

Karakteristik Tegangan dan Stabilitas Daya untuk Sistem Kelistrikan Off-Grid Panel Surya Berbasis Penyimpanan Hibrida Baterai dan Superkapasitor

Ramadhan Candra Setiawan¹, Januar Adiyansyah Ath thuur², Wahyu Setyo Pambudi³, dan Misbahul Munir⁴

Teknik Elektro, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya^{1,2,3,4}
e-mail: ramandhancandra77@gmail.com¹

ABSTRACT

The need for renewable energy generation is increasing along with the development of off-grid electricity technology or that is not connected to the electricity network. However, the drawback of this system is in the power storage which must always be there to maintain power continuity when the source is not sufficiently loaded so that the load requirements can always be met. This research is important to do considering the need for renewable energy generation is increasing, especially in areas that are difficult to reach by the main electricity network or in locations far from the main electricity infrastructure. An off-grid solar panel system is an effective solution, but requires an optimal energy storage management system so that electricity needs can be met continuously. In this study, the Perturb and Observe algorithms are used to see the performance of off-grid solar panel electrical systems with energy storage management using batteries and supercapacitors. The aim of this research is to find a solution that can improve the power quality and stability of an energy storage management system for photovoltaics. From the results of the study it was found that with the Perturb and Observe control scheme, the up and down intermittent gradually produces better results because the up and down intermittent does not have significant overshoot and undershoot but the oscillations on the load side are higher when the irradiance is low, reaching 10% and undershoot up to 460 W while at high irradiance it reaches 7% without undershoot in the load power scope, at both irradiance levels, the overshoot reaches 545 W to 546 W.

Keywords: Batteries, continuity, solar panels, power stability, supercapacitors

ABSTRAK

Kebutuhan pembangkitan energi terbarukan semakin meningkat seiring dengan berkembangnya teknologi kelistrikan off-grid atau yang tidak menyambung ke jaringan kelistrikan. Namun kekurangan dari sistem ini adalah pada penyimpan daya yang harus selalu ada untuk menjaga kontinuitas daya pada saat sumber tidak menyuplai beban dengan cukup agar kebutuhan beban dapat selalu terpenuhi. Penelitian ini penting dilakukan mengingat kebutuhan akan pembangkitan energi terbarukan semakin meningkat, terutama di daerah yang sulit dijangkau oleh jaringan listrik utama atau di lokasi yang jauh dari infrastruktur listrik utama. Sistem panel surya off-grid merupakan solusi yang efektif, namun memerlukan sistem manajemen penyimpanan energi yang optimal agar kebutuhan listrik dapat terpenuhi secara kontinu. Dalam penelitian ini, algoritma Perturb and Observe digunakan untuk melihat performa pada sistem kelistrikan panel surya off-grid dengan manajemen penyimpanan energi menggunakan baterai dan superkapasitor. Tujuan penelitian ini adalah untuk menemukan solusi yang dapat meningkatkan kualitas daya dan kestabilan pada sistem manajemen penyimpanan energi untuk fotovoltaiik. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa dengan skema kendali Perturb and Observe, intermitensi naik turun bertahap menghasilkan hasil lebih baik karena intermitensi naik turun tidak terdapat overshoot dan undershoot yang signifikan namun osilasi yang ada pada sisi beban lebih tinggi pada saat irradiation rendah yaitu mencapai 10% dan undershoot hingga 460 W sedangkan pada saat irradiation tinggi mencapai 7% tanpa undershoot pada scope daya beban, pada kedua tingkat irradiation, overshoot mencapai 545 W hingga 546 W.

Kata Kunci: Baterai, kontinuitas, panel surya, stabilitas energi, superkapasitor

PENDAHULUAN

Sebagai negara tropis, Indonesia memiliki potensi energi matahari sebesar 536 GW dimana yang dimanfaatkan hanya 0,028% atau sebesar 152 MW [1][2]. Energi matahari sebagai sumber dari pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) memiliki keunggulan dibandingkan jenis sumber energi terbarukan lainnya, yaitu memiliki kemudahan dalam penerapannya. Pada penerapan PLTS terdapat dua jenis konfigurasi, yaitu sistem pembangkit *on-grid* dan *off-grid*. Sistem PLTS *on-grid* jaringan langsung terhubung ke grid sehingga hanya bisa digunakan saat kondisi penyinaran secara optimal. Berbeda dengan PLTS *off-grid* dimana dalam jaringan terdapat penyimpanan berupa baterai untuk digunakan pada malam hari [3].

Keterbatasan dalam penerapan PLTS adalah fluktuasi intensitas matahari dan cuaca yang mempengaruhi keluaran energi yang dihasilkan. Fluktuasi ini menyebabkan karakteristik energi yang dihasilkan energi surya tidak stabil dan bervariasi [4]. Mengatasi kondisi fluktuasi radiasi matahari dapat menggunakan sistem *Maximum Power Point* (MPP), dengan teknologi ini tercapai daya maksimum [5][6]. Salah satu yang sudah diterapkan sebagai solusi adalah *Perturb and Observe* (P&O) sebagai salah satu algoritma kendali pencarian daya maksimum *Maximum Power Point Tracker* (MPPT). Penerapan algoritma P&O masih terdapat permasalahan tentang osilasi yang disebabkan oleh *switching* pada *converter*, dimana kondisi osilasi ini dapat merusak kesehatan baterai [7]. Perbaikan osilasi dapat menggunakan super kapasitor (SC), dimana komponen ini memiliki kelebihan dalam stabilitas transien untuk memberikan daya listrik yang besar secara bersamaan [8].

Berdasarkan penjelasan diatas penelitian ini diarahkan untuk melakukan perbandingan performa terhadap kualitas daya dan kestabilan pada sistem manajemen penyimpanan energi gabungan antara baterai dan SC untuk *photovoltaic* (PV) sebagai komponen dari PLTS. Sistem penyimpanan yang dibandingkan adalah sistem PV-Battery-SC terhadap perubahan iradiasi matahari yang disimulasikan dengan beberapa skema perubahan. Aspek yang dipelajari pada penelitian ini adalah efisiensi daya, serta kestabilan tegangan dan daya pada sistem. Komponen yang digunakan dalam simulasi ini diberi nilai dan komponen untuk model simulasi.

TINJAUAN PUSTAKA

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memberikan perbandingan performa terhadap kualitas daya dan kestabilan pada sistem manajemen penyimpanan energi (baterai dan superkapasitor) untuk fotovoltaik. Sistem penyimpanan yang akan dibandingkan adalah sistem PV-Battery-Supercapacitor terhadap perubahan iradiasi matahari yang akan disimulasikan dengan beberapa skema perubahan iradiasi.

Persamaan 1 menunjukkan persamaan model fotovoltaik yang paling sederhana. Model paling sederhana ini tidak memperhitungkan resistansi internal dan bypass. Persamaan paling sederhana akan diubah dengan pemodelan resistansi [2]. Satu modul surya biasanya terdiri dari 28-36 sel surya, yang, dalam kondisi radiasi normal, menghasilkan tegangan DC 12 V.

$$I = I_{SC} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

Karena tegangan dibagi dalam sel dan resistansi seri, resistansi paralel mengubah persamaan saat mengurangi arus yang dihasilkan, membagi arus ke dalam sel itu sendiri dan resistansi paralel (Hukum Arus Kirchoff [2]). Persamaan 2 menunjukkan persamaan yang diubah.

$$I = I_{SC} - I_0 \left(e^{\frac{q(V + I R_s)}{kT}} - 1 \right) - \left(\frac{V + I R_s}{R_p} \right) \quad (2)$$

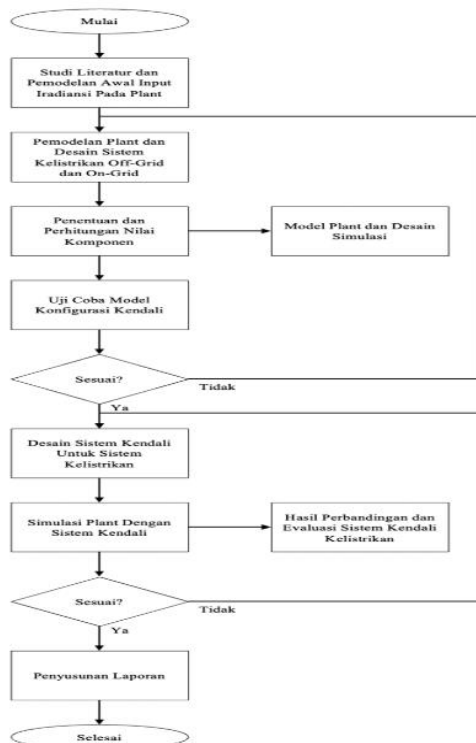
Dengan modifikasi konstanta polutan dapat diubah menjadi persamaan 3.

$$I = k_p I_{SC} - I_0 \left(e^{\frac{q(V + I R_s)}{kT}} - 1 \right) - \left(\frac{V + I R_s}{R_p} \right) \quad (3)$$

Penyajian Data dan Layout

PV memiliki daya maksimum 120 W dengan total terpasang 4 paralel dan 2 seri. Tegangan maksimum power pada 17 V dan arus maximum power ada pada 7,1 A. Karena 2 seri jadi tegangan keluaran PV secara perhitungan adalah $17 \times 2 = 34$ V dan dengan total 8 panel maka dengan iradiasi 1000 W/m² akan dihasilkan $8 \times 120 \times (1000/1000) = 960$ W dan ketika 500 W/m² akan dihasilkan $8 \times 120 \times (500/1000) = 480$ W.

METODE



Gambar 1. Flowchart simulasi

Untuk menyusun dan melakukan penelitian tugas akhir tentang “Karakteristik Tegangan dan Stabilitas Daya untuk Sistem Kelistrikan Off-Grid Panel Surya Berbasis Penyimpan Hibrida Baterai dan Superkapasitor”, peneliti akan mengambil data untuk melakukan penelitian di lokasi tersebut. Dalam penelitian ini terdapat beberapa tahapan yang akan dilakukan oleh peneliti dan di perlihatkan pada gambar 1 dimana Perumusan masalah merupakan tahap awal dalam menjalankan penelitian dan sangat penting, dikarenakan pada tahap ini akan menentukan arah dan tujuan yang di inginkan dalam sebuah penelitian. Pada penelitian ini masalah yang di dapatkan ialah kurang optimalnya sistem kontrol kualitas daya dalam sistem kelistrikan energi terbarukan panel surya khususnya ketika terdapat intermitensi iradiasi.

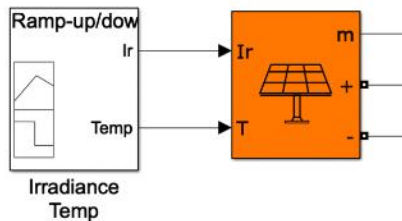
Tahap ini dilakukan pengambilan data pada pembangkit yang berada pada pulau-pulau terpencil di sekitar pulau Madura. Data yang diperlukan meliputi data:

- Iradiasi tertinggi dan iradiasi harian
- Karakteristik iradiasi harian dan bulanan

- Nominal penyimpan energi dan pembangkit terpasang.

Sistem jointing dan skema instalasi untuk mengetahui lokasi tiap komponen. Perancangan sistem yang terdapat penelitian kali ini yaitu perancangan sistem kelistrikan dan perancangan parameter per komponen. Perancangan sistem juga memasukkan model dan alasan kenapa model digunakan.

Penggunaan dioda dalam pemodelan fotovoltaiik (PV) membantu melindungi jaringan beban dengan lebih baik jika jaringan menjadi tidak stabil. Kesalahan tidak diperhitungkan dalam simulasi ini, dimana model rangkaian seperti pada gambar 2.



Gambar 2. Model rangkaian block diagram PV

Array fotovoltaiik terdiri dari rangkaian modul paralel yang dihubungkan secara seri. Setiap string modul dalam larik terdiri dari modul seri-N, dan larik secara keseluruhan terdiri dari string paralel modul yang terhubung secara seri.

Empat karakteristik modul berikut, yang diukur di bawah pengaturan uji standar (STC: radiasi 1000 W/m², suhu sel = 25 °C), disesuaikan agar sesuai dengan empat parameter model PV. Keempat karakteristik modul ini ditampilkan dalam urutan abjad. Keempat sifat ini diukur dengan menggunakan alat dan prosedur konvensional (arus bangkitan I_{ph} PV, arus saturasi dioda I_{sat}, resistansi paralel R_p, dan resistansi seri R_s). dan asumsi "faktor kualitas dioda" (Q_d) untuk semikonduktor:

V_{oc} = tegangan rangkaian terbuka

I_{sc} = arus hubung singkat

V_{mp} , I_{mp} = tegangan dan arus pada titik daya maksimum

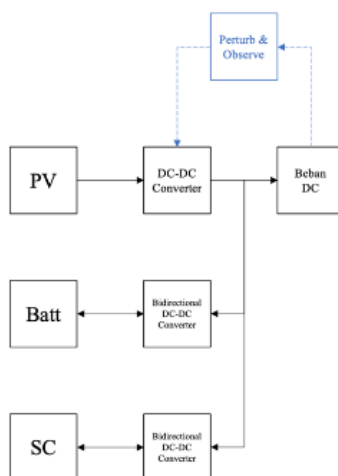
Logika P&O digunakan di Mfile untuk membuat model Pelacak Titik Daya Maksimum (MPPT), yang digambarkan dalam gambar dengan cara yang persis sama pada gambar 3 di bawah ini, dimana untuk parameter seperti pada tabel 1.:

Tabel 1. Nilai parameter simulasi

Parameter	Nilai
Resistansi Internal	0.0001 ohm
Resistansi snubber	0.000001 ohm
Kapasitansi snubber	(ideal) 999 F

Karakteristik masing-masing komponen sebagai berikut, Karakteristik PV (photovoltaic) adalah bahwa panel surya dapat menghasilkan listrik saat terkena cahaya matahari. Output daya dari panel surya dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari, suhu lingkungan, dan kondisi panel surya itu sendiri.

Baterai digunakan untuk menyimpan energi yang dihasilkan oleh panel surya saat cahaya matahari tersedia. Baterai harus dipilih dengan kapasitas dan tegangan yang sesuai dengan sistem PV off-grid, serta memperhitungkan faktor usia pakai, siklus muat dan muat ulang, dan tingkat efisiensi.



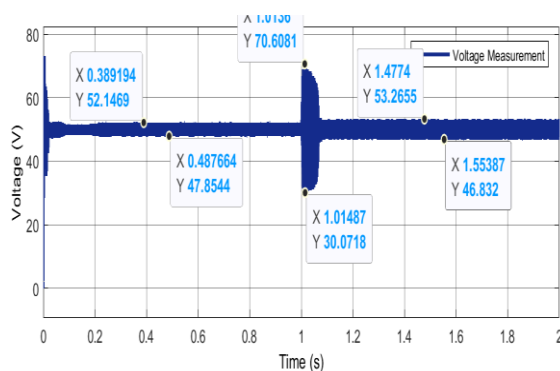
Gambar 3. Blok Diagram Sistem

Superkapasitor adalah alternatif penyimpanan energi yang mampu mengisi dan mengosongkan energi dengan cepat. Superkapasitor juga memiliki masa pakai yang lebih lama dan lebih tahan terhadap suhu ekstrem dibandingkan dengan baterai. Namun, superkapasitor memiliki kapasitansi yang lebih rendah dibandingkan dengan baterai dan biaya yang lebih tinggi.

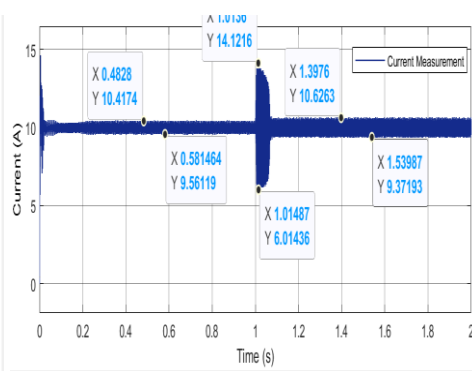
Algoritma Perturb and Observe (P&O) digunakan untuk mengoptimalkan efisiensi sistem PV dengan memaksimalkan daya yang dihasilkan oleh panel surya. Algoritma ini bekerja dengan membandingkan tegangan dan arus panel surya saat kondisi normal dengan saat terjadi gangguan (perturbasi) pada tegangan atau arus.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut adalah hasil penelitian dengan 2 skenario yang telah dirancang.



Gambar 4a

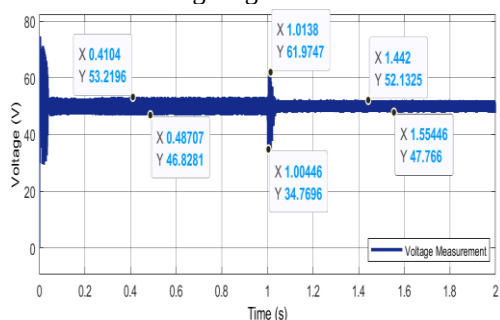


Gambar 4b

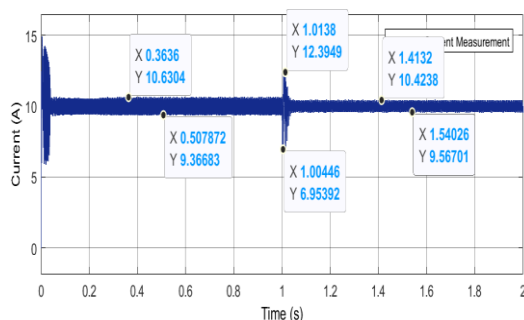
Pada gambar 4a, hasil didapatkan bahwa tegangan beban saat kondisi awal adalah 50 V dengan ripple naik turun 2 V, dan kemudian menjadi 30 V dengan adanya ripple 3 V pada saat iradiansi. Terdapat overshoot hingga 70 V dan undershoot hingga 30 V pada 0.04 detik ketika terjadi perubahan. Ini sesuai dengan kondisi real karena konverter dalam sistem kelistrikan selalu memiliki rasio rugi-rugi atau efisiensi konverter.

Pada gambar 4b, hasil didapatkan bahwa arus beban saat kondisi awal adalah 9.5 A dengan ripple 0.5 A, dan kemudian menjadi 6.0 A dengan adanya ripple 1 A pada saat iradiansi.

Terdapat overshoot hingga 14 A dan undershoot hingga 6 A sebesar 0.04 detik ketika terjadi perubahan. Ini sesuai dengan kondisi real karena konverter dalam sistem kelistrikan selalu memiliki rasio rugi-rugi atau efisiensi konverter.



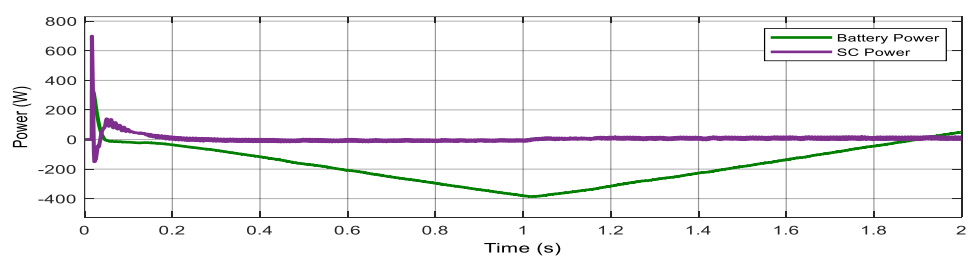
Gambar 5a



Gambar 5b

Pada gambar 5a, hasil didapatkan bahwa tegangan beban saat kondisi awal adalah 50 V dengan ripple 4 V, dan kemudian menjadi 50 V dengan ripple 2 V pada saat iradiansi. Terdapat overshoot hingga 61 V dan undershoot hingga 34 V ketika terjadi perubahan. Ini sesuai dengan kondisi real karena konverter dalam sistem kelistrikan selalu memiliki rasio rugi-rugi atau efisiensi konverter

Pada gambar 5b, hasil didapatkan bahwa arus beban saat kondisi awal adalah 9.5 A dengan ripple 1 A, dan kemudian menjadi 9.5 A dengan adanya ripple 0.5 A pada saat iradiansi. Terdapat overshoot hingga 12 A dan undershoot hingga 7 A. Ini sesuai dengan kondisi real karena konverter dalam sistem kelistrikan selalu memiliki rasio rugi-rugi atau efisiensi konverter



Gambar 6. Hasil perbandingan daya

Pada gambar 6, hasil didapatkan bahwa daya baterai dan superkapasitor apabila ketika sumber naik, maka superkapasitor charging, namun pada saat sumber turun maka superkapasitor discharging.

Berikut adalah tabel perbandingan untuk masing-masing jenis intermitensi.

Tabel 2. Hasil simulasi akhir performa P&O intermitensi naik

No	Parameter	Overshoot	Undershoot	Osilasi
1	Tegangan	70 V	30 V	Hingga 6%
2	Arus	14 A	6 A	Hingga 10%
3	Daya	546 W	-	9%

Tabel 3. Hasil Simulasi Akhir Performa P&O Intermitensi Turun

No	Parameter	Overshoot	Undershoot	Osilasi
1	Tegangan	61 V	34 V	Hingga 6%
2	Arus	12 A	7 A	Hingga 10%
3	Daya	545 W	460 W	9%

Secara umum, dari tabel 2 dan tabel 3, intermitensi naik turun bertahap menghasilkan hasil lebih baik karena intermitensi naik turun tidak terdapat overshoot dan undershoot yang signifikan namun osilasi yang ada pada sisi beban lebih tinggi pada saat iradiansi rendah yaitu mencapai 10% dan undershoot hingga 460 W sedangkan pada saat iradiansi tinggi mencapai 7% tanpa undershoot pada scope daya beban, pada kedua tingkat iradiansi, overshoot mencapai 545 W.

Secara perhitungan untuk PV yang dikeluarkan 8 panel (2 seri dikali 4 paralel) dengan masing-masing output adalah 120 W pada saat 1000 W/m² sesuai dari persamaan 2.10 adalah 960 W. Sedangkan untuk ketika turun menjadi 500 W/m² adalah 480 W. Dari hasil simulasi pemodelan PV sudah benar menunjukkan nilai yang hampir sama (976 W dan 484 W). Untuk beban ketika iradiansi naik turun, beban hasilnya konstan di 500 W. Ini menunjukkan sistem kendali sesuai dan berhasil mengendalikan keseluruhan sistem PV off-grid. Untuk hasil dari baterai dan superkapasitor menghasilkan input naik turun menunjukkan bahwa kedua penyimpan energi bekerja sesuai dengan yang diharapkan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengambilan data yang telah dilakukan pada penelitian tentang pembangkit energi terbarukan *off-grid* dapat disimpulkan bahwa pada penelitian didapatkan hasil bahwa dengan menggunakan algoritma *Perturb and Observe* akan menjadikan stabilitas daya menjadi lebih baik pada saat iradiasi naik turun secara bertahap. Hasil pada saat iradiasi naik secara langsung dan iradiasi turun secara langsung memberikan hasil yang sesuai standar (kurang dari 10% batas atas dan batas bawah ketika osilasi). Intermitensi naik turun bertahap menghasilkan hasil lebih baik karena intermitensi naik turun tidak terdapat overshoot dan undershoot yang signifikan namun osilasi yang ada pada sisi beban lebih tinggi pada saat iradiasi rendah yaitu mencapai 10% dan undershoot hingga 460 W sedangkan pada saat iradiasi tinggi mencapai 7% tanpa undershoot pada scope daya beban, pada kedua tingkat iradiasi, overshoot mencapai 54 W. Pada penelitian terdapat overshoot dan undershoot sebesar 13% dari daya nominal, dimana daya nominal yang disimulasikan adalah 500 W sedangkan terdapat undershoot sebesar -40 W dan overshoot +45 W saat perubahan, pada beberapa milisekon setelah terjadi intermitensi naik dan turun secara langsung, ini akibat dari turun dan naik input secara tiba-tiba sehingga sistem kendali *perturb and observe* memerlukan waktu penyesuaian untuk mengembalikan kestabilan daya pada posisi semula. Selain itu ketika terhitung untuk duty cycle yang diharapkan adalah 0,34 dapat dilihat di hasil simulasi bahwa tegangan sistem juga mencapai 50 V dari titik awal 34 V, sehingga boost converter mencapai titik duty cycle optimal 0,34 secara simulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IESR, *Indonesia Clean Energy Outlook: Tracking Progress and Review of Clean Energy Development in Indonesia*. 2019.
- [2] A. Kurniawan and E. Shintaku, "Two-step artificial neural network to estimate the solar radiation at Java Island," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 11, no. 4, pp. 3559–3566, 2021,

- doi: 10.11591/ijece.v11i4.pp3559-3566.
- [3] M. Gumintang, M. Sofyan, and I. Sulaeman, "Design and Control of PV Hybrid System in Practice," *Dtsch. Gesellschaft für Int. Zusammenarbeit*, pp. 1–122, 2020, [Online]. Available: www.giz.de.
 - [4] B. H. Purwoto, "Efisiensi Penggunaan Panel Surya Sebagai Sumber Energi Alternatif," *Emit. J. Tek. Elektro*, vol. 18, no. 01, pp. 10–14, 2018, doi: 10.23917/emit.v18i01.6251.
 - [5] A. Jusoh, R. Alik, T. K. Guan, and T. Sutikno, "MPPT for PV System Based on Variable Step Size Perturb and Observe Algorithm," *TELKOMNIKA (Telecommunication Comput. Electron. Control.)*, vol. 15, no. 1, p. 79, 2017, doi: 10.12928/telkomnika.v15i1.3160.
 - [6] I. Yadav, S. K. Maurya, and G. K. Gupta, "A literature review on industrially accepted MPPT techniques for solar PV system," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 2117–2127, 2020, doi: 10.11591/ijece.v10i2.pp2117-2127.
 - [7] M. I. Fadriantama and R. M. S. Adinandra, "Analisis Perbandingan Kinerja Algoritme Perturb And Observe (P&O) Dan Incremental Conductance (IC) Pada Sistem Kendali Maximum Power Point Tracker (MPPT) Untuk Sistem Photovoltaic (PV) Paralel," *J. Chem. Inf. Model.*, no. 1c, pp. 1–6, 2018.
 - [8] T. P. Sari, A. Priyadi, M. Pujiantara, N. Yorino, and M. H. Purnomo, "Improving Transient Stability Assessment by Installing Super Capacitor Energy Storage using Critical Trajectory Method based on Modified Losing Synchronism," *Proceeding - 2018 Int. Semin. Intell. Technol. Its Appl. ISITIA 2018*, pp. 51–55, 2018, doi: 10.1109/ISITIA.2018.8710773.