasi sistem PLTS, sehingga meminimalkan waktu henti (*downtime*) dan meningkatkan efisiensi produksi energi. Selain itu, prediksi yang akurat juga mendukung manajemen energi yang lebih efektif, terutama ketika dikombinasikan dengan penyimpanan energi atau disinkronkan dengan jaringan listrik untuk menjaga stabilitas pasokan energi. Tabel 4 menyajikan rangkuman hasil penelitian dari berbagai peneliti terkait penerapan teknologi deteksi dan prediksi dalam sistem PLTS.

Tabel 4. Penelitian Terkait Teknologi Deteksi dan Prediksi Pada PLTS

No	Prediksi	Deteksi	Metode
1	Prediksi produksi energi surya	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Iradiasi matahari 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Model ARIMA [21]
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Suhu ambient, kelembapan, dan radiasi matahari ▪ Sudut kemiringan, akumulasi debu 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Support Vector Machine Regression (SVMR), multivariate regression, dan Gaussian regression [9] ▪ Metode Random Forest Regressor, Gradient Boosting Regressor [22] ▪ Model Jaringan Saraf Tiruan (ANN) [11] [23] ▪ Algoritma pembelajaran mesin, khususnya Random Forest Regression (RFR), Gradient Boosting Trees (GBT), Linear Regression (LR), dan Decision Tree Regression (DTR) [24]
2	Kesalahan (faults) dalam sistem fotovoltaik (PV)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Soiling loss dan rasio kinerja 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Deep learning yang terdiri dari ANN, RNN, dan CNN. [25] ▪ Algoritma Light Gradient Boosting Machine (Light GBM) yang dikombinasikan dengan teknik Decision Trees. [3]
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kondisi cuaca dan daya PLTS ▪ Panel fotovoltaik dan hot spot ▪ cuaca mendung, bayangan, dan dedaunan yang menghalangi panel surya ▪ Penurunan daya output rata-rata ▪ Suhu kabel (dalam °C), Tegangan keluaran sensor, Batas suhu maksimum, Tegangan input/output catu daya 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Teknik pemantauan udara yang dikombinasikan dengan jaringan syaraf konvolusional (CNN) [7] ▪ Menggunakan algoritma K-Nearest Neighbors (KNN) [26] ▪ Perancangan alat pembersih portable yang didasarkan pada prinsip mekanika [27] ▪ Perancangan sistem proteksi termal pada kabel daya panel surya dengan memanfaatkan sensor suhu LM35 dan mikrokontroler AVR ATmega 8 [28]
3	Manajemen energi	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Potensi energi solar, Cuaca, iradiasi surya, Pola konsumsi energi listrik 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Integrasi Jaringan Syaraf Tiruan (ANN), sistem fotovoltaik (PV), dan metode Delphi klasik. [29]
4	Iradiasi matahari	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Learning rate dan arsitektur jaringan. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Jaringan Syaraf Tiruan (JST) model Multi-Layer Perceptron [30]
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Long Short-Term Memory (LSTM) [31]

Berdasarkan Tabel 4, berbagai metode telah diterapkan untuk prediksi dan deteksi dalam sistem energi surya, manajemen konsumsi energi, serta pemantauan kesalahan (*faults*) pada sistem PLTS. Dalam prediksi produksi energi surya, model regresi seperti ARIMA, *Support Vector Machine Regression (SVMR)*, dan Gaussian Regression sering digunakan karena kemampuan mereka dalam menganalisis data multivariat dan deret waktu. Selain itu, algoritma ensemble seperti *Random Forest Regressor (RFR)* dan *Gradient Boosting Regressor (GBR)* sangat andal dalam menangkap pola kompleks dari data lingkungan yang fluktuatif. Metode berbasis deep learning, seperti *Artificial Neural Networks (ANN)*, *Recurrent Neural Networks (RNN)*, dan *Convolutional Neural Networks (CNN)*, telah terbukti mampu mengidentifikasi pola non-linear dengan akurasi tinggi, termasuk dalam mendeteksi soiling loss dan rasio kinerja panel surya.

Dalam deteksi kesalahan pada PLTS, algoritma seperti *Light Gradient Boosting Machine (LightGBM)* dan *K-Nearest Neighbors (KNN)* digunakan untuk mengidentifikasi kerusakan yang disebabkan oleh faktor lingkungan, seperti bayangan, akumulasi debu, atau perubahan suhu. Metode ini memungkinkan pengelola sistem untuk mendeteksi dan mengatasi masalah secara proaktif, sehingga meminimalkan *downtime*.

Di sisi lain, manajemen konsumsi energi, khususnya dalam konteks kota pintar, telah mengintegrasikan ANN dengan PLTS serta metode Delphi klasik untuk memprediksi potensi energi surya dan pola konsumsi energi. Pendekatan ini mendukung strategi distribusi energi yang lebih efektif dan efisien. Untuk prediksi iradiasi matahari, metode *deep learning* seperti *Long Short-Term Memory (LSTM)* dan *Multi-Layer Perceptron (MLP)* menjadi pilihan unggulan karena kemampuannya dalam memproses data deret waktu yang kompleks dengan ketergantungan temporal, menghasilkan prediksi yang akurat dan relevan untuk pengelolaan energi berbasis data.

Setiap metode prediksi dan deteksi memiliki kelebihan dan tantangan. Model regresi seperti ARIMA, SVMR, dan Gaussian Regression memberikan hasil andal pada data linier dan multivariat, tetapi kurang efektif untuk data non-linear dan rentan terhadap outlier. Algoritma ensemble seperti RFR dan GBR menawarkan akurasi tinggi dan ketahanan terhadap overfitting, meskipun memerlukan waktu pelatihan dan sumber daya komputasi yang lebih besar. Deep learning seperti ANN, RNN, dan CNN mampu menangani data dalam jumlah besar dan pola non-linear yang kompleks, tetapi membutuhkan dataset yang besar, proses pelatihan yang memakan waktu, dan sulit untuk diinterpretasikan.

Tantangan utama dalam penerapan metode ini meliputi kebutuhan akan dataset berkualitas tinggi, sumber daya komputasi yang cukup, dan tuning parameter yang kompleks, terutama untuk model seperti *LSTM*. Kurangnya data historis yang mencakup berbagai kondisi lingkungan juga menjadi kendala dalam mencapai hasil yang optimal. Selain itu, pendekatan *deep learning* sering kali sulit diinterpretasikan, yang dapat menghambat pengambilan keputusan operasional.

Sebagai solusi, pengembangan model hybrid yang menggabungkan algoritma seperti *RFR* dengan *LSTM* atau *CNN* dapat memaksimalkan keunggulan masing-masing metode, meningkatkan akurasi prediksi sambil mempertahankan efisiensi komputasi. Integrasi teknologi edge computing juga dapat memproses data secara lokal, mengurangi ketergantungan pada *cloud*, dan meningkatkan responsivitas sistem, terutama di lokasi terpencil. Selain itu, penyediaan dataset terbuka dengan cakupan kondisi lingkungan yang beragam menjadi langkah strategis untuk mendukung pengembangan model yang lebih adaptif.

Meskipun metode prediksi dan deteksi berbasis *machine learning* dan *deep learning* menunjukkan potensi besar, keberhasilan implementasinya sangat bergantung pada pengelolaan data yang efektif, pemilihan metode yang tepat, dan infrastruktur teknologi yang memadai. Dengan mitigasi terhadap tantangan yang ada, teknologi ini dapat memberikan dampak signifikan dalam meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi *downtime*, dan mendukung transisi menuju energi terbarukan yang andal dan berkelanjutan.

3.3. Teknologi Optimasi untuk Sistem PLTS

Proses optimasi ini mencakup berbagai pendekatan teknis dan algoritmik yang dirancang untuk meningkatkan kinerja panel surya, sehingga PLTS dapat menghasilkan daya maksimal meskipun dalam kondisi lingkungan yang bervariasi. Pendekatan ini bertujuan untuk memastikan bahwa energi yang dihasilkan oleh panel surya dapat dimanfaatkan secara optimal dalam berbagai situasi operasional.

Salah satu metode optimasi yang paling banyak digunakan adalah *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*. Teknologi *MPPT*, khususnya yang dikombinasikan dengan algoritma *Incremental Conductance (IC)*, telah terbukti mampu meningkatkan output energi hingga 25% pada kondisi radiasi matahari yang fluktuatif [32]. Pendekatan ini memungkinkan panel surya untuk secara otomatis menyesuaikan titik daya maksimum berdasarkan perubahan intensitas cahaya, sehingga kinerja panel tetap optimal. Selain itu, pendekatan berbasis kecerdasan buatan (AI), seperti *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)*, juga telah menunjukkan keunggulan dalam memberikan hasil

optimasi yang lebih stabil. *ANFIS* memanfaatkan kemampuan pembelajaran adaptif untuk menyesuaikan parameter operasional PLTS secara dinamis, menjadikannya lebih efektif dalam menghadapi kondisi lingkungan yang kompleks. Namun, pendekatan ini memiliki keterbatasan, seperti kebutuhan daya komputasi yang tinggi serta kompleksitas integrasi teknologi.

Pada sistem PLTS yang terhubung dengan jaringan listrik (*grid-connected*), optimasi tidak hanya terbatas pada peningkatan efisiensi panel, tetapi juga melibatkan manajemen energi cerdas. PLTS dapat bekerja secara sinergis dengan sistem penyimpanan energi, seperti baterai, untuk menyimpan energi berlebih saat produksi energi tinggi dan melepaskannya ketika permintaan energi meningkat. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada sumber energi konvensional tetapi juga meningkatkan stabilitas jaringan listrik. Tabel 5 menyajikan rangkuman berbagai teknologi optimasi yang telah diterapkan dalam sistem PLTS berdasarkan studi dan penelitian terkini.

Berdasarkan Tabel 5, aspek yang dioptimasi dalam sistem energi surya mencakup pelacakan surya, efisiensi panel, kontrol suplai beban, optimasi energi terdistribusi, pemilihan lokasi optimal, prediksi daya PV jangka pendek, optimasi ukuran sistem PLTS dan EV, serta pengendalian sistem penyimpanan energi baterai (*BESS*). Pelacakan surya menggunakan teknologi *dual-axis tracking (DAST)* dengan sensor LDR, mikrokontroler *IoT*, dan algoritma *MPPT* serta *Incremental Conductance (IC)* menunjukkan kemampuan luar biasa dalam memaksimalkan penerimaan cahaya matahari. Metode ini memungkinkan panel surya untuk secara aktif menyesuaikan orientasi terhadap matahari sehingga memastikan penerimaan radiasi maksimum sepanjang hari. Peningkatan efisiensi yang signifikan tercapai, meskipun sistem ini memiliki kompleksitas mekanis tinggi dan membutuhkan investasi awal yang besar, terutama untuk penerapan dalam skala luas.

Efisiensi panel surya dioptimasi melalui pemantauan parameter seperti intensitas cahaya, resistansi LDR, nilai *fill factor*, dan suhu lingkungan menggunakan mikrokontroler Arduino. Solusi ini memberikan alternatif yang hemat biaya untuk meningkatkan performa panel surya, terutama pada skala kecil hingga menengah. Namun, tantangan yang muncul adalah sensitivitas sistem terhadap kondisi lingkungan, seperti akumulasi debu atau perubahan suhu yang drastis, sehingga diperlukan pemantauan tambahan untuk menjaga efisiensi jangka panjang. Dalam hal distribusi energi, kontrol suplai beban dioptimalkan melalui metode *Pulse Width Modulation (PWM)* yang dikombinasikan dengan *Real Time Clock (RTC)*. Teknologi ini menawarkan efisiensi tinggi dalam manajemen beban dan distribusi daya, tetapi tantangan berupa noise elektromagnetik yang dapat memengaruhi perangkat lain dalam jaringan masih memerlukan solusi teknis yang efektif.

Tabel 5. Penelitian Terkait Optimasi Pada PLTS

Aspek	Metode Konvensional	Smart system (IoT dan Machine learning)	Efektivitas Peningkatan (%)
Pemantauan Kinerja	Manual, tidak real-time	Pemantauan <i>real-time</i> melalui IoT	95% (peningkatan efisiensi pemantauan)
Prediksi Kerusakan	Inspeksi manual dan offline	Prediksi berbasis <i>machine learning</i> (Decision Tree, SVMR)	110.8% (akurasi prediksi lebih tinggi)
Perawatan Panel	Inspeksi manual tidak efisien	Deteksi otomatis dan prediksi kerusakan (anomaly detection)	Lebih dari 128% (efisiensi perawatan)
Optimalisasi Energi	Posisi panel statis, efisiensi terbatas	Sistem dual-axis tracker, optimasi posisi panel	130% (peningkatan output energi)
Pemeliharaan Sistem	Waktu respon lambat dan pemeliharaan reaktif	Pemeliharaan proaktif melalui deteksi dini	>68% (peningkatan kecepatan deteksi kerusakan)
Efisiensi Energi	Bergantung pada posisi tetap panel	Optimalisasi daya output dengan MPPT, IoT monitoring	56%-94% (peningkatan output daya)
Pengendalian Jarak Jauh	Tidak tersedia	Bisa dikendalikan jarak jauh via perangkat pengguna	100% (pengendalian jarak jauh efektif)
Stabilitas Sistem Distribusi	Fluktuasi arus dan daya tinggi	Stabilitas lebih baik dengan Battery Energy Storage System (BESS)	Waktu respons <0.5 detik (peningkatan stabilitas)

Optimasi energi terdistribusi mengevaluasi aspek biaya energi, modal awal, dan nilai energi surya menggunakan termostat pintar. Metode ini memungkinkan pengelolaan energi yang adaptif dan efisien, tetapi sangat bergantung pada stabilitas koneksi internet untuk mendukung integrasi teknologi pintar secara *real-time*. Sementara itu, pemilihan lokasi optimal untuk instalasi pembangkit listrik tenaga surya menggunakan metode *Geographic Information System (GIS)*, *Analytical Hierarchy Process (AHP)*, dan *Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)*. Pendekatan ini mempertimbangkan faktor-faktor seperti jarak ke kawasan perkotaan, radiasi matahari, suhu rata-rata, dan biaya lahan untuk memastikan lokasi dengan potensi produksi energi yang paling optimal. Namun, pelaksanaannya memerlukan keterampilan teknis yang tinggi serta data yang akurat dan komprehensif.

Prediksi daya PLTS jangka pendek dilakukan menggunakan metode hybrid *deep learning* yang menggabungkan algoritma *Kepler Optimization* dan *Transductive Transfer Learning*. Pendekatan ini terbukti memberikan tingkat akurasi yang sangat tinggi dalam memprediksi daya output berdasarkan pola data temporal. Meski demikian, model ini membutuhkan dataset yang besar dan kapasitas pemrosesan yang signifikan, yang menjadi tantangan di daerah dengan keterbatasan infrastruktur teknologi. Optimasi ukuran sistem PLTS dan Electric Vehicle (EV) dilakukan melalui skema pengisian daya pintar (*smart charging*) yang mempertimbangkan pola konsumsi energi, *self-consumption*, dan *self-sufficiency* untuk memaksimalkan efisiensi energi terbarukan.

Pengendalian sistem penyimpanan energi baterai (BESS) merupakan aspek yang sangat penting dalam menjaga stabilitas jaringan listrik, terutama pada sistem grid-connected. Dengan menganalisis parameter seperti arus feeder, daya aktif dan reaktif, serta state of charge (SoC), BESS dapat mengelola penyimpanan dan distribusi energi secara efisien. Teknologi ini memungkinkan penyimpanan energi berlebih selama produksi tinggi dan penggunaannya saat permintaan meningkat. Namun, tantangan utama dari teknologi ini adalah biaya implementasi yang tinggi, degradasi baterai dalam jangka panjang, serta kebutuhan akan perangkat manajemen yang kompleks.

Tabel 5 memberikan wawasan tentang potensi besar teknologi optimasi dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas sistem PLTS. Setiap metode menawarkan solusi spesifik untuk mengatasi tantangan dalam pengelolaan energi terbarukan, tetapi keunggulan ini diimbangi oleh tantangan teknis dan ekonomi yang memerlukan perhatian. Dengan pengembangan lebih lanjut, khususnya dalam menurunkan biaya implementasi, meningkatkan keandalan teknologi, dan memastikan adaptasi terhadap kondisi lokal, teknologi ini dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam mendukung transisi ke energi terbarukan yang berkelanjutan.

3.4. Implikasi Penggunaan Smart system pada Pengelolaan PLTS

Penerapan *smart system* dalam pengelolaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) membawa dampak yang signifikan terhadap peningkatan efisiensi operasional, optimasi produksi energi, dan manajemen perawatan yang lebih efektif. Sistem cerdas, yang mengintegrasikan teknologi seperti *Internet of Things (IoT)*, kecerdasan buatan (AI), dan *machine learning (ML)*, memungkinkan pengelolaan PLTS yang lebih responsif terhadap perubahan kondisi operasional dan lingkungan. Dengan mengadopsi teknologi ini, PLTS tidak hanya mampu

meningkatkan output energi secara signifikan, tetapi juga dapat mengurangi kerugian akibat kerusakan atau ketidaksesuaian operasional yang tidak terdeteksi dalam waktu yang tepat.

IoT memainkan peran penting dalam menyediakan pemantauan *real-time* terhadap berbagai parameter penting seperti intensitas cahaya, suhu, kelembapan, dan kondisi panel surya. Data yang dikumpulkan oleh sensor *IoT* ini kemudian diproses secara *real-time*, memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai kinerja sistem. Dengan pemantauan yang lebih mendalam dan akurat, operator PLTS dapat mengidentifikasi potensi masalah lebih awal dan melakukan perbaikan preventif atau korektif sebelum masalah berkembang menjadi lebih besar. Selain itu, penggunaan teknologi seperti *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* dan *Incremental Conductance (IC)* yang diintegrasikan dengan algoritma *smart system* memungkinkan penyesuaian daya output secara dinamis, sesuai dengan kondisi cahaya dan suhu, sehingga panel surya selalu beroperasi pada titik daya maksimum.

Di sisi lain, AI dan *machine learning* memberikan kemampuan prediksi yang luar biasa dalam memantau dan menganalisis data historis untuk memperkirakan kinerja sistem di masa depan. Algoritma prediksi berbasis AI, seperti *Random Forest* dan *Support Vector Machines (SVM)*, dapat memproses data dari berbagai sensor untuk memprediksi potensi kerusakan atau penurunan kinerja panel surya, seperti akibat degradasi atau soiling (penumpukan debu). Prediksi ini sangat membantu dalam menentukan waktu yang tepat untuk perawatan atau penggantian komponen, sehingga mengurangi *downtime* dan biaya perawatan yang tidak terduga.

Penerapan *smart system* juga berkontribusi pada perawatan preventif dan prediktif. Berbeda dengan pendekatan manual-konvensional yang sering kali mengandalkan inspeksi visual atau periodik, sistem cerdas menggunakan algoritma deteksi anomali untuk menemukan tanda-tanda awal kerusakan pada sistem PLTS. Dengan memanfaatkan data dari sensor yang terhubung ke platform *cloud*, operator dapat melakukan pemantauan jarak jauh, mengidentifikasi anomali secara otomatis, dan merespons lebih cepat terhadap perubahan kondisi yang dapat mempengaruhi kinerja sistem. Hal ini juga mengurangi ketergantungan pada tenaga manusia yang memerlukan waktu untuk melakukan pemeriksaan fisik, serta meningkatkan efisiensi operasional secara keseluruhan.

Selain itu, penggunaan *smart system* juga memungkinkan pengelolaan energi yang lebih efisien. Dalam sistem yang terhubung ke jaringan listrik (*grid-connected*), PLTS dapat bekerja lebih sinergis dengan *Battery Energy Storage System (BESS)* untuk mengelola surplus energi yang dihasilkan selama periode produksi tinggi. Energi

yang disimpan dapat digunakan kembali saat permintaan energi meningkat, seperti pada malam hari atau saat cuaca buruk, yang meningkatkan kestabilan dan keandalan pasokan energi. Sistem ini memungkinkan optimasi distribusi energi di seluruh jaringan, mendukung pengurangan ketergantungan pada sumber energi konvensional dan mendorong transisi menuju sumber energi terbarukan yang lebih berkelanjutan.

penerapan *smart system* pada PLTS memberikan berbagai manfaat operasional yang signifikan, seperti peningkatan efisiensi energi, penurunan biaya operasional, dan peningkatan ketersediaan energi. Namun, untuk mengoptimalkan manfaat tersebut, ada beberapa tantangan yang perlu diatasi, seperti kebutuhan infrastruktur yang memadai, biaya awal implementasi yang tinggi, dan masalah terkait dengan integrasi teknologi yang kompleks. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut dalam hal kecanggihan teknologi dan pengurangan biaya serta adaptasi terhadap kondisi lokal sangat penting untuk memastikan keberhasilan penerapan *smart system* dalam pengelolaan PLTS yang lebih efisien dan berkelanjutan.

3.5. Perbandingan Efektivitas Penggunaan *Smart system* dan Metode Konvensional

Pemantauan konvensional dan pemantauan berbasis *smart system* memiliki perbedaan yang signifikan dalam hal efektivitas, kecepatan, dan keakuratan dalam pengelolaan PLTS. Tabel 6 berikut ini menyajikan perbandingan efektivitas antara pemantauan konvensional dan *smart system*.

Berdasarkan Tabel 6, penerapan *smart system* memberikan peningkatan yang signifikan pada berbagai aspek operasional PLTS, termasuk pemantauan kinerja, prediksi kerusakan, perawatan panel, dan optimasi energi, dibandingkan dengan metode konvensional yang lebih mengandalkan inspeksi manual dan metode pengumpulan data offline.

Salah satu perbedaan terbesar terletak pada pemantauan kinerja. Metode konvensional, yang mengandalkan inspeksi manual dan pemantauan tidak *real-time*, sering kali terlambat dalam mendeteksi penurunan kinerja atau kerusakan pada panel surya. Sebaliknya, *smart system* yang berbasis *IoT* memungkinkan pemantauan secara *real-time* melalui platform *cloud*, memungkinkan pengelola PLTS untuk segera mendeteksi masalah dan mengambil tindakan lebih cepat. Efisiensi pemantauan meningkat hingga 95% dengan *smart system*, karena pengumpulan data yang terus-menerus dan kemampuan untuk menganalisis data secara otomatis, memberikan keunggulan besar dibandingkan pemantauan manual yang memerlukan waktu dan sering kali mengandalkan perkiraan atau inspeksi terbatas.

Tabel 6. Perbandingan Efektivitas Penggunaan *Smart system* dan metode Konvensional memungkinkan penggunaan energi surplus ketika dibutuhkan.

Aspek	Metode Konvensional	<i>Smart system</i> (IoT dan <i>Machine learning</i>)	Efektivitas Peningkatan (%)
Pemantauan Kinerja	Manual, tidak real-time	Pemantauan <i>real-time</i> melalui <i>IoT</i>	95% (peningkatan efisiensi pemantauan)
Prediksi Kerusakan	Inspeksi manual dan offline	Prediksi berbasis <i>machine learning</i> (Decision Tree, SVMR)	110.8% (akurasi prediksi lebih tinggi)
Perawatan Panel	Inspeksi manual tidak efisien	Deteksi otomatis dan prediksi kerusakan (anomaly detection)	Lebih dari 128% (efisiensi perawatan)
Optimalisasi Energi	Posisi panel statis, efisiensi terbatas	Sistem dual-axis tracker, optimasi posisi panel	130% (peningkatan output energi)
Pemeliharaan Sistem	Waktu respon lambat dan pemeliharaan reaktif	Pemeliharaan proaktif melalui deteksi dini	>68% (peningkatan kecepatan deteksi kerusakan)
Efisiensi Energi	Bergantung pada posisi tetap panel	Optimalisasi daya output dengan MPPT, IoT monitoring	56%-94% (peningkatan output daya)
Pengendalian Jarak Jauh	Tidak tersedia	Bisa dikendalikan jarak jauh via perangkat pengguna	100% (pengendalian jarak jauh efektif)
Stabilitas Sistem Distribusi	Fluktuasi arus dan daya tinggi	Stabilitas lebih baik dengan Battery Energy Storage System (BESS)	Waktu respons <0.5 detik (peningkatan stabilitas)

Prediksi kerusakan juga menunjukkan keunggulan yang sangat jelas dengan penggunaan smart system. Algoritma *machine learning* seperti *Decision Tree* dan *Support Vector Machine Regression* (SVMR) yang digunakan dalam *smart system* memungkinkan prediksi kerusakan dengan akurasi yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional yang mengandalkan inspeksi fisik dan estimasi berdasarkan pengalaman. Dalam hal ini, prediksi berbasis data memungkinkan deteksi masalah lebih awal, sehingga perawatan dapat dilakukan lebih proaktif. *Smart system* meningkatkan akurasi prediksi kerusakan hingga 110,8% dibandingkan dengan metode konvensional, yang biasanya tidak mampu memberikan akurasi yang sama dalam mendeteksi potensi kerusakan.

Perawatan panel surya juga lebih efisien dengan penerapan smart system. Sistem berbasis sensor dan algoritma deteksi anomali otomatis dapat mendeteksi penurunan kinerja atau kerusakan lebih cepat daripada metode manual yang biasanya mengandalkan jadwal pemeliharaan rutin atau inspeksi visual. Dengan adanya deteksi dini, pemeliharaan dapat dilakukan tepat waktu, yang mengurangi *downtime* dan memperpanjang umur panel surya. Dibandingkan dengan metode konvensional yang lebih reaktif, *smart system* meningkatkan efisiensi perawatan lebih dari 128%.

Dalam hal optimasi energi, *smart system* memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan output energi. Teknologi *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) yang dikombinasikan dengan algoritma seperti *Incremental Conductance* (IC) dan dual-axis tracking dapat menyesuaikan posisi panel surya secara otomatis untuk memastikan panel selalu beroperasi pada titik daya maksimum. Dengan menggunakan teknologi ini, *smart system* dapat meningkatkan output energi hingga 130%, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional yang mengandalkan panel dengan posisi tetap dan pengaturan daya manual. *Smart system* juga mengoptimalkan distribusi energi secara lebih efisien dengan mengintegrasikan penyimpanan energi seperti *Battery Energy Storage System* (BESS), yang

Secara keseluruhan, penggunaan *smart system* berbasis *IoT* dan *machine learning* menunjukkan keunggulan yang signifikan dalam pengelolaan PLTS. Dengan kemampuannya untuk melakukan pemantauan real-time, prediksi kerusakan yang lebih akurat, perawatan yang lebih efisien, dan optimasi energi yang lebih baik, *smart system* memberikan keuntungan yang jauh lebih besar dibandingkan metode konvensional yang sering kali mengandalkan inspeksi manual dan pengumpulan data terbatas. Teknologi cerdas ini tidak hanya meningkatkan performa jangka panjang PLTS, tetapi juga membantu mengurangi biaya operasional, memperpanjang umur sistem, dan mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil.

3.6. Optimisasi Penggunaan *Smart system* pada PLTS Berdasarkan Kondisi Operasional

Penggunaan *smart system* dalam Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dapat diadaptasi untuk kondisi operasional tertentu guna mengoptimalkan kinerja sistem. Sistem ini, yang mengintegrasikan teknologi seperti *Internet of Things* (IoT), kecerdasan buatan (AI), dan *machine learning* (ML), memungkinkan penyesuaian operasional yang lebih tepat berdasarkan variabilitas kondisi lingkungan dan karakteristik lokal. Berdasarkan temuan dalam penelitian ini, penggunaan *smart system* memberikan solusi yang lebih efisien dalam mengelola kondisi ekstrem dan variabel yang mempengaruhi produksi energi surya, seperti fluktuasi suhu, kelembapan, dan radiasi matahari.

Pada wilayah dengan fluktuasi suhu dan kelembapan tinggi, seperti daerah tropis atau pesisir, teknologi *IoT* yang dilengkapi dengan sensor lingkungan, seperti suhu, kelembapan, dan radiasi matahari, sangat penting untuk memantau dan menyesuaikan kinerja panel surya. Dengan data *real-time* yang diperoleh dari sensor-sensor tersebut, *smart system* dapat secara dinamis menyesuaikan kondisi operasional untuk memaksimalkan efisiensi energi yang

dihasilkan. Misalnya, dalam kondisi suhu yang tinggi, *smart system* dapat memodifikasi parameter pengoperasian panel untuk menghindari overheating dan penurunan efisiensi. Sistem ini juga memungkinkan penggunaan algoritma *machine learning* untuk memprediksi potensi penurunan kinerja di masa depan, memberikan waktu untuk perawatan preventif atau penyesuaian operasional.

Di daerah berdebu, seperti gurun atau kawasan industri berat, penumpukan debu pada permukaan panel surya dapat menyebabkan penurunan efisiensi yang signifikan. Penggunaan *smart system* dengan deteksi anomali berbasis sensor dan sistem pembersihan otomatis berbasis *IoT* menjadi sangat berguna untuk mengatasi masalah ini. Dengan memanfaatkan algoritma deteksi yang berbasis pada *machine learning*, *smart system* dapat mendeteksi penurunan kinerja akibat penumpukan debu dan mengaktifkan sistem pembersihan otomatis untuk menjaga panel tetap bersih dan efisien tanpa intervensi manual. Hal ini tidak hanya meningkatkan kinerja jangka panjang panel surya tetapi juga mengurangi biaya operasional yang terkait dengan perawatan manual yang sering kali memakan waktu dan biaya.

Pada lokasi terpencil dengan konektivitas internet terbatas, seperti daerah pegunungan atau pulau kecil, *smart system* masih dapat diterapkan dengan menggunakan solusi seperti penyimpanan data lokal melalui SD card atau jaringan komunikasi untuk transmisi data. Meskipun keterbatasan konektivitas dapat menjadi tantangan, penggunaan penyimpanan lokal memungkinkan pengumpulan dan pemrosesan data untuk analisis lebih lanjut tanpa membutuhkan koneksi internet yang stabil. Dengan metode ini, sistem tetap dapat berfungsi secara optimal bahkan di daerah dengan akses terbatas, mengoptimalkan produksi energi tanpa tergantung pada koneksi internet yang selalu tersedia.

Di daerah dengan perubahan cuaca yang cepat, seperti dataran tinggi atau wilayah tropis, penerapan teknologi *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* menjadi sangat penting. *MPPT* memungkinkan panel surya untuk beroperasi pada titik daya maksimum meskipun kondisi cahaya matahari berubah secara cepat, dengan menyesuaikan pengaturan daya berdasarkan intensitas radiasi yang terdeteksi. Dalam kombinasi dengan algoritma berbasis *machine learning*, *smart system* dapat memprediksi perubahan cuaca dan menyesuaikan operasional panel untuk meminimalkan kehilangan daya, sehingga memastikan efisiensi yang lebih tinggi.

Pada sistem PLTS yang terhubung ke jaringan listrik (*grid-connected*), *smart system* juga dapat diintegrasikan dengan BESS untuk menjaga kestabilan suplai energi. Dengan menggunakan algoritma untuk memprediksi permintaan energi dan kondisi cuaca, *smart system* dapat mengoptimalkan penggunaan baterai untuk menyimpan

energi yang dihasilkan saat produksi tinggi dan melepaskannya saat permintaan meningkat, seperti pada malam hari atau saat cuaca mendung. Integrasi ini tidak hanya membantu mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil tetapi juga meningkatkan kestabilan dan keandalan sistem energi terbarukan, khususnya dalam menghadapi variabilitas yang terkait dengan produksi energi surya.

penerapan *smart system* dalam PLTS berdasarkan kondisi operasional yang spesifik memberikan fleksibilitas yang lebih besar dalam mengelola sumber energi terbarukan ini. Dengan kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap variabilitas lingkungan, seperti suhu, kelembapan, dan kondisi cuaca, *smart system* memungkinkan peningkatan efisiensi operasional yang lebih besar dibandingkan dengan sistem konvensional. Penggunaan sensor cerdas, *machine learning*, dan teknologi komunikasi yang terintegrasi tidak hanya meningkatkan efisiensi energi tetapi juga mengurangi biaya operasional dan memaksimalkan potensi energi terbarukan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut dalam mengintegrasikan *smart system* dengan kondisi lokal sangat penting untuk memaksimalkan manfaat dari PLTS dan mendukung transisi global menuju energi yang lebih berkelanjutan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan *smart system* berbasis *IoT*, AI, dan *machine learning* secara signifikan meningkatkan efisiensi pengelolaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Teknologi ini mampu meningkatkan efisiensi pemantauan hingga 95%, akurasi prediksi kerusakan hingga 110,8%, dan output energi hingga 130% dibandingkan metode konvensional. Selain itu, integrasi dengan teknologi seperti *MPPT*, IC, dan BESS mendukung optimasi energi dan stabilitas jaringan.

Dengan kemampuan pemantauan real-time, deteksi dini kerusakan, dan optimasi operasional yang adaptif, *smart system* memperpanjang umur panel surya, mengurangi *downtime*, dan mendorong pemanfaatan energi terbarukan secara berkelanjutan. Namun, tantangan seperti biaya awal dan infrastruktur tetap perlu diatasi. Pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk menekan biaya, meningkatkan adaptasi lokal, dan integrasi dengan jaringan pintar guna mendukung transisi energi yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Untuk penelitian dan aplikasi praktis selanjutnya, perlu dilakukan pengembangan model hybrid yang menggabungkan algoritma *machine learning* seperti Random Forest dan LSTM untuk meningkatkan akurasi prediksi kinerja PLTS. Integrasi dengan smart grid, smart city, dan smart home akan lebih mengoptimalkan distribusi energi terbarukan. Selain itu, penelitian lebih

lanjut diperlukan untuk membandingkan teknik *machine learning* yang lebih mendalam untuk deteksi kerusakan dan prediksi energi, serta mengembangkan algoritma yang lebih adaptif terhadap kondisi lokal dan variabilitas cuaca. Kajian ekonomi terkait insentif dan skema pembiayaan juga penting untuk memperluas adopsi smart system.

Referensi

- [1]. K. Z. Mostofa dan M. A. Islam, "Creation of an *Internet of Things (IoT)* system for the live and remote monitoring of solar photovoltaic facilities," *Energy Rep.*, vol. 9, hlm. 422–427, Okt 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.09.060.
- [2]. A. Abdullah, M. Z. Haq, C. Cholish, M. Putri, dan A. Ramadhan, "Implementasi *Internet of Things* Dalam Pemantauan Optimal Kerja Panel Surya," *RELE Rekayasa Elektr. Dan Energi J. Tek. Elektro*, vol. 4, no. 2, Art. no. 2, Feb 2022, doi: 10.30596/rele.v4i2.9565.
- [3]. S. L. P, S. S, dan M. S. Rayudu, "IoT based solar panel fault and maintenance detection using decision tree with light gradient boosting," *Meas. Sens.*, vol. 27, hlm. 100726, Jun 2023, doi: 10.1016/j.measen.2023.100726.
- [4]. M. Tradacete-Ágreda, E. Santiso-Gómez, F. J. Rodríguez-Sánchez, P. J. Hueros-Barrios, J. A. Jiménez-Calvo, dan C. Santos-Pérez, "High-performance *IoT* Module for *real-time* control and self-diagnose PV panels under working daylight and dark electroluminescence conditions," *Internet Things*, vol. 25, hlm. 101006, Apr 2024, doi: 10.1016/j.IoT.2023.101006.
- [5]. "Peningkatan Efisiensi Konversi Energi dalam Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya," Teknik Elektro UII. Diakses: 9 Desember 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://ee.uii.ac.id/peningkatan-efisiensi-konversi-energi-dalam-sistem-pembangkit-listrik-tenaga-surya/>
- [6]. A. Ramschie, R. Katuuk, dan S. Eksan, "IoT Implementation for Monitoring and Controlling Solar Power Plant Systems," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 185, no. 37, hlm. 23–31, Okt 2023, doi: 10.5120/ijca2023923177.
- [7]. I. Segovia Ramírez, F. P. García Márquez, dan J. Parra Chaparro, "Convolutional neural networks and *Internet of Things* for fault detection by aerial monitoring of photovoltaic solar plants," *Measurement*, vol. 234, hlm. 114861, Jul 2024, doi: 10.1016/j.measurement.2024.114861.
- [8]. P. Muthukumar, S. Manikandan, R. Muniraj, T. Jarin, dan A. Sebi, "Energy efficient dual axis solar tracking system using *IOT*," *Meas. Sens.*, vol. 28, hlm. 100825, Agu 2023, doi: 10.1016/j.measen.2023.100825.
- [9]. A. K. Tripathi *dkk.*, "Advancing solar PV panel power prediction: A comparative *machine learning* approach in fluctuating environmental conditions," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 59, hlm. 104459, Jul 2024, doi: 10.1016/j.csite.2024.104459.
- [10]. M. Mehta dan B. Mehta, "Control strategies for grid-connected hybrid renewable energy systems: Integrating modified direct torque control based doubly fed induction generator and ANFIS based *Maximum Power Point Tracking* for solar PV generation," *E-Prime - Adv. Electr. Eng. Electron. Energy*, vol. 8, hlm. 100575, Jun 2024, doi: 10.1016/j.prime.2024.100575.
- [11]. Y. Ledmaoui, A. El Maghraoui, M. El Aroussi, R. Saadane, A. Chebak, dan A. Chehri, "Forecasting solar energy production: A comparative study of *machine learning* algorithms," *Energy Rep.*, vol. 10, hlm. 1004–1012, Nov 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.07.042.
- [12]. I. Shirbhate dan S. Barve, "Solar panel monitoring and energy prediction for smart solar system," *Int. J. Adv. Appl. Sci.*, vol. 8, hlm. 136, Jun 2019, doi: 10.11591/ijaas.v8.i2.pp136-142.
- [13]. A. Basit, R. Khoeruzzaman, R. Rais, dan A. Maulana, "Monitoring System Automatic Solar Cell Sebagai Sumber PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) Berbasis Microcontroller," *Smart Comp Jurnalnya Orang Pint. Komput.*, vol. 13, no. 1, Art. no. 1, Jan 2024, doi: 10.30591/smartcomp.v13i1.6057.
- [14]. P. Gunoto, A. Rahmadi, dan E. Susanti, "PERANCANGAN ALAT SISTEM MONITORING DAYA PANEL SURYA BERBASIS INTERNET OF THINGS," *SIGMA Tek.*, vol. 5, no. 2, Art. no. 2, Nov 2022, doi: 10.33373/sigmateknika.v5i2.4555.
- [15]. I. Gunawan dan T. Akbar, "PROTOTYPE SISTEM MONITORING TEGANGAN PANEL SURYA (SOLAR CELL) PADA LAMPU PENERANG JALAN BERBASIS WEB APLIKASI," *Infotek J. Inform. Dan Teknol.*, vol. 2, no. 2, Art. no. 2, Jul 2019, doi: 10.29408/jit.v2i2.1452.
- [16]. W. Priharti, S. Sumaryo, D. K. Silalahi, dan Y. S. Agung, "Perancangan Sistem Pemantauan Lokal dan Jarak Jauh bagi Panel Surya," *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 16, no. 2, Art. no. 2, Agu 2020, doi: 10.17529/jre.v16i2.16352.
- [17]. G. Kurniawan, A. Raka, dan P. Rahardjo, "Rancang Bangun Sistem Pemantauan Panel Surya Berbasis Internet of Things," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 22, hlm. 133, Jun 2023, doi: 10.24843/MITE.2023.v22i01.P17.
- [18]. F. Pereira dan C. Silva, "*Machine learning* for monitoring and classification in inverters from solar photovoltaic energy plants," *Sol. Compass*, vol. 9, hlm. 100066, Mar 2024, doi: 10.1016/j.solcom.2023.100066.
- [19]. R. Setiawan, C. D. Megawati, B. R. P. D. Palevi, dan S. Hadi, "Pengembangan Database Sistem Pemantauan Daya Panel Surya Berbasis Borland Delphi dan Komunikasi Nirkabel LoRa," *J. Bumigora Inf. Technol. BITE*, vol. 4, no. 1, Art. no. 1, Jun 2022, doi: 10.30812/bite.v4i1.1943.
- [20]. U. A. Khan, N. M. Khan, dan M. H. Zafar, "Resource efficient PV power forecasting: Transductive transfer learning based hybrid *deep learning* model for smart grid in Industry 5.0," *Energy Convers. Manag. X*, vol. 20, hlm. 100486, Okt 2023, doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100486.

- [21]. I. Moroki dan A. S. Wauran, "Model Statistika Prediksi Energi Surya Dengan Menggunakan Autoregresif Integrated Moving Average (ARIMA)," *J. MIPA*, vol. 8, no. 3, Art. no. 3, Okt 2019, doi: 10.35799/jmuo.8.3.2019.26193.
- [22]. D. Abdulai, S. Gyamfi, F. A. Diawuo, dan P. Acheampong, "Data analytics for prediction of solar PV power generation and system performance: A real case of Bui Solar Generating Station, Ghana," *Sci. Afr.*, vol. 21, hlm. e01894, Sep 2023, doi: 10.1016/j.sciaf.2023.e01894.
- [23]. K. Narasimman, V. Gopalan, A. K. Bakthavatsalam, P. V. Elumalai, M. Iqbal Shajahan, dan J. Joe Michael, "Modelling and real time performance evaluation of a 5 MW grid-connected solar photovoltaic plant using different artificial neural networks," *Energy Convers. Manag.*, vol. 279, hlm. 116767, Mar 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.116767.
- [24]. A. B. Raharjo, A. Ardianto, dan D. Purwitasari, "Random Forest Regression Untuk Prediksi Produksi Daya Pembangkit Listrik Tenaga Surya," *Briliant J. Ris. Dan Konseptual*, vol. 7, no. 4, Art. no. 4, Nov 2022, doi: 10.28926/briliant.v7i4.1036.
- [25]. I. Jamil dkk., "Predictive evaluation of solar energy variables for a large-scale solar power plant based on triple *deep learning* forecast models," *Alex. Eng. J.*, vol. 76, hlm. 51–73, Agu 2023, doi: 10.1016/j.aej.2023.06.023.
- [26]. F. Ananta, D. Syaquy, dan B. H. Prasetio, "Perancangan Sistem Deteksi Anomali pada Panel Surya menggunakan Mikrokontroler dengan Algoritma K-Nearest Neighbors," *J. Pengemb. Teknol. Inf. Dan Ilmu Komput.*, vol. 7, no. 5, Art. no. 5, Agu 2023.
- [27]. I. M. Kastawan, "Rancang Bangun Cleaning Fotovoltaik Portable Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)," *Mek. J. Tek. Mesin*, Diakses: 16 Juli 2024. [Daring]. Tersedia pada: https://www.academia.edu/104242947/Rancang_Bangun_Cleaning_Fotovoltaik_Portable_Untuk_Pembangkit_Li_srik_Tenaga_Surya_PLTS_
- [28]. A. M. Adha, A. Yanie, dan F. D. Wiliyanto, "Sistem Pendeteksi Panas Kabel dan Peringatan Dini Pada Panel Surya Listrik Menggunakan Sensor Suhu," *J. Simetri Rekayasa*, vol. 4, no. 1, Art. no. 1, Apr 2022.
- [29]. N. Ghadami dkk., "Implementation of solar energy in smart cities using an integration of artificial neural network, photovoltaic system and classical Delphi methods," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 74, hlm. 103149, Nov 2021, doi: 10.1016/j.scs.2021.103149.
- [30]. P. A. Nugroho, "IMPLEMENTASI JARINGAN SYARAF TIRUAN MULTI-LAYER PERCEPTRON UNTUK PREDIKSI PENYINARAN MATAHARI KOTA BANDUNG," *Komputa J. Ilm. Komput. Dan Inform.*, vol. 12, no. 1, hlm. 83–90, Mei 2023, doi: 10.34010/komputa.v12i1.9419.
- [31]. M. Rezza, M. I. Yusuf, dan R. R. Yacoub, "Prediksi Radiasi Surya Menggunakan Metode Long Short-Term Memory," *Ilk. J. Comput. Sci. Appl. Inform.*, vol. 6, no. 1, Art. no. 1, Apr 2024, doi: 10.28926/ilkomnika.v6i1.571.
- [32]. I. Mandourarakis dkk., "Development of a smart photovoltaic cells system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 293, hlm. 117478, Okt 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117478.
- [33]. A. Assegaf, D. Aming, dan F. Alvianto, "Perancangan Maximum Power Point Tracking dengan algoritma incremental conductance untuk PLTS 100 Wp: Design of Maximum Power Point Tracking with incremental conductance algorithm for PLTS 100 Wp," *JITEL J. Ilm. Telekomun. Elektron. Dan List. Tenaga*, vol. 1, no. 1, Art. no. 1, Mar 2021, doi: 10.35313/jitel.v1.i1.2021.1-8.
- [34]. S. Abedi, M. H. Moradi, dan R. Shirmohammadi, "Real-time photovoltaic energy assessment using a GSM-based smart monitoring system: Addressing the impact of climate change on solar energy estimation software," *Energy Rep.*, vol. 10, hlm. 2361–2373, Nov 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.09.038.
- [35]. G. M. D. Putra, H. I. Lailatun, R. Sabani, dan D. A. Setiawati, "Sistem Otomasi Photovoltaic pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Berbasis Mikrokontroler Arduino skala lab," *J. Tek. Pertan. Lampung J. Agric. Eng.*, vol. 8, no. 2, Art. no. 2, Jun 2019, doi: 10.23960/jtep-l.v8i2.130-138.
- [36]. R. Khotama, D. B. Santoso, dan A. Stefanie, "Perancangan Sistem Optimasi Smart Solar Electrical pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan Metode Tracking Dual Axis Technology," *J. Ecotipe Electron. Control Telecommun. Inf. Power Eng.*, vol. 7, no. 2, Art. no. 2, Okt 2020, doi: 10.33019/jurnalecotipe.v7i2.1887.
- [37]. A. Pangkung, S. Qamariah, S. Abadi, dan N. I. Mayasari, "Rancang Bangun Sistem Kontrol Suplai Beban PLTS Menggunakan Pulse Width Modulation dan Real Time Clock," *J. Tek. Mesin Sinergi*, vol. 20, no. 1, Art. no. 1, Apr 2022, doi: 10.31963/sinergi.v20i1.3452.
- [38]. A. Bandyopadhyay, B. D. Leibowicz, dan M. E. Webber, "Solar panels and smart thermostats: The power duo of the residential sector?," *Appl. Energy*, vol. 290, hlm. 116747, Mei 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116747.
- [39]. Md. R. Islam, Md. T. Aziz, M. Alauddin, Z. Kader, dan Md. R. Islam, "Site suitability assessment for solar power plants in Bangladesh: A GIS-based analytical hierarchy process (AHP) and multi-criteria decision analysis (MCDA) approach," *Renew. Energy*, vol. 220, hlm. 119595, Jan 2024, doi: 10.1016/j.renene.2023.119595.
- [40]. R. Fachrizal, M. Shepero, M. Åberg, dan J. Munkhammar, "Optimal PV-EV sizing at solar powered workplace charging stations with smart charging schemes considering self-consumption and self-sufficiency balance," *Appl. Energy*, vol. 307, hlm. 118139, Feb 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118139.
- [41]. O. Bonilla dan H. T. Le, "Multi-functional energy storage system for supporting solar PV plants and host power distribution system," *J. Energy Storage*, vol. 73, hlm. 108933, Des 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.108933.