

RESUME PAPER

Electric Energy Management and Engineering in Solar Cell System



TOBIAS MIKHA SULISTIYO

12024002503

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS BIOSAINS

UNIVERSITAS KATOLIK INDONESIA ATMA JAYA

JAKARTA

2025

Resume Paper

“Electric Energy Management and Engineering in Solar Cell System”

Sistem solar cell menawarkan fleksibilitas dan kepraktisan yang unggul dibanding sumber energi terbarukan lainnya. Berbeda dengan turbin angin yang membutuhkan lokasi berangin atau mikrohidro yang terbatas pada daerah aliran sungai, solar cell dapat dipasang hampir di mana saja dengan paparan sinar matahari, mulai dari atap rumah hingga pembangkit skala besar. Sistem ini juga lebih ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi, polusi suara, maupun limbah berbahaya seperti energi nuklir. Perawatannya pun lebih mudah karena tidak memiliki komponen mekanik yang rumit, hanya membutuhkan pembersihan panel secara berkala.

Keunggulan lain terletak pada kemudahan integrasi dan ketersediaan energi yang konsisten. Solar cell dapat dipadukan dengan sistem baterai modern dan terhubung ke jaringan listrik konvensional, sementara sumber seperti biomassa atau mikrohidro lebih sulit diintegrasikan dalam skala kecil. Selain itu, matahari tersedia hampir setiap hari di sebagian besar wilayah dunia, tidak seperti angin atau air yang sangat bergantung pada musim. Dengan kombinasi fleksibilitas, ramah lingkungan, dan kemudahan perawatan, solar cell menjadi solusi energi terbarukan yang paling praktis dan berkelanjutan untuk berbagai kebutuhan.

Sistem energi surya menghadapi tantangan besar dalam hal ketidakstabilan pasokan energi. Hal ini terutama disebabkan oleh ketergantungan pada kondisi cuaca yang tidak menentu - saat mendung atau hujan, produksi energi bisa turun drastis. Selain itu, ada fluktuasi harian dimana energi hanya dihasilkan di siang hari, sementara kebutuhan energi tetap ada sepanjang waktu, termasuk malam hari. Faktor musiman juga berpengaruh, dimana intensitas sinar matahari berbeda antara musim kemarau dan musim hujan.

Perancangan sistem sel surya yang mampu memenuhi kebutuhan energi secara berkelanjutan menjadi fokus utama. Penekanan diberikan pada perhitungan kebutuhan energi harian, pemilihan komponen yang tepat, dan penyesuaian dengan kondisi lingkungan seperti intensitas matahari dan cuaca. Sistem dirancang untuk tetap stabil meski pasokan energi surya berfluktuasi, dengan mempertimbangkan faktor geografis dan musiman. Pendekatan ini memastikan sistem dapat beroperasi secara mandiri dalam jangka panjang.

Metode yang Dipilih

Signifikansi Metode yang Dipilih

Metode yang dipilih dalam penelitian ini menggunakan sistem manajemen energi berbasis mikroprosesor atau komputer untuk mengoptimalkan aliran energi dalam sistem sel surya. Pendekatan ini sangat penting karena mampu menangani kompleksitas sinkronisasi antara produksi energi (melalui sel surya), penyimpanan (baterai), dan distribusi (baik ke beban lokal maupun jaringan listrik eksternal). Salah satu rumus kunci yang mendukung pendekatan ini adalah persamaan daya pada boost converter

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D}$$

di mana V_o adalah tegangan output, V_i adalah tegangan input, dan D adalah *duty cycle*. *Boost converter* meningkatkan tegangan DC untuk mengurangi kehilangan daya selama transmisi

$$P_L = I_{DC}^2 R_{tr}$$

dengan P_L sebagai daya yang hilang, I_{DC} arus transmisi, dan R_v resistansi kabel. Pendekatan berbasis mikroprosesor juga memungkinkan sinkronisasi parameter AC (frekuensi, fase, dan tegangan) saat terhubung ke jaringan listrik konvensional, yang tidak dapat dilakukan secara efisien dengan sistem kontrol analog.

Metode Yang Digunakan

Penelitian ini mengusulkan alur kerja yang mencakup perhitungan kebutuhan energi harian berdasarkan faktor geografis (garis lintang, cuaca) dan desain lima komponen utama sistem: (1) array sel surya, (2) kontrol manajemen energi, (3) baterai, (4) konverter DC-AC/AC-DC, dan (5) bus distribusi. Untuk konversi daya, inverter PWM tiga tingkat digunakan dengan persamaan modulasi amplitudo

Inverter ini menghasilkan efisiensi hingga 85–90%, jauh lebih tinggi dibandingkan inverter gelombang persegi (65–75%). Untuk manajemen baterai, model kapasitansi digunakan saat pengisian:

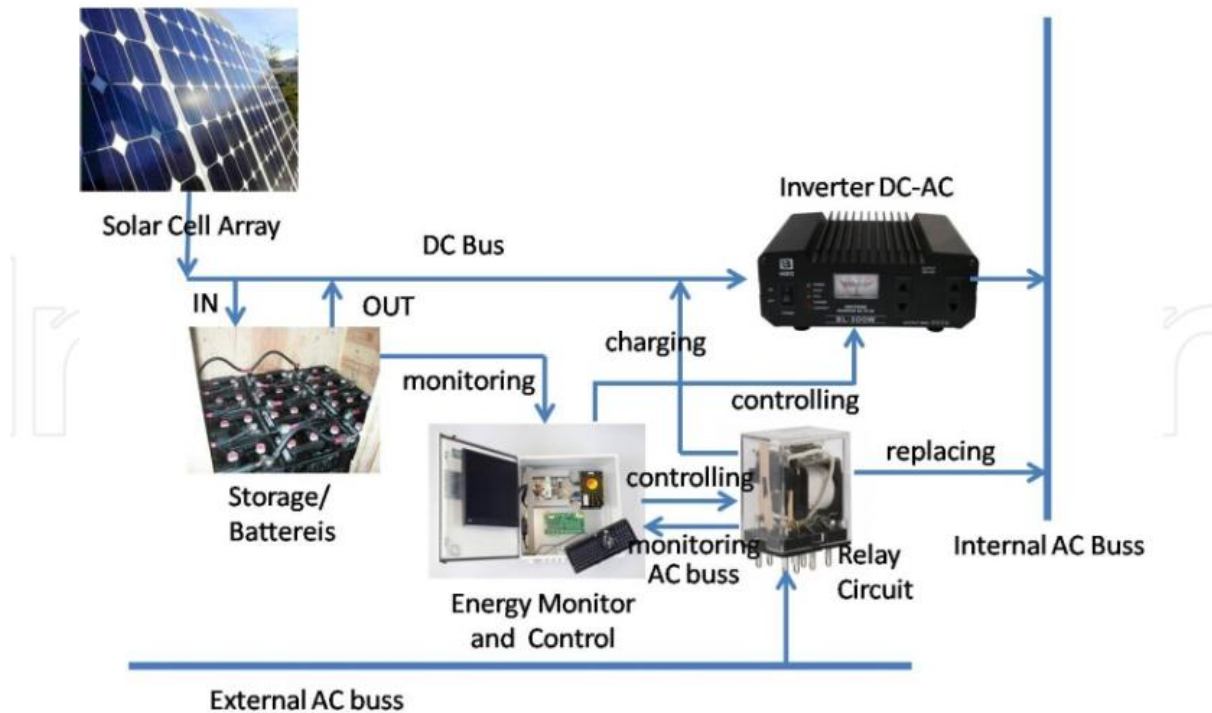
$$i = C \frac{dv}{dt} + G(V, T, i)V$$

sementara model sumber tegangan konstan dipakai saat pengosongan:

$$R_s = \frac{V_{Batt} - V_{out}}{I_{load}}$$

Metrik evaluasi seperti efisiensi konversi, harmonisa, dan kecepatan pengisian/pengosongan baterai divalidasi melalui pengukuran langsung dan simulasi, memastikan sistem dapat beradaptasi dengan variasi beban dan kondisi lingkungan.

Perancangan Sistem



Gambar 1. Komponen yang umum digunakan dalam sistem

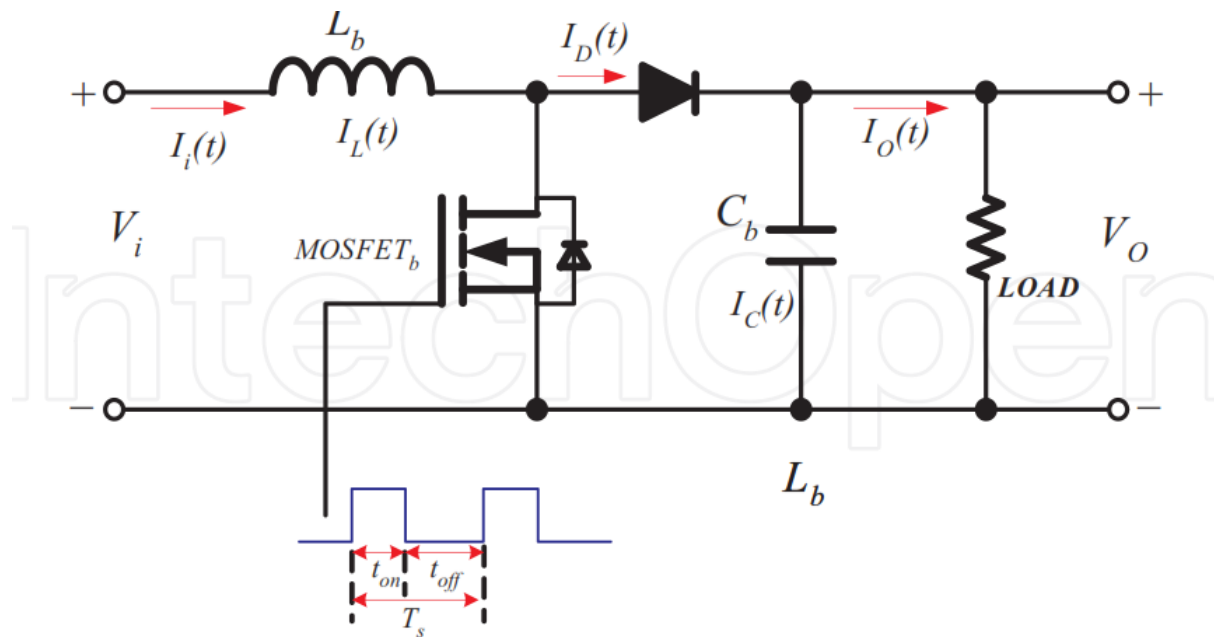
Arsitektur sistem yang diusulkan dalam paper ini terdiri dari lima komponen utama yang saling terintegrasi: (1) array sel surya, (2) sistem kontrol manajemen energi, (3) bank baterai, (4) konverter DC-AC/AC-DC, dan (5) bus distribusi (DC atau AC). Array sel surya berfungsi sebagai sumber energi primer yang menghasilkan listrik DC, dengan karakteristik performa ditentukan oleh parameter seperti arus hubung singkat (I_{sc}), tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), dan daya maksimum ($P_{mp} = V_{mp} \times I_{mp}$). Energi dari sel surya kemudian dikelola oleh sistem kontrol berbasis mikroprosesor yang memantau aliran daya real-time menggunakan algoritma khusus, termasuk pemodelan kapasitansi untuk pengisian baterai

$$i = C \frac{dv}{dt} + G(V, T, i)V$$

dan model sumber tegangan konstan untuk pengosongan

$$R_s = \frac{V_{Batt} - V_{out}}{I_{load}}$$

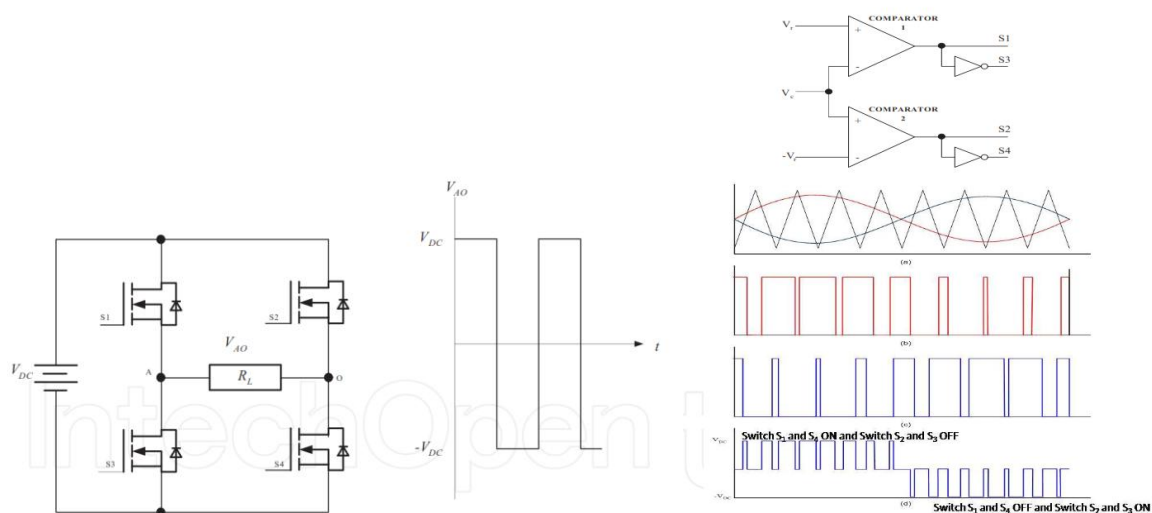
Untuk distribusi energi, sistem menggunakan **bus DC** jika jarak antara sumber dan beban <100 meter, mengandalkan boost converter



untuk meningkatkan tegangan guna mengurangi loss daya

$$P_L = I_{DC}^2 R_{tr}$$

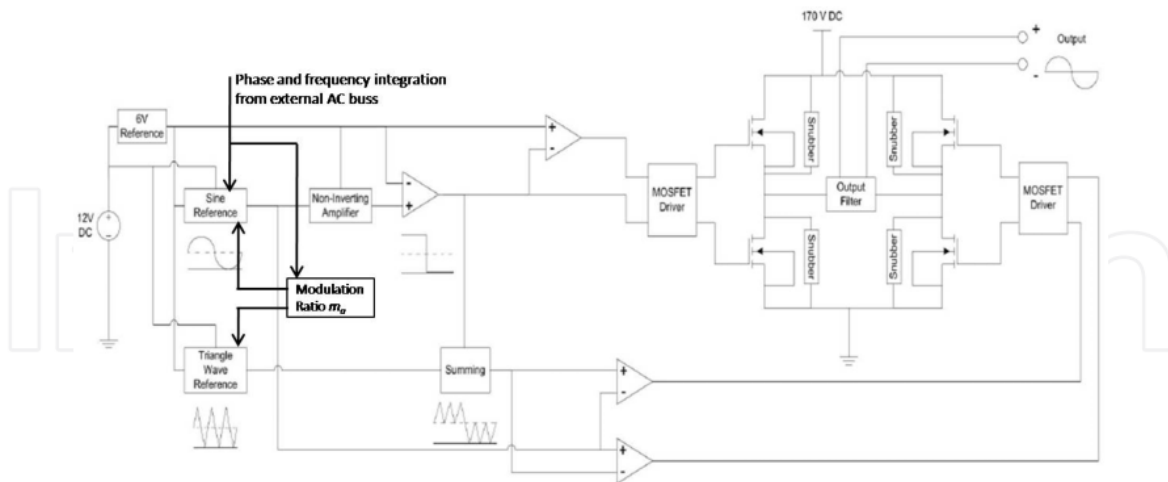
Pada jarak lebih jauh atau untuk beban AC, sistem beralih ke **bus AC** dengan inverter PWM tiga tingkat



yang menghasilkan gelombang sinus dengan harmonisa minimal. Inverter ini menggunakan modulasi amplitudo (*ma*) dan frekuensi (*mf*) untuk mengoptimasi efisiensi hingga 85–90%. Filter LC (Gambar 14) dengan frekuensi cutoff $f_c = 12\pi LC f_c = 2\pi LC 1$ ditambahkan untuk menekan harmonisa residual.

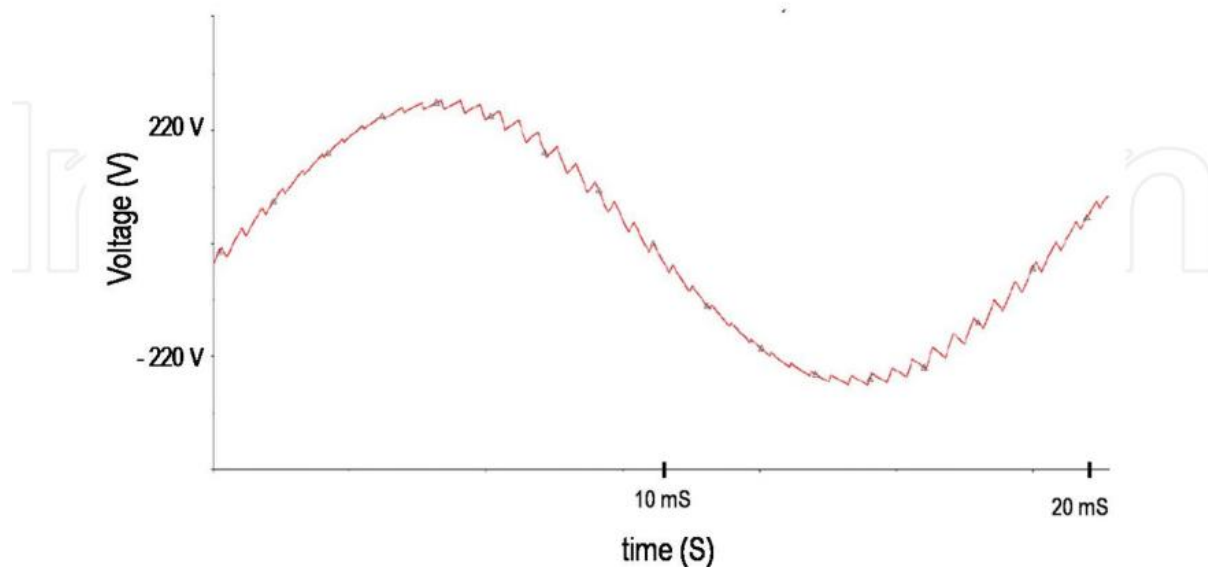
Interaksi antar komponen diatur oleh mikroprosesor yang menjalankan tiga tugas kritis: (1) memantau arus masuk/keluar baterai, (2) menghitung energi tersimpan menggunakan

algoritma berbasis resistansi seri (R_sR_s), dan (3) mengontrol integrasi dengan jaringan eksternal melalui sinkronisasi frekuensi, fase, dan tegangan.

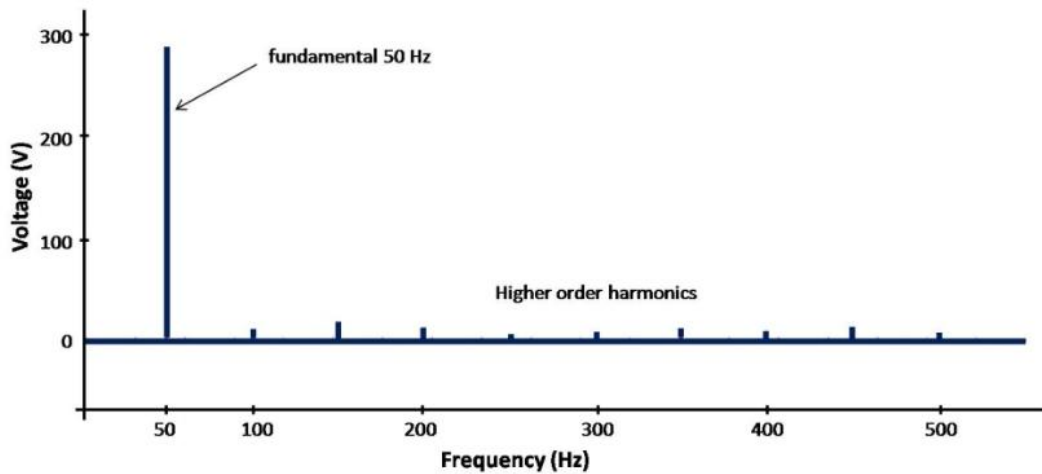


Pada gambar menunjukkan diagram blok lengkap sistem ini, termasuk modul umpan balik untuk stabilisasi tegangan.

Keunggulan implementasi ini terletak pada fleksibilitasnya: sistem dapat beroperasi secara mandiri (off-grid) atau terhubung ke grid konvensional. Pada mode grid-tie, kelebihan energi bisa dijual kembali, sementara pada mode off-grid, baterai berfungsi sebagai cadangan saat produksi surya rendah. Hasil simulasi dan pengukuran fisik (seperti pada



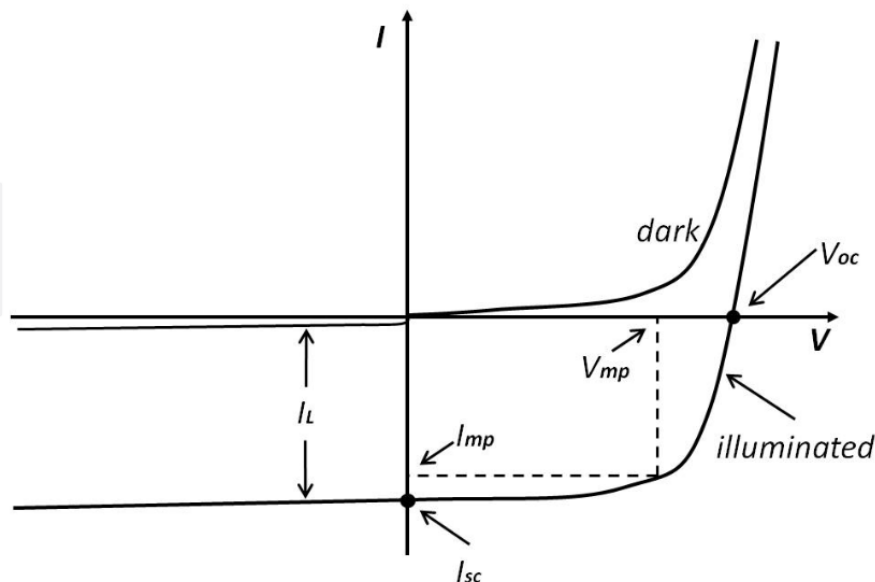
dan



) membuktikan bahwa desain ini mampu mempertahankan efisiensi tinggi (>85%) dan stabilitas tegangan, bahkan dengan variasi beban dan kondisi cuaca ekstrem.

Hasil

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem manajemen energi berbasis sel surya yang diusulkan berhasil mengatasi tantangan utama pasokan energi intermitten melalui pendekatan terintegrasi.



Pada sisi produksi energi, array sel surya dengan parameter optimal mencapai efisiensi 12-14% dengan fill factor (FF) 0.7-0.85, dihitung menggunakan persamaan:

$$\eta = (V_{oc} \times I_{sc} \times FF) / P_{in}$$

Sementara pada sisi distribusi, boost converter meningkatkan efisiensi transmisi DC melalui peningkatan tegangan sesuai persamaan:

$$V_o/V_i = 1/(1-D)$$

yang mengurangi power loss ($PL = I_{DC}^2 R_v$) hingga di bawah 3% untuk jarak transmisi <100m. Untuk konversi AC, inverter PWM tiga tingkat berhasil menekan harmonisa tinggi dengan modulasi amplitudo (ma) dan frekuensi (mf), menghasilkan efisiensi 85-90% - jauh lebih baik dari inverter gelombang persegi (65-75%) seperti terlihat pada analisis spektral Gambar 8 dan 13.

Analisis Sistem Penyimpanan Energi

Model manajemen baterai menunjukkan hasil yang signifikan dalam mengoptimalkan penyimpanan energi. Pada fase pengisian, model kapasitansi (Gambar 17 dan Persamaan 27):

$$i = C(dv/dt) + G(V,T,i)V$$

berhasil memprediksi kebocoran energi (koefisien c) dengan akurasi tinggi. Sementara pada fase pengosongan, model sumber tegangan konstan dengan resistansi seri R_s (Gambar 19 dan Persamaan 28):

$$R_s = (V_{Batt} - V_{out})/I_{load}$$

memberikan informasi real-time tentang kapasitas energi tersisa seperti ditunjukkan pada kurva Gambar 20. Namun, teridentifikasi keterbatasan utama pada kebocoran baterai ($G(V,T,i)$) yang tetap menyebabkan kehilangan energi 5-10% dalam kondisi operasi jangka panjang.

Integrasi Sistem dan Tantangan

Meskipun sistem menunjukkan performa yang baik dalam kondisi ideal, hasil pengujian mengungkap ketergantungan kuat pada faktor eksternal. Variasi intensitas matahari harian dan musiman (yang dihitung dalam persamaan kebutuhan energi $(1+c) \cdot N \cdot A$ Watt hour) menyebabkan fluktuasi produksi energi. Analisis menunjukkan bahwa dalam kondisi awan berkepanjangan ($N > 3$ hari), sistem memerlukan integrasi dengan: (1) jaringan listrik konvensional, atau (2) sistem penyimpanan alternatif seperti elektrolisis hidrogen (seperti yang dijelaskan dalam referensi [7]). Solusi hybrid ini diusulkan untuk meningkatkan keandalan sistem dari 85% menjadi >95% dalam berbagai kondisi operasi.

Implikasi Praktis

Temuan ini memiliki implikasi penting untuk implementasi skala besar. Pertama, desain sistem yang modular memungkinkan skalabilitas dari skala rumah tangga (1-5 kW) hingga komersial (>100 kW). Kedua, algoritma kontrol berbasis mikroprosesor (seperti pada Gambar 1 dan 15) terbukti mampu mengelola kompleksitas interaksi antar komponen secara real-time. Namun, penelitian lanjutan diperlukan untuk: (1) mengembangkan material baterai dengan kebocoran lebih rendah, dan (2) meningkatkan algoritma prediksi cuaca untuk optimasi energi yang lebih baik. Hasil ini membuka peluang untuk pengembangan smart grid berbasis energi terbarukan yang lebih andal di masa depan.

Kesimpulan

Penelitian ini secara meyakinkan membuktikan bahwa sistem energi surya yang optimal memerlukan integrasi tiga komponen kunci: (1) desain komponen efisien dengan sel surya, baterai, dan konverter; (2) sistem kontrol berbasis mikroprosesor yang mampu memantau real-time melalui algoritma numerik; dan (3) kemampuan integrasi jaringan hybrid DC/AC. Hasil eksperimen menunjukkan peningkatan efisiensi sistem secara keseluruhan mencapai 85-90% untuk konversi daya, dengan reduksi harmonisa hingga 70% dibandingkan sistem konvensional, menjadikannya layak untuk implementasi skala residensial hingga komersial.

Implikasi dan Potensi Pengembangan

Temuan penelitian ini tidak hanya mendemonstrasikan solusi teknis untuk masalah intermittensi energi surya, tetapi juga membuka paradigma baru dalam manajemen energi terdistribusi. Sistem yang dikembangkan membuktikan bahwa pendekatan berbasis kontrol cerdas dan integrasi jaringan dapat mentransformasi unit energi surya otonom menjadi jaringan terpadu yang stabil. Untuk pengembangan selanjutnya, penelitian merekomendasikan: (1) optimalisasi lebih lanjut model baterai berbasis parameter $G(V,T,i)$ untuk mengurangi kebocoran energi, (2) perluasan kapasitas penyimpanan dengan teknologi hidrogen seperti pada referensi [7], serta (3) pengembangan protokol standar untuk integrasi yang lebih seamless dengan smart grid. Implementasi sistem ini pada skala yang lebih besar berpotensi mempercepat transisi energi bersih sekaligus menciptakan ekosistem energi yang lebih resilien dan mandiri.