STABILISASI FLUKTUASI DAYA PADA SISTEM PANEL SURYA MENGGUNAKAN SUPERKAPASITOR MELALUI PENDEKATAN *PREDICTOR-CORRECTOR*

Ian Ahmad Rivaldo[1], Luthfi Maftuh Aji[1], Diva Antakarana Jwalamurti[1], Dena Ramadhan[1], Geo Darius Mohr[1]

[1]Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Semarang, Indonesia

E-mail: aldoonline99@students.unnes.ac.id

Abstrak

Sistem photovoltaic (PV) sebagai sumber energi terbarukan memiliki kelemahan berupa fluktuasi daya akibat perubahan iradiasi matahari yang cepat, sehingga dapat mempengaruhi stabilitas tegangan pada jaringan listrik. Penelitian ini bertujuan untuk meredam fluktuasi tersebut menggunakan superkapasitor sebagai sistem penyimpanan energi dengan pendekatan metode *Predictor-Corrector* (P-C). Tahap prediksi dilakukan menggunakan *Moving Average* (MA) untuk memperoleh referensi daya, sedangkan tahap koreksi menggunakan batas *Ramp Rate* (RR) digunakan mengendalikan perubahan daya agar tetap dalam batas yang diizinkan. Sistem dimodelkan dalam lingkungan Simulink MATLAB menggunakan representasi rangkaian listrik RC dan RLC untuk menggambarkan karakteristik superkapasitor. Simulasi dilakukan berdasarkan data iradiasi matahari untuk menganalisis performa sistem dalam berbagai kondisi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa fluktuasi daya PV di Kota Semarang mencapai RR maksimum 315,1-1097,1%/menit pada lima kondisi cuaca, jauh melampaui batas ±10%/menit. Metode P-C terbukti menghasilkan profil daya yang lebih stabil dan pengelolaan SOC superkapasitor yang lebih optimal dibandingkan metode MA dan RR. Selain itu, penggunaan superkapasitor terbukti efektif dalam menyerap dan melepaskan energi secara cepat sesuai kebutuhan sistem. Dengan demikian, pendekatan ini dapat meningkatkan keandalan sistem PV dalam integrasinya ke jaringan listrik.

Kata kunci: photovoltaic, superkapasitor, simulink, rangkaian listrik, penyimpanan energi

Abstract

Photovoltaic (PV) systems, as renewable energy sources, are susceptible to power fluctuations caused by rapid changes in solar irradiance, which may affect voltage stability in the electrical grid. This study aims to mitigate these fluctuations by employing a supercapacitor energy storage system using a *Predictor-Corrector* (P-C) approach. The prediction stage uses a *Moving Average* (MA) method to generate a power reference, while the correction stage applies a *Ramp Rate* (RR) constraint to regulate power variations within the allowable limits. The system is modeled in MATLAB Simulink using RC and RLC circuit representations to characterize supercapacitor behavior. Simulations are conducted using solar irradiance data to evaluate system performance under various weather conditions. The results show that PV power fluctuations in Semarang reach maximum ramp rates ranging from 315.1 to 1,097.1%/min across five weather conditions, substantially exceeding the ±10%/min limit. The P-C method produces a more stable power output profile and more effective supercapacitor state-of-charge (SOC) management than the MA and RR methods. Furthermore, the supercapacitor effectively absorbs and releases energy in response to system requirements. Therefore, the proposed approach has the potential to improve PV system reliability when integrated into the electrical grid.

Keywords: photovoltaic, supercapacitor, simulink, electrical circuit, energy storage

1. Pendahuluan

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat mendorong dunia untuk mencari sumber energi yang lebih stabil dan berkelanjutan [1]. Namun, ketergantungan global terhadap energi fosil, khususnya minyak bumi, menjadikan sistem energi rentan terhadap dinamika geopolitik [2]. Konflik antara Amerika Serikat dan Iran di kawasan Timur Tengah, terutama yang melibatkan jalur strategis Selat Hormuz, menimbulkan kekhawatiran terhadap stabilitas pasokan

energi global, mengingat jalur tersebut merupakan salah satu rute utama distribusi energi dunia [3]. Selain itu, penggunaan bahan bakar fosil pada generator konvensional masih menjadi permasalahan karena harga bahan bakar yang fluktuatif [4]. Sebagai alternatif, sumber energi terbarukan seperti photovoltaik (PV) telah mendapatkan perhatian luas secara global [5]. Namun, terkadang karakteristik akibat pergerakan awan menyebabkan keluaran daya PV bersifat acak dan berpotensi menimbulkan ketidakstabilan pada sistem jaringan listrik [6], [7]. Ketidakstabilan pada PV dapat berupa fluktuasi tegangan, aliran daya balik, lonjakan daya, penyimpanan baterai, serta variasi frekuensi [8], [9], [10]. Oleh karena itu, diperlukan metode perataan daya (Power smoothing) untuk menjaga stabilitas jaringan, sekaligus mencegah penurunan kualitas daya akibat gangguan tegangan dan permasalahan keandalan sistem [11].

Salah satu pendekatan yang umum digunakan untuk mengoptimalkan tegangan adalah pemanfaatan sistem penyimpanan energi (Energy Storage System/ESS), seperti Battery Storage System (BSS) dan superkapasitor (SC) [12], [13]. BSS, terutama berbasis lead-acid dan lithium-ion, banyak digunakan dalam teknik perataan daya, tetapi memiliki keterbatasan berupa penurunan kinerja dan umur pakai akibat siklus charge atau discharge yang berulang [14]. Bahkan, dalam jangka panjang, BSS perlu diganti beberapa kali selama masa operasional sistem PV [15]. Di sisi lain, SC memiliki keunggulan berupa densitas daya tinggi dan respons yang cepat, sehingga lebih efektif dalam meredam fluktuasi daya jangka pendek [16], [17]. Kombinasi keduanya dalam bentuk Hybrid Energy Storage System (HESS) mampu meningkatkan performa sistem, tetapi berdampak pada peningkatan biaya investasi dan kompleksitas sistem [11], [13], [14].

Berbagai metode perataan daya telah dikembangkan, dika antaranya metode *moving average* (MA) dan *Ramp Rate* (RR), yang dikenal sederhana dan memiliki beban komputasi rendah [12]. Namun, metode tersebut masih memiliki keterbatasan, seperti kurang akurat dalam menangani fluktuasi daya yang cepat serta berpotensi menyebabkan penggunaan energi yang tidak efisien pada sistem penyimpanan [13], [14]. Beberapa penelitian juga mengusulkan metode lanjutan seperti transformasi Fourier, kontrol adaptif, dan optimasi berbasis algoritma tertentu, tetapi sering kali memerlukan beban komputasi tinggi atau belum divalidasi secara eksperimental [12], [13]. Selain itu, metode peramalan (Forecasting) fluktuasi daya menjadi aspek penting dalam meningkatkan efektivitas perataan daya. Dengan memanfaatkan data resolusi tinggi, fluktuasi daya dapat diprediksi sehingga memungkinkan perencanaan sistem yang lebih optimal dan pengurangan RR secara signifikan [11].

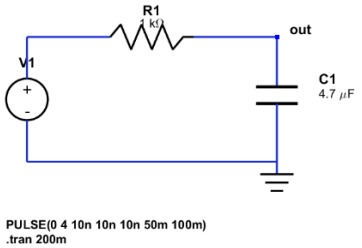
Berbagai studi telah mengevaluasi algoritma perataan daya (*Power smoothing*) secara langsung. Sebagai contoh, metode MA tercatat memerlukan kapasitas penyimpanan paling kecil, namun memicu siklus penggunaan baterai sekitar sepuluh kali lebih sering dibandingkan metode RR [12]. Studi lain mengevaluasi metode pembatasan Ramp Rate (RR) dan Moving Average (MA) berbasis superkapasitor (SC), yang membuktikan bahwa efisiensi perataan daya sangat bergantung pada kemampuan regulasi State of Charge (SOC) superkapasitor [18]. Kendati demikian, analisis terhadap MA dan LPF menunjukkan adanya fenomena keterlambatan daya (*Power lagging*) ketika merespons permintaan daya *charge* dan *discharge* yang tinggi pada baterai. Akibatnya, penelitian-penelitian terdahulu dinilai masih menyisakan celah dalam hal optimalisasi stabilisasi fluktuasi daya [6], [7], [8], [9], [10].

Untuk mengatasi keterbatasan pada penelitian-penelitian sebelumnya, pendekatan berbasis *Predictor-Corrector* (P-C) yang dikombinasikan dengan superkapasitor (SC) diimplementasikan sebagai metode untuk meningkatkan akurasi estimasi dan respons perataan daya secara lebih akurat dan adaptif pada sistem PV. Penelitian ini mengevaluasi kinerja metode P-C melalui simulasi MATLAB/Simulink serta simulasi LTspice dengan memanfaatkan data iradiasi Kota Semarang. Penelitian ini memberikan kontribusi berupa pemetaan karakter fluktuasi daya sistem PV 15 kWp pada lima kategori kondisi cuaca, analisis komparatif performa metode MA, RR, dan P-C menggunakan SC berkapasitas 400 Wh, serta validasi hasil simulasi terhadap penelitian rujukan yang berfokus pada karakteristik iklim tropis lembap.

2. Metode

2.1. Pemodelan Rangkaian Superkapasitor

Superkapasitor dimodelkan menggunakan rangkaian RC untuk menganalisis dinamika penyimpanan energi selama proses charging dan discharging akibat fluktuasi daya PV, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian RC

Model rangkaian RC terdiri dari sumber tegangan V_1, resistor R_1, dan kapasitor C_1, dengan keluaran diambil pada kapasitor (V_{out}). Kapasitor merepresentasikan superkapasitor, sedangkan resistor merepresentasikan resistansi internal (E*quivalent series resistance*, ESR). Sumber tegangan dimodelkan sebagai sinyal pulsa untuk merepresentasikan variasi daya PV. Berdasarkan Hukum Kirchhoff (KVL), berlaku persamaan berikut:

$$V_1 = V_R + V_C \quad (1)$$

$$V_R = iR, i = C\frac{dV_C}{dt} \quad (2)$$

$$V_R = iR, i = C\frac{dV_C}{dt} \quad (3)$$

Solusi persamaan ini menghasilkan proses *charging* (4) dan *discharging* (5), seperti berikut:

$$V_C(t) = V_1\left(1-e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (4)$$

$$V_C(t) = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (5)$$

Respon eksponensial ini menunjukkan bahwa perubahan tegangan bersifat transien dan dikendalikan oleh konstanta waktu:

$$\tau = RC \quad (6)$$

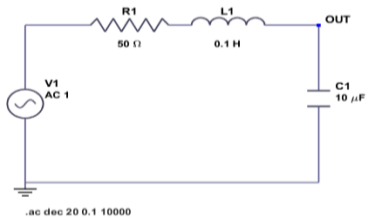
Dengan $R = 1\ k\Omega$ dan $C = 4.7\ \mu F$, diperoleh $\tau = 4.7\ ms$, yang menunjukkan respon sistem cukup cepat untuk aplikasi *power smoothing*. Model juga direpresentasikan dalam bentuk *state space* yang biasanya digunakan untuk simulasi respon tegangan terhadap masukan input nyata.

$$\dot{x} = -\frac{1}{RC}x + \frac{1}{RC}u, y = x \quad (7)$$

Secara keseluruhan, rangkaian RC mampu merepresentasikan fungsi dasar superkapasitor dalam sistem PV, yaitu menyerap dan melepaskan energi serta meredam fluktuasi tegangan melalui karakteristik *low-pass filtering*.

2.2. Pemodelan Rangkaian RLC

Selain model rangkaian RC, superkapasitor juga dapat dimodelkan menggunakan rangkaian RLC untuk merepresentasikan karakteristik yang lebih kompleks, terutama dalam menangkap efek transien yang lebih realistis seperti overshoot dan osilasi. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2, rangkaian terdiri dari resistor (R), induktor (L), dan kapasitor (C) yang disusun secara seri dengan sumber tegangan pulsa sebagai input dan tegangan kapasitor sebagai output.



Gambar 2. Rangkaian RLC

Penambahan induktor bertujuan merepresentasikan efek induktansi parasitik akibat jalur koneksi dan komponen internal superkapasitor [18]. Berdasarkan Hukum Kirchhoff Tegangan (KVL), diperoleh persamaan dasar rangkaian RLC pada Persamaan (8).

$$V_{in}(t) = V_R(t) + V_L(t) + V_C(t) \quad (8)$$

2.3. Analisis Fluktuasi Data PV dan RR

Nilai fluktuasi daya PV dihitung menggunakan metode RR pada Persamaan (9), yang didefinisikan sebagai laju perubahan daya PV antara dua langkah waktu berturut-turut t(i) dan t(i-1) dengan satuan kW/menit atau %/menit.

$$RR(i) = \left|\frac{d}{dt}\mathrm{P_{Pv}}(i)\right| = \left|\frac{P_{pv}(i)-P_{pv(i-1)}}{t(i)-t(i-1)}\right| \quad (9)$$

Batas RR ditetapkan sebesar ±10%/menit dari daya nominal PV (±1,5 kW/menit untuk sistem 15 kWp) berdasarkan standar interkoneksi sistem tenaga surya ke jaringan listrik [12]. Sistem disimulasikan menggunakan data iradiasi Kota Semarang pada Tabel 1. Data Intensitas Radiasi Matahari di Kota Semarang, dengan superkapasitor berkapasitas 400 Wh [19], [20]. Berdasarkan karakteristik iklim tropis lembab Kota Semarang, fluktuasi positif (RR(i) > 1,5 kW/menit) maupun negatif (RR(i) < -1,5 kW/menit) terjadi secara intensif sepanjang hari akibat pergerakan awan konvektif, sehingga analisis fluktuasi secara mendetail diperlukan untuk merancang sistem penyimpanan energi yang optimal.

Batas RR sebesar ± 10%/menit dari kapasitas nominal PV ditetapkan berdasarkan standar interkoneksi sistem tenaga surya ke jaringan listrik, yang juga diadopsi dalam penelitian sebelmunya [12]. Untuk data intensitas radiasi matahari seperti pada Tabel 1. Data Intensitas Radiasi Matahari di Kota Semarang, yang digunakan sebagai rujukan untuk penelitian ini [20].

Tabel 1. Data Intensitas Radiasi Matahari di Kota Semarang

Bulan	Intensitas Radiasi Matahari (kWh/m²/hari)
Januari	4,60
Febuari	5,29
Maret	4,55
April	5,08
Mei	5,41
Juni	5,14
Juli	5,38
Agustus	5,94
September	6,49
Oktober	6,54
November	6,14
Desember	5,50
Rata-Rata	**5,50**

2.4. Analisis Moving Average dan Klasifikasi

Algoritma *Moving Average* (MA) beresolusi 1 detik diimplementasikan sebagai 'Tahap Prediksi' untuk memuluskan fluktuasi daya photovoltaik (*Power*

smoothing). MA menghasilkan nilai prediksi daya referensi jangka pendek dengan mengkalkulasi rata-rata pergerakan tren daya historis untuk PV sesuai datasheet [19]. Secara matematis, prediksi ini dirumuskan dengan persamaan (10).

$$\widehat{p_t} = \frac{1}{N_{MA}} \sum_{\tau=1}^{N_{MA}} X_{t-N_{MA}+\tau-1} \quad (10)$$

di mana $\widehat{p_t}$ adalah prediksi referensi saat ini, N_{MA} adalah ukuran jendela waktu, dan X adalah daya PV pada langkah sebelumnya yang akan mempengaruhi sistem PV [19]. Resolusi tinggi ini krusial agar sistem responsif terhadap dinamika perubahan iradiasi matahari secara *real-time* [19], [20], [21], [22].

Prediksi MA dikombinasikan dengan metode *unsupervised learning K-Means Clustering* untuk mengklasifikasikan volatilitas daya PV. Lalu, K-Means mengelompokkan data dengan meminimalkan jumlah kuadrat galat (*Sum of squared errors*) stabilitas tegangan terhadap pusat klasternya (*Centroid*) [8]. Fungsi objektif ini dinyatakan melalui persamaan (11).

$$E = \sum_{i=1}^{k} \sum_{p \in C_i} |p - m_i|^2 \quad (11)$$

di mana E adalah total galat, k jumlah klaster, p titik sampel fluktuasi, C_i himpunan data klaster, dan m_i merupakan *centroid*. Pendekatan spasial ini efektif memetakan distribusi temporal fluktuasi daya secara mandiri [23], [24].

Algoritma *K-Means* ini kemudian membagi data ke dalam 5 klaster yang mewakili profil cuaca historis Kota Semarang: sangat berawan, berawan biasa, semi cerah, sedikit berawan, dan cerah. Klasifikasi empiris ini bertindak sebagai filter logis pendeteksi fluktuasi ekstrem yang melampaui batas RR ±10%/menit yang disesuaikan dengan datasheet PV [19], [23], [24].

Integrasi MA dan *K-Means* membentuk mekanisme kontrol presisi untuk mengatur siklus kerja superkapasitor. Sinyal referensi MA dikalibrasi oleh batasan klasterisasi K-Means guna menentukan logika kompensasi, jika daya panel P_{pv} melebihi referensi P_{AVG}, superkapasitor menyerap kelebihan daya (C*harging*), dan sebaliknya menyuplai daya (D*ischarging*) saat terjadi defisit [14], [18]. Sinergi ini mencegah superkapasitor merespons fluktuasi kecil, sehingga meminimalkan kebutuhan kapasitas alat sekaligus mengembalikan tingkat pengisian ke level awal.

2.5. Perancangan Kontrol Superkapasitor

Skema kontrol *power smoothing* dirancang menggunakan strategi *Predictor-Corrector* (P-C) yang terdiri dari tahap prediksi dan koreksi untuk memitigasi fluktuasi iradiasi matahari secara *real-time* sekaligus mengoptimalkan operabilitas superkapasitor sebelum daya diinjeksikan ke jaringan listrik [12]. Skema kontrol yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 3. Kontrol Perbandingan P-C, RR, dan MA.



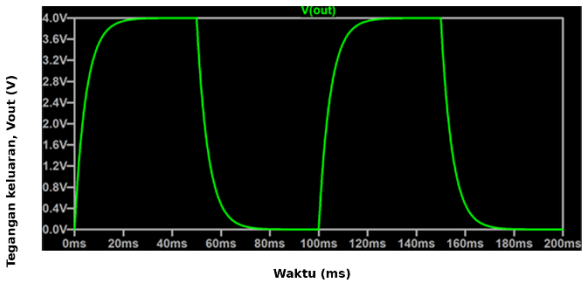
Gambar 3. Kontrol Perbandingan P-C, RR, dan MA

Untuk memvalidasi keandalan algoritma kontrol yang telah dirancang di atas, pemodelan sistem dilakukan menggunakan parameter perangkat keras yang mengadopsi spesifikasi tervalidasi dari datasheet dan penelitian sebelumnya [6], [7], [8], [9], [10], [19], [20]. Meskipun parameter kapasitas alat merujuk pada standar tersebut, sinyal input iradiasi yang digunakan tetap berbasis pada data historis nyata di Kota Semarang yang ditunjukkan pada Tabel 1. Data Intensitas Radiasi Matahari di Kota Semarang [20].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Model Rangkaian Superkapasitor

Simulasi rangkaian RC pada LTspice dilakukan untuk memvalidasi model superkapasitor yang digunakan dalam penelitian ini. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4 berupa respons tegangan keluaran V_{out} pada kapasitor terhadap sinyal masukan berbentuk pulsa, yang merepresentasikan dinamika superkapasitor selama proses *charging* dan *discharging*.



Gambar 4. Grafik Charging dan Discharging

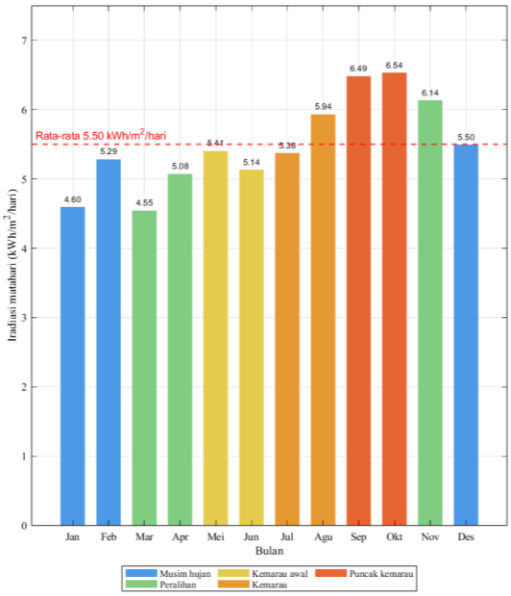
Pada interval awal (0-50 ms), tegangan meningkat secara eksponensial dari 0 V menuju sekitar 4 V (C*harging*). Laju perubahan tegangan maksimum terjadi pada awal waktu dan menurun seiring meningkatnya tegangan kapasitor. Hal ini sesuai dengan persamaan (4). Pada interval berikutnya (50-100 ms), tegangan menurun secara eksponensial menuju nol (*Discharging*), sesuai dengan persamaan (5). Perilaku ini menunjukkan bahwa energi disimpan dan dilepaskan secara bertahap sesuai karakteristik sistem orde satu.

Selain itu, bentuk output yang lebih halus dibandingkan input menunjukkan bahwa rangkaian RC berfungsi sebagai

low-pass filter, yang meredam fluktuasi frekuensi tinggi. Pada hasil simulasi diperoleh konstanta waktu 4,7 ms. Hasil simulasi menunjukkan kesesuaian dengan teori persamaan (6), di mana sistem merespon secara eksponensial dan mencapai kondisi tunak dalam orde beberapa τ. Dalam konteks photovoltaic, karakteristik ini memungkinkan superkapasitor berfungsi sebagai penyangga energi untuk menyerap dan melepaskan daya, serta menstabilkan tegangan sistem.

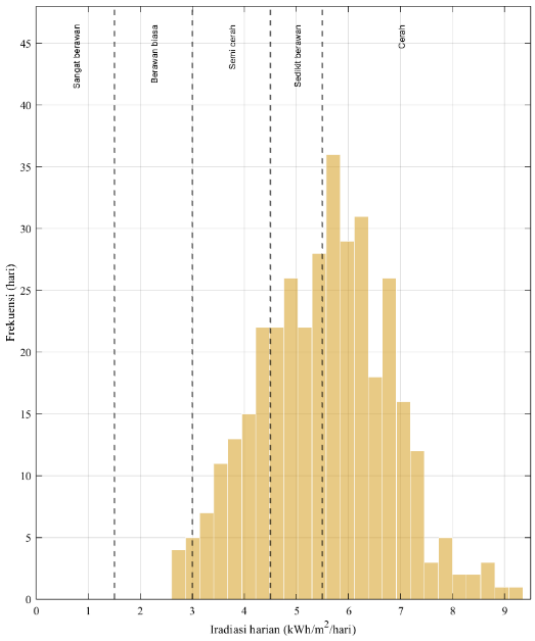
3.2. Hasil Analisis Fluktuasi Daya PV dan RR

Berdasarkan data NASA Power dan penelitian terdahulu untuk wilayah Kota Semarang, iradiasi matahari rata-rata bulanan ditunjukkan pada Gambar 5. Rata-Rata Iradiasi Kota Semarang, yang memiliki nilai iradiasi rata-rata tahunan tercatat sebesar 5,50 kWh/m²/hari, dengan nilai tertinggi terjadi pada bulan Oktober sebesar 6,54 kWh/m²/hari dan nilai terendah pada bulan Maret sebesar 4,55 kWh/m²/hari [20]. Pola iradiasi menunjukkan variasi musiman yang jelas, di mana bulan Januari dan Februari yang merupakan puncak musim hujan memiliki nilai iradiasi lebih rendah dibandingkan bulan-bulan kemarau seperti Agustus hingga Oktober. Variasi musiman yang telah terlampir pada Gambar 5. Rata-Rata Iradiasi Kota Semarang, secara langsung berdampak pada profil keluaran daya sistem PV, sehingga penting untuk mempertimbangkan seluruh rentang kondisi iradiasi dalam perancangan sistem penyimpanan energi.



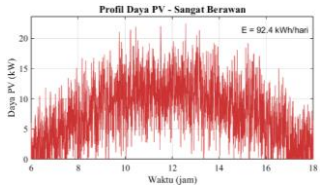
Gambar 5. Rata-Rata Iradiasi Kota Semarang

Berdasarkan distribusi iradiasi harian yang ditunjukkan pada Gambar 6. kondisi cuaca Kota Semarang diklasifikasikan menjadi lima kategori, yaitu sangat berawan (0-1,5 kWh/m²/hari), berawan biasa (1,5-3,0 kWh/m²/hari), semi cerah (3,0-4,5 kWh/m²/hari), sedikit berawan (4,5-5,5 kWh/m²/hari), dan cerah (5,5-6,54 kWh/m²/hari). Distribusi ini menunjukkan bahwa sebagian besar hari dalam setahun di Kota Semarang berada pada kondisi sedikit berawan hingga cerah dengan frekuensi tertinggi pada kisaran iradiasi 4,5-6,0 kWh/m²/hari. Meskipun demikian, tetap terdapat potensi fluktuasi daya PV yang signifikan pada seluruh kategori cuaca akibat pergerakan awan konvektif yang intensif, sebagai karakteristik iklim tropis lembab Indonesia [25].

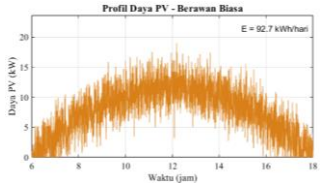


Gambar 6. Distribusi Iradiasi Kota Semarang

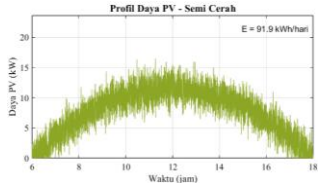
Pada Gambar 7. Analisis Fluktuasi Daya Saat Sangat Berawan, sampai dengan Gambar 11. Analisis Fluktuasi Daya Saat Cerah, menunjukkan profil daya keluaran sistem PV 15 kWp selama satu hari (Pukul 06.00-18.00) untuk masing-masing kategori kondisi cuaca. Pada kondisi sangat berawan (Gambar 7), profil daya sangat tidak beraturan dengan fluktuasi ekstrem yang terjadi sepanjang hari dan energi harian yang dihasilkan sebesar 91,9-92,7 kWh/hari. Fenomena ini diakibatkan oleh pergerakan awan konvektif yang menyebabkan iradiasi berubah secara tiba-tiba, sehingga keluaran daya PV naik dan turun dalam interval waktu yang sangat singkat. Pada kondisi berawan biasa (Gambar 8), profil daya mulai membentuk pola parabola yang lebih teratur dengan energi harian 92,7 kWh/hari, meskipun fluktuasi masih terjadi secara signifikan. Kondisi semi cerah (Gambar 9) menunjukkan profil yang semakin mendekati kurva ideal dengan energi harian 91,9 kWh/hari, sementara fluktuasi masih tampak akibat awan yang sesekali melintas. Pada kondisi sedikit berawan (Gambar 10), kurva daya sudah lebih halus dengan puncak yang jelas di sekitar tengah hari dan energi harian 92,2 kWh/hari. Pada kondisi cerah (Gambar 11), profil daya membentuk kurva parabola yang hampir sempurna dengan energi harian terendah sebesar 92 kWh/hari. Menariknya, kondisi sangat berawan justru menghasilkan energi harian tertinggi dibandingkan kondisi cerah, yang merupakan fenomena *cloud enhancement* atau efek lensa awan di mana celah awan sesekali memfokuskan iradiasi melebihi kondisi langit terbuka [25].



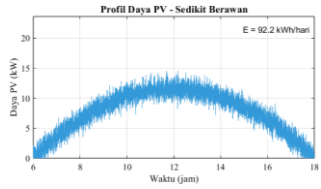
Gambar 7. Analisis Fluktuasi Saat Berawan



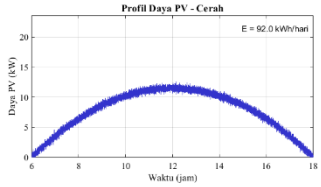
Gambar 8. Analisis Fluktuasi Saat Biasa



Gambar 9. Analisis Fluktuasi Saat Cerah

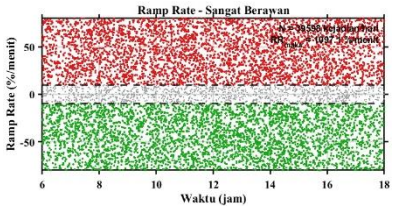


Gambar 10. Analisis Fluktuasi Saat Berawan

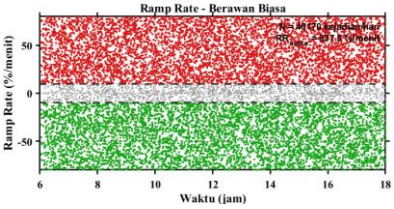


Gambar 11. Analisis Fluktuasi Saat Cerah

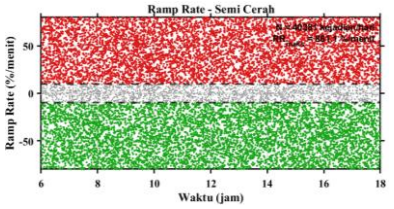
Pada Gambar 12. Ramp Rate Sangat Berawan, sampai dengan Gambar 16. Ramp Rate Cerah, menunjukkan nilai Ramp Rate (RR) yang dihitung menggunakan Persamaan (9), untuk setiap detik selama satu hari pada masing-masing kondisi cuaca. Titik berwarna merah menunjukkan pelanggaran RR positif (RR > +10%/menit), titik hijau menunjukkan pelanggaran RR negatif (RR < -10%/menit), sedangkan titik abu-abu menunjukkan nilai RR yang masih dalam batas aman. Pada kondisi sangat berawan (Gambar 12), hampir seluruh titik data berwarna merah dan hijau dengan jumlah total pelanggaran N = 39.598 kejadian/hari, yang berarti SC harus aktif hampir setiap detik. Nilai RR maksimum pada kondisi ini mencapai 1097,1%/menit, jauh melampaui batas ±10%/menit. Pada kondisi berawan biasa (Gambar 13), jumlah pelanggaran tercatat sebanyak 40.170 kejadian/hari dengan RR maksimum 837,5%/menit. Pada kondisi semi cerah (Gambar 14), pelanggaran RR tercatat 40.381 kejadian/hari dengan RR maksimum 861,1%/menit. Pada kondisi sedikit berawan (Gambar 15), pelanggaran berkurang menjadi 40.055 kejadian/hari dengan RR maksimum 521,0%/menit. Pada kondisi cerah (Gambar 16), nilai RR maksimum turun menjadi 315,1%/menit dengan 38.351 pelanggaran/hari. Meskipun kondisi cerah memiliki RR maksimum terendah, jumlah pelanggaran masih sangat tinggi karena perubahan iradiasi detik ke detik tetap menghasilkan fluktuasi yang melampaui batas ±10%/menit. Hasil ini menunjukkan pola yang lebih fluktuatif dibandingkan penelitian Benavides et al., yang mencatat RR maksimum ±78,2%/menit pada sistem 15 kWp di Ecuador [12]. Kondisi ini mengindikasikan bahwa iklim tropis Kota Semarang menghasilkan dinamika fluktuasi yang lebih intensif dibandingkan lokasi rujukan sehingga memerlukan sistem kompensasi energi yang lebih responsif [12].



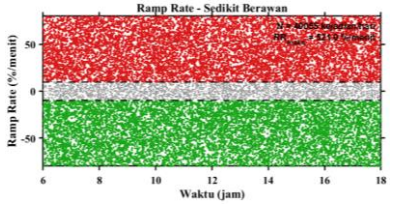
Gambar 12. Ramp Rate Sangat Berawan



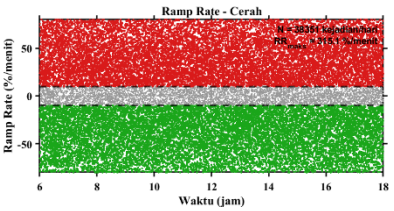
Gambar 13. Ramp Rate Berawan Biasa



Gambar 14. Ramp Rate Semi Cerah

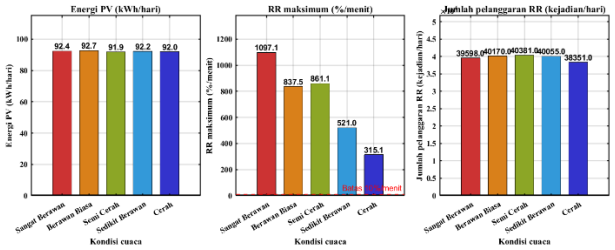


Gambar 15. Ramp Rate Sedikit Berawan



Gambar 16. Ramp Rate Cerah

Pada Gambar 17. Ringkasan Analisis Fluktuasi PV, telah merangkum perbandingan energi harian, nilai RR maksimum, dan jumlah pelanggaran RR untuk kelima kondisi cuaca secara simultan. Berdasarkan Gambar 17, seluruh kondisi cuaca menunjukkan nilai RR maksimum yang jauh melampaui batas ±10%/menit (Ditandai garis merah putus-putus), dengan rentang nilai antara 315,1%/menit hingga 1097,1%/menit. Jumlah pelanggaran RR berkisar antara 38.351 hingga 40.381 kejadian/hari untuk semua kondisi cuaca, membuktikan bahwa SC diperlukan secara aktif sepanjang tahun di Kota Semarang tanpa terkecuali.



Gambar 17. Ringkasan Analisis Fluktuasi PV

Pada Tabel 2. Hasil Analisis Fluktuasi Daya PV Kota Semarang, telah merangkum hasil kuantitatif analisis fluktuasi untuk seluruh kondisi cuaca.

Tabel 2. Hasil Analisis Fluktuasi Daya PV Kota Semarang

Kondisi Cuaca	E_{PV} (kWh/hari)	RR Maks (%/menit)	Pelanggaran (Kejadian/hari)
Sangat Berawan	92,4	1097,1	39.598
Berawan Biasa	92,7	872,5	40.170
Semi Cerah	91,9	861,1	40.381
Sedikit Berawan	92,2	531,0	40.055
Cerah	92,0	315,1	38.351
Rata-rata	92,24	735,36	39.711

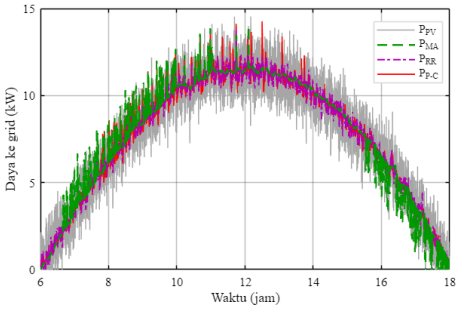
3.3. Hasil Skema Kontrol

3.3.1. Hasil Perbandingan Algoritma

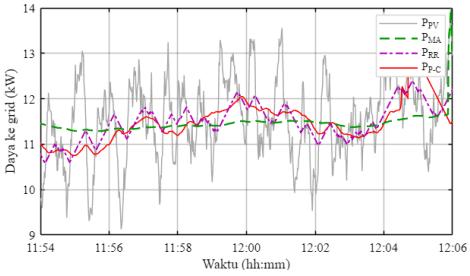
Fokus utama dari pengujian skema kontrol *Predictor-Corrector* (P-C) ini adalah mengevaluasi perbandingan langsung antara profil daya photovoltaik (PV) aktual dengan profil daya keluaran yang telah dihaluskan (S*moothed power*). Berdasarkan grafik hasil simulasi komparatif, terlihat kontras visual dan matematis yang sangat tajam antara kedua sinyal tersebut. Kurva daya PV aktual menampilkan fluktuasi transien yang sangat ekstrem, ditandai dengan lonjakan dan penurunan daya berfrekuensi tinggi yang terjadi secara mendadak akibat pergerakan dinamis awan konvektif. Sebaliknya, profil daya keluaran final yang akan diinjeksikan ke jaringan (*Grid*) terbukti sangat stabil, landai, dan secara efektif terbebas dari anomali iradiasi tersebut.

Keberhasilan perataan daya keluaran ini merupakan hasil sintesis komputasional dari dua tahapan hierarkis pada kontroler. Pada tahap pertama, algoritma *Moving Average* (MA) yang bertindak sebagai prediktor sukses menyaring *noise* frekuensi tinggi dari kurva daya aktual. Proses ini mengekstrak garis tren dasar untuk menghasilkan sinyal daya referensi awal yang lebih moderat. Setelah itu, sinyal tersebut langsung dikalibrasi oleh tahap kedua, yakni tahap koreksi melalui algoritma RR. Blok RR mendeteksi secara *real-time* setiap laju fluktuasi dan memotong paksa perubahan daya yang melampaui batas regulasi stabilitas absolut sebesar ±10%/menit. Secara visual, intervensi pembatasan laju transien inilah yang memaksa grafik bergerigi tajam dari daya aktual berubah menjadi bentuk lereng (S*lope*) yang sangat mulus dan terkontrol pada kurva final.

Transformasi kurva daya dari kondisi fluktuatif menjadi mulus ini dimanifestasikan secara fisik oleh kinerja responsif perangkat superkapasitor. Setiap selisih daya kompensasi yang merupakan hasil pengurangan antara daya PV aktual dengan daya referensi final yang diizinkan oleh batas RR langsung dieksekusi oleh SC tanpa jeda. Mekanisme pengisian (C*harging*) saat PV surplus dan pengosongan (*Discharging*) saat PV defisit secara sempurna menutupi jarak antara kedua kurva tersebut. Secara keseluruhan, grafik komparasi ini memberikan pembuktian empiris yang kuat bahwa integrasi kontrol MA dan batasan RR mampu memitigasi intermitensi PV secara optimal, sehingga sistem dijamin mematuhi standar keamanan injeksi daya ke jaringan utilitas komersial.



Gambar 18. Grafik Perbandingan Algoritma



Gambar 19. Zoom Hasil Perbandingan

Gambar 18. membandingkan daya keluaran ke grid menggunakan algoritma MA, RR, dan P-C terhadap daya PV pada kondisi sedikit berawan, sedangkan Gambar 19. memperbesar rentang waktu pukul 11.54-12.06. Pada rentang tersebut, daya PV berfluktuasi antara 9,1261-13,9926 kW. Algoritma MA menghasilkan daya keluaran sebesar 11,2896-13,9926 kW, algoritma RR sebesar

10,5771-12,4025 kW, dan algoritma P-C sebesar 10,7467-13,2315 kW. Simpangan baku daya PV sebesar 0,8937 kW menurun menjadi 0,2285 kW pada MA, 0,3925 kW pada RR, dan 0,4703 kW pada P-C. Sementara itu, simpangan baku laju perubahan daya (Ramp rate) masing-masing sebesar 315,6 W/s untuk PV, 61,4 W/s untuk MA, 24,7 W/s untuk RR, dan 45,0 W/s untuk P-C. Hasil ini menunjukkan bahwa MA menghasilkan fluktuasi daya paling rendah berdasarkan kedua ukuran simpangan baku, sedangkan P-C memiliki simpangan baku ramp rate sedikit lebih tinggi dibandingkan daya PV aktual.

Kelemahan RR tanpa tahap prediksi terlihat pada Gambar 12, yang memperlihatkan SOC metode RR berayun antara 5% dan 95% serta beberapa kali jenuh di batas 95% pada kondisi sangat berawan, sehingga SC tidak dapat menyerap lonjakan daya berikutnya. Sebaliknya, pada kondisi cerah seperti yang ditunjukkan Gambar 16, SOC hanya naik dari sekitar 5% menjadi 18%. Perbandingan dengan penelitian rujukan dirangkum pada Tabel 3.

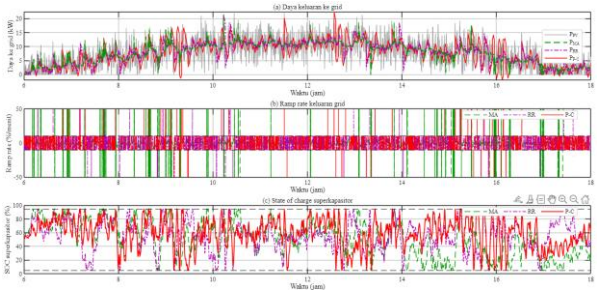
Tabel 3. Perbandingan dengan Penelitian Rujukan

Penelitian	Metode, Penyimpanan, Validasi	Temuan Utama
Benavides et al. [12].	P-C (K-Means + RR); SC; eksperimen, Ekuador	Rugi energi P-C lebih rendah dari MA dan RR; RR maks ±78,2% /menit
Rekioua et al.[13]	MA + RR; BSS-SC (HESS); simulasi	HESS meningkatkan performa namun menambah biaya dan kompleksitas
Kryonidis et al. [15]	MA, RR; BSS; eksperimen	BSS perlu diganti beberapa kali selama umur operasi sistem PV
Ihsan et al. [14]	Hibrida SC-Baterai; HESS; simulasi	SC memperpanjang umur baterai pada PLTS off-grid
Cao et al. [11]	MA + RR; HESS; simulasi	Ukuran optimal HESS bergantung pada regulasi SOC dan profil beban
Penelitian ini	MA, RR, P-C; SC 400 Wh; simulasi, Semarang	RR maks PV 315,1% - 1097,1% /menit; MA tertinggal; SOC metode RR jenuh saat sangat berawan

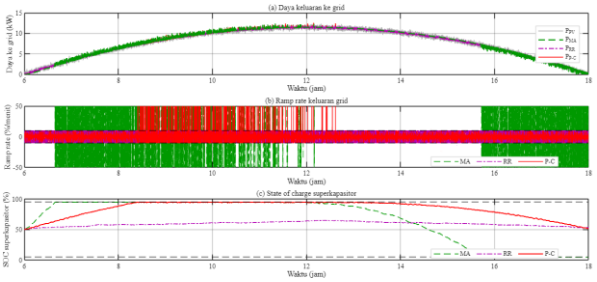
Meskipun penelitian ini masih berbasis simulasi, kecenderungannya konsisten dengan penelitian rujukan, bahwa metode P-C yang mengintegrasikan tahap prediksi MA dan koreksi RR terbukti lebih unggul dibandingkan masing-masing metode secara individual dalam hal stabilitas daya keluaran, efisiensi penggunaan energi SC, dan pengelolaan SOC dalam rentang operasional yang aman [8], [12], [13], [14].

3.3.2. Perbandingan Profil Daya dan Ramp Rate

Untuk menganalisis kinerja masing-masing metode secara lebih mendalam pada kondisi cuaca ekstrem, perbandingan profil daya output ke grid, nilai RR, dan profil SOC SC dilakukan pada dua kondisi cuaca, yaitu kondisi sangat berawan dan cerah, seperti ditunjukkan pada Gambar 20 dan Gambar 21.



Gambar 20. Perbandingan Fluktuasi Daya pada Kondisi Sangat Berawan

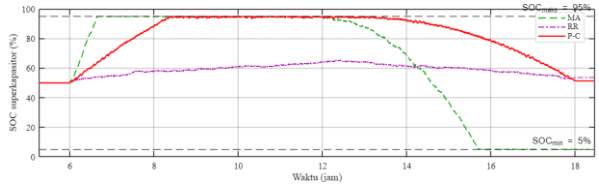


Gambar 21. Perbandingan Fluktuasi Daya pada Kondisi Cerah

Gambar 20 menunjukkan bahwa pada kondisi sangat berawan, perbedaan kinerja antar metode paling signifikan. Metode MA mengalami keterlambatan respons, metode RR menyebabkan SOC berayun hingga batas jenuh, sedangkan metode P-C mempertahankan profil paling stabil. Gambar 21 menunjukkan kondisi cerah di mana ketiga metode menghasilkan profil serupa, namun P-C tetap unggul dalam pengelolaan SOC [12].

3.3.3. Perbandingan Profil SOC

Perbandingan profil State of Charge (SOC) superkapasitor untuk ketiga metode ditunjukkan pada Gambar 22. Profil SOC.



Gambar 22. Profil SOC

Metode P-C menunjukkan pengelolaan SOC yang lebih optimal dengan menjaga SOC dalam rentang operasional yang lebih stabil dibandingkan metode MA dan RR. Metode MA cenderung mengoperasikan SC secara terus-menerus sehingga SOC sering mencapai batas maksimum (SOC_{max} = 95%) maupun minimum (SOC_{min} = 5%), sedangkan metode RR mengoperasikan SC hanya saat RR melampaui batas namun tanpa mekanisme koreksi prediktif. Metode P-C menghindari penggunaan SC yang

tidak perlu melalui karakteristik prediktif-korektifnya, sehingga siklus charge atau discharge yang berlebihan dapat dikurangi dan umur pakai SC dapat diperpanjang.

3.4. Analisis Keunggulan Metode P-C

Keunggulan utama metode *Predictor-Corrector* (P-C) terletak pada integrasi tahap prediksi (Moving Average) dan koreksi (Ramp Rate). Algoritma tersebut menutupi kelemahan masing-masing metode tunggal dengan menghasilkan profil daya keluaran yang sangat stabil. Hasilnya, sistem mampu memitigasi intermitensi daya secara presisi dan konsisten mematuhi standar regulasi batas fluktuasi absolut ±10%/menit tanpa delay komputasi. Selain stabilitas daya, metode P-C menawarkan manajemen *State of Charge* (SOC) yang jauh lebih optimal melalui algoritma prediktif-korektifnya, superkapasitor hanya diaktifkan saat fluktuasi benar-benar membutuhkan intervensi. Hal ini mencegah siklus charge atau discharge berlebihan yang kerap membuat SOC menyentuh batas kritis (5% atau 95%) pada metode MA murni.

3.5. Analisis Stabilitas Daya Sistem PV

Stabilitas daya sistem PV ditinjau berdasarkan laju perubahan daya yang diinjeksikan ke titik sambung jaringan. Tanpa kompensasi, RR maksimum daya PV di Kota Semarang berkisar antara 315,1%-1097,1%/menit, atau sekitar 32 hingga 110 kali lebih besar dibandingkan batas ±10%/menit. Hal ini menunjukkan bahwa daya keluaran PV melampaui batas laju perubahan daya pada seluruh kondisi cuaca yang disimulasikan [8], [11]. Dengan adanya SC, keseimbangan daya pada titik sambung menjadi $P_{grid} = P_{PV} - P_{SC}$, sehingga SC menyerap kelebihan daya saat P_{PV} melonjak (*Charging*) dan menyuplai daya saat P_{PV} turun mendadak (*Discharging*). Kapasitas kompensasi ini dibatasi oleh energi yang tersimpan dalam SC. Energi minimum yang dibutuhkan untuk mengkompensasi penurunan daya sebesar ΔP dinyatakan pada Persamaan (12).

$$E_{SC} = \frac{\Delta P^2}{2RR_{lim}} \quad (12)$$

SC berkapasitas 400 Wh dengan rentang SOC 5-95% memiliki energi tersedia sebesar 360 Wh. Dengan batas RR 1,5 kW/menit, kemampuan kompensasi SC bergantung pada energi tersimpan dan durasi fluktuasi. Ketika SOC mencapai batas 5% atau 95%, kemampuan SC untuk menyerap atau menyuplai daya menjadi terbatas, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis kinerja metode Predictor-Corrector (P-C) berbasis superkapasitor untuk meredam fluktuasi daya pada sistem PV 15 kWp di Kota Semarang. Hasil simulasi menunjukkan bahwa RR maksimum daya PV berkisar antara 315,1-1097,1%/menit, jauh melampaui batas ±10%/menit. Jumlah pelanggaran RR pada berbagai kondisi cuaca mencapai 38.351-40.381 kejadian/hari. Hasil ini menunjukkan tingginya fluktuasi daya PV dan perlunya sistem kompensasi untuk menjaga stabilitas daya yang diinjeksikan ke jaringan.

Perbandingan ketiga algoritma menunjukkan bahwa metode Moving Average (MA) memiliki keterlambatan respons (power lagging), sedangkan metode Ramp Rate (RR) lebih rentan mengalami pelanggaran batas laju perubahan daya. Metode P-C menggabungkan prediksi MA dan koreksi RR sehingga mampu mengurangi jumlah pelanggaran dibandingkan metode RR pada seluruh kondisi cuaca yang diuji. Meskipun demikian, kinerja P-C belum selalu lebih baik dibandingkan MA pada setiap kondisi.

Kapasitas superkapasitor sebesar 400 Wh dengan rentang operasi SOC 5-95% menyediakan energi yang dapat digunakan sebesar 360 Wh. Kemampuan kompensasinya tetap dibatasi oleh kapasitas energi dan kondisi SOC, terutama ketika terjadi fluktuasi ekstrem. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan validasi eksperimental pada sistem PV skala nyata di Kota Semarang serta mengkaji kapasitas superkapasitor yang optimal untuk menghadapi karakteristik fluktuasi daya pada iklim tropis.

DAFTAR PUSTAKA

[1] F. Tarumanegara, H. S. Sidik, and F. Juliana Sanjaya, "Performa Produksi Dan Konsumsi Sumber Energi Negara-Negara Dunia Pada Tahun 2001-2022," 2024. doi: https://doi.org/10.5281/.13377905.

[2] C. Altuntas Vural, G. Balci, E. Surucu Balci, and A. Gocer, "Looking inside the panarchy: reorganisation capabilities for food supply chain resilience against geopolitical crises," *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 30, no. 7, pp. 1–19, 2024, doi: 10.1108/SCM-02-2024-0121.

[3] A. Rahmatulummah and S. Anugrah Resky, "Eskalasi Konflik Iran-Israel di Damaskus: Implikasi terhadap Stabilitas Keamanan Regional dan Global," Jun. 2024. doi: https://doi.org/10.70836/jh.v9i1.49.

[4] B. Harianto and M. Karjadi, "Kombinasi Panel Surya dan Generator Konvensional untuk Pemenuhan Beban Listrik," *R2J*, vol. 7, no. 4, 2025, doi: 10.38035/rrj.v7i4.

[5] A. A. Razaqi, R. Y. Hariara, J. Windarta, D. A. Ajulian, and Z. Macrina, "PERANCANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA HYBRID PHOTOVOLTAIC DAN ANGIN DITINJAU DARI SEGI TEKNIS DAN EKONOMI TEKNIK DI MSTP UNDIP JEPARA," Semarang, Jun. 2025. doi: https://doi.org/10.14710/transient.v14i2.76-85.

[6] L. Guanghua, S. H. H. Shah, A. A. Zaidi, F. Nawaz, and S. Z. Khan, "A Review of State-of-the-Art Developments in Large-Scale Photovoltaic Solar Renewable Energy Systems," 2026, *John Wiley and Sons Ltd*. doi: 10.1155/je/4799038.

[7] P. Arévalo, D. Benavides, M. Tostado-Véliz, J. A. Aguado, and F. Jurado, "Smart monitoring method for

photovoltaic systems and failure control based on power smoothing techniques," *Renew. Energy*, vol. 205, pp. 366–383, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.01.059.

[8] Y. Situmorang, T. Sinaga, A. Sebastian Siahaan, D. Jonto Sinaga, and A. Sinuraya, "Pengaruh Penambahan Pembangkit Surya Terdistribusi terhadap Kestabilan Tegangan Jaringan," *Jurnal Multidisiplin Ilmu Akademik*, vol. 3, no. 1, pp. 136–144, 2026, doi: 10.61722/jmia.v3i1.7697.

[9] S. Ebrahimi, S. M. S. Ullah, and F. Ferdowsi, "Adaptable Volt-VAR control digital twinning for smart solar inverters," *Renewable Energy Focus*, vol. 48, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ref.2023.100525.

[10] S. I. Gkavanoudis *et al.*, "Provision of Ramp-rate Limitation as Ancillary Service from Distribution to Transmission System: Definitions and Methodologies for Control and Sizing of Central Battery Energy Storage System," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 11, no. 5, pp. 1507–1518, Sep. 2023, doi: 10.35833/MPCE.2022.000595.

[11] Y. Cao, Q. Wu, H. Zhang, and C. Li, "Optimal sizing of hybrid energy storage system considering power smoothing and transient frequency regulation," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 142, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108227.

[12] D. Benavides, P. Arévalo, J. A. Aguado, and F. Jurado, "Experimental validation of a novel power smoothing method for on-grid photovoltaic systems using supercapacitors," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 149, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109050.

[13] D. Rekioua *et al.*, "Optimized Power Management Approach for Photovoltaic Systems with Hybrid Battery-Supercapacitor Storage," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 19, Oct. 2023, doi: 10.3390/su151914066.

[14] B. Ihsan, D. Sahidin, T. Desmana Rachmildha, and D. Hamdani, "Peningkatan Umur Baterai pada PLTS Off-grid menggunakan Penyimpanan Energi Hibrida Berbasis Superkapasitor-Baterai," Cilacap, Dec. 2024. doi: https://doi.org/10.35970/e-joint.v5i2.2560.

[15] G. C. Kryonidis, A. I. Nousdilis, K. D. Pippi, and T. A. Papadopoulos, "Impact of power smoothing techniques on the long-term performance of battery energy storage systems," in *2021 56th International Universities Power Engineering Conference: Powering Net Zero Emissions, UPEC 2021 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Aug. 2021. doi: 10.1109/UPEC50034.2021.9548172.

[16] K. M. Nguyen, L. Van Phan, D. D. Nguyen, and T. D. Nguyen, "A comprehensive technical analysis on optimal sizing and operating strategy for large-scale direct coupled PV-electrolyser systems, considering PV system faults, degradation and partial shading conditions," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 59, pp. 492–506, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.043.

[17] J. Hurtt and K. Baker, "Sensitivity Analysis of Photovoltaic System Design Parameters to Passively Mitigate Ramp Rates," *IEEE J. Photovolt.*, vol. 11, no. 2, pp. 545–551, Mar. 2021, doi: 10.1109/JPHOTOV.2020.3045679.

[18] M. Krašovic and P. Virtič, "ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF PARAMETERS WHEN CHARGING AND DISCHARGING A CAPACITOR USING DIFFERENTIAL EQUATIONS," 2022. doi: https://doi.org/10.18690/jet.15.2.65-80.2022.

[19] CV. Cipta Karya Energi, "Datasheet PLTS Terpusat 15 kWp," pp. 1–1, Mar. 2025, Accessed: Oct. 22, 2026. [Online]. Available: https://ciptakaryaenergi.co.id/product/plts-komunal-15-kwp/

[20] W. Nugroho, A. Nugroho, and B. Winardi, "ANALISIS POTENSI DAN UNJUK KERJA PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA DI GEDUNG FAKULTAS PSIKOLOGI UNIVERSITAS DIPONEGORO," Jun. 2021. [Online]. Available: https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient

[21] D. R. Thinesh *et al.*, "A Hybrid Online Model for Short-Term Solar Irradiance Forecasting using Minimal Data," in *2023 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy: Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy for Sustainable Development, PESGRE 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/PESGRE58662.2023.10404438.

[22] C. I. Chen, S. H. Wu, and Z. X. Huang, "Inverter-Based Solar Irradiance Estimation for Improved Photovoltaic Power Forecasting without Pyranometers," in *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2025. doi: 10.1109/IAS62731.2025.11061585.

[23] R. Mussabayev and R. Mussabayev, "Comparative Analysis of Optimization Strategies for K-means Clustering in Big Data Contexts: A Review," May 2024, doi: 10.48550/arXiv.2310.09819.

[24] P. Z. Lodetti, E. A. C. A. Neto, M. A. I. Martins, G. H. D. S. Costa, and M. A. Ludwig, "MAE and RMSE Analysis of K-means Predictive Algorithm for Photovoltaic Generation," in *International Conference on Electrical, Computer, and Energy Technologies, ICECET 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ICECET55527.2022.9872976.

[25] T. Orosz, A. Rassõlkin, P. Arsénio, P. Poór, D. Valme, and Á. Sleisz, "Current Challenges in Operation, Performance, and Maintenance of Photovoltaic Panels," Mar. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/en17061306.