

## Perancangan dan Pemodelan PLTS *Off-Grid* dengan Penyimpanan Energi Hibrida Berbasis Superkapasitor-Baterai: Studi Kasus di Desa Karamina, Papua

### Design and Modeling of Off-Grid Solar Power Plant with Hybrid Energy Storage Based on Supercapacitor-Battery: A Case Study in Karamina Village, Papua

Dwi Sahidin<sup>1</sup>, Boy Ihsan<sup>2</sup>, Tri Desmana Rachmildha<sup>3</sup>, Deny Hamdani<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Listrik – Politeknik Negeri Cilacap

<sup>1</sup>Jl. Dr. Soetomo No.1, Sidakaya, Kab. Cilacap, Jawa Tengah 53212, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Elektro S1 – Universitas Riau

<sup>2</sup>Simpang Baru, Kec. Tampan, Kota Pekanbaru, Riau 28293, Indonesia

<sup>3,4</sup>Sekolah Teknik Elektro dan Informatika – Institut Teknologi Bandung

<sup>3,4</sup>Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Kec. Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia

email: <sup>1</sup>dwisahidin@pnc.ac.id, <sup>2</sup>boy.ihsan@lecturer.unri.ac.id, <sup>3</sup>trides@konversi.ee.itb.ac.id,

<sup>4</sup>denyhamdani@itb.ac.id

---

#### Informasi Artikel

Diajukan, 20 April 2025

Diterima, 25 Mei 2025

Diterbitkan, 10 Juni 2025

---

#### Kata Kunci :

Energi Terbarukan, Solar PV,  
Penyimpanan Energi,  
Superkapasitor, Baterai

---

#### Keyword :

Renewable Energy, Solar PV,  
Energy Storage,  
Supercapacitor, Battery

---

#### ABSTRAK

Desa Karamina di Papua merupakan wilayah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik PLN. Penelitian ini bertujuan merancang dan memodelkan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid dengan penyimpanan energi hibrida berbasis superkapasitor dan baterai. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB dan Simulink untuk mengevaluasi kinerja sistem terhadap variasi radiasi matahari, perubahan beban, serta kondisi inrush current. Hasil menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kestabilan tegangan dan arus pada kondisi dinamis. Superkapasitor efektif meredam fluktuasi daya dan mengurangi arus riak pada baterai, sehingga memperpanjang umur baterai. Integrasi superkapasitor-baterai dalam sistem PLTS off-grid memberikan solusi andal dan efisien untuk elektrifikasi daerah terpencil seperti Desa Karamina.

---

#### ABSTRACT

Karamina Village in Papua is a remote area not yet connected to the national electricity grid. This study aims to design and model an off-grid Solar Power Plant (PLTS) system integrated with hybrid energy storage combining supercapacitors and batteries. Simulations were conducted using MATLAB and Simulink to evaluate the system's performance under varying solar irradiance, load fluctuations, and inrush current conditions. The results show that the system is capable of maintaining voltage and current stability under dynamic operating conditions. The supercapacitor effectively mitigates power fluctuations and reduces the ripple current on the battery, thereby extending its lifespan. At night, the battery supplies power to the load, while during the day, solar energy is used for recharging. The system also demonstrates resilience against transient disturbances. The integration of supercapacitor-battery storage in an off-grid PLTS system provides a reliable and efficient solution for electrifying remote areas such as Karamina Village.

---

## 1. PENDAHULUAN

Pembangkitan listrik dari sumber energi terbarukan terus tumbuh dari tahun ke tahun, baik dalam skala besar dan terhubung secara *on-grid* maupun dalam skala yang lebih kecil berupa microgrid yang terhubung secara *off-grid*, meskipun ada anomali penggunaan energi dan listrik global terkait dengan pandemi COVID-19 [1]. Energi terbarukan merupakan alternatif yang sangat baik untuk mencapai tujuan *green energy* yang bebas dari emisi karbon, dimana hal ini sudah dicanangkan semenjak Paris Agreement. Meskipun masih muncul tantangan dari pembangkit listrik energi terbarukan seperti adanya sifat intermittensi [2].

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian dan pengembangan telah meningkat secara substansial dan telah menjadikan sumber energi terbarukan dari solar fotovoltaik (PV) sebagai sumber energi alternatif yang layak untuk dimanfaatkan. Tren peningkatan penggunaan energi listrik PV terkait dengan peningkatan efisiensi sel surya serta peningkatan teknologi manufaktur panel surya [3]. Untuk mendukung pengoperasian dari solar PV, integrasi dari Sistem Penyimpanan Energi Baterai (BESS) telah meningkat di beberapa tahun terakhir ini karena fleksibilitas, densitas energi yang tinggi, dan efisiensinya [4]. Selain itu pula muncul tantangan lain yaitu jaringan listrik utama tidak dapat mengaliri listrik ke daerah-daerah terpencil di berbagai wilayah di seluruh dunia, termasuk di Indonesia. Dengan demikian, elektrifikasi daerah-daerah terpencil menjadi mungkin dengan munculnya mikrogrid [5].

Di daerah pedesaan yang sering kali tidak memiliki akses ke jaringan listrik PLN, sistem *off-grid* merupakan satu-satunya solusi untuk pasokan listrik bagi konsumen. Untuk beban skala mikro seperti rumah kecil, biasanya digunakan generator diesel atau bensin [6]. Elektrifikasi dengan penggunaan energi terbarukan di daerah pedesaan terpencil dengan akses terbatas atau tidak ada sama sekali ke pasokan listrik dapat meningkatkan kualitas hidup masyarakat yang tinggal di daerah tersebut. Teknologi energi terbarukan dapat memainkan peran penting dalam pembangkitan listrik, karena perluasan jaringan listrik utama bukanlah pilihan yang hemat biaya di beberapa daerah tertentu [7].

Pada penelitian [8] menyajikan sebuah model elektrifikasi pedesaan dengan menggunakan solar PV. Disimpulkan bahwa elektrifikasi pedesaan dengan solar PV adalah solusi yang paling tepat untuk memenuhi kebutuhan energi. Pada penelitian [9] meneliti mengenai penerimaan masyarakat pedesaan terhadap proyek pembangkit energi terbarukan mandiri. Dua survei dilakukan sebelum dan sesudah pemasangan energi terbarukan. Hasilnya secara keseluruhan, penduduk pedesaan pada umumnya mendukung proyek energi terbarukan dan juga teknologi energi terbarukan. Pada penelitian [10] membahas manfaat penggunaan software simulasi untuk pengembangan sistem energi terbarukan yang dirancang dan perbaikan desain yang dicapai dari hasil simulasi energi terbarukan. Pada penelitian [11] menyajikan optimalisasi sistem PLTS *off-grid* dengan penyimpanan baterai, yang dirancang khusus untuk mengatasi tantangan fluktuasi radiasi surya, perubahan tuntutan beban, dan umur baterai dalam aplikasi wilayah terpencil.

Sejalan dengan penggunaan solar PV untuk daerah pedesaan terpencil, penggunaan baterai sebagai pendukung sistem energi terbarukan menjadi sangat penting. Masalah muncul dengan penggunaan BESS karena terkadang tidak memperhatikan umur baterai. Padahal baterai sebagai pendukung utama energi terbarukan solar PV yang bersifat intermiten merupakan investasi yang cukup tinggi. Pada penelitian [12] dilakukan desain pembangkit energi terbarukan yang diintegrasikan dengan baterai dan superkapasitor yang diimplementasikan di daerah terpencil. Hasilnya, integrasi yang sukses antara sistem energi terbarukan hibrida dan sistem penyimpanan energi hibrida dapat digunakan untuk mengembangkan akses energi yang andal dan berkelanjutan wilayah terpencil. Pada penelitian [13] untuk meningkatkan masa pakai baterai dengan mengurangi arus pengisian dan menjaga SoC (*State of Charge*) baterai pada nilai yang lebih rendah jika daya PV cukup untuk memasok beban. Pada penelitian [14] mengembangkan sistem penyimpanan energi hibrida (HESS) yang meningkatkan kualitas daya dengan menggabungkan penyangga energi dalam penyimpanan listrik. Tujuannya adalah untuk memperdalam pemahaman tentang teknologi energi terbarukan dan memperkuat kemampuan analitis dalam sistem energi terbarukan. Sistem yang dibangun mengintegrasikan teknologi superkapasitor dalam HESS, yang memungkinkannya untuk memasok daya awal ke beban dan mengelola arus masuk secara efektif. Pada penelitian [15] dan [16] menunjukkan bahwa Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan integrasi superkapasitor pada sistem penyimpanan energi dapat mengurangi siklus *charge-discharge* baterai dan menstabilkan transien daya, sehingga memperpanjang umur baterai yang digunakan pada PLTS.

Pada penelitian ini bertujuan untuk melakukan perancangan dan pemodelan dari PLTS yang diintegrasikan dengan penyimpanan energi hibrida superkapasitor-baterai untuk Desa Karamina, Papua, dimana penelitian-penelitian sebelumnya belum banyak mengeksplorasi pemanfaatan superkapasitor dalam konteks desa terpencil di Indonesia secara terintegrasi. Analisis yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi profil tegangan, arus, daya dan SoC akibat variasi radiasi matahari, perubahan beban, serta kondisi *inrush current*.

## 2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, metode penelitian yang digunakan ditunjukkan melalui diagram alir pada Gambar 1. Penelitian ini bersifat eksperimen yang berbasis simulasi. Perangkat lunak yang digunakan pada penelitian ini adalah Simulink untuk pemodelan sistem PLTS *off-grid* yang bertujuan untuk melihat profil tegangan dan arus sistem. MATLAB digunakan untuk melakukan pemodelan matematis sistem PLTS *off-grid* yang bertujuan untuk melihat profil daya.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

### 2.1. Objek Penelitian

Pada penelitian ini, lokasi yang dijadikan sebagai objek penelitian adalah Desa Karamina di Papua. Sebuah desa yang belum teraliri listrik terletak di kabupaten Yalimo distrik Benawa. Desa Karamina memiliki luas wilayah sebesar 36,4749 km<sup>2</sup>. Desa ini memiliki 50 kepala keluarga dengan total jumlah populasi sebanyak 100 jiwa [15].

#### 2.1.1. Potensi Energi Matahari Desa Karamina

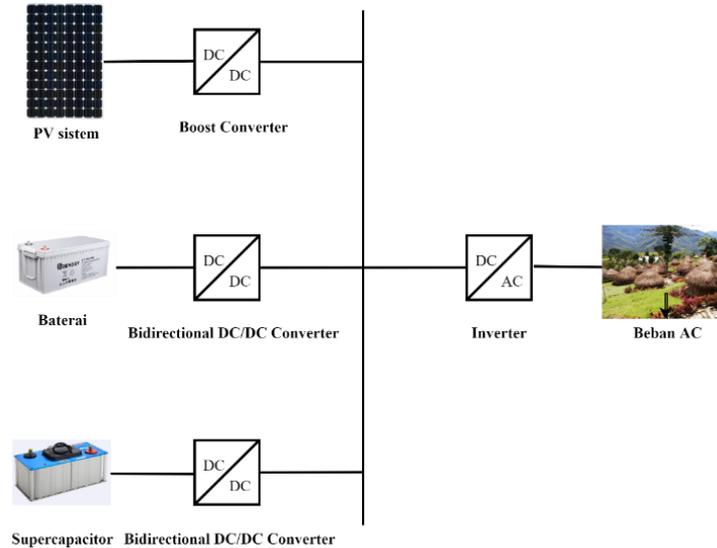
Berdasarkan data Global Solar Atlas, rata-rata harian radiasi sinar matahari yang mencapai permukaan tanah atau disebut nilai *Global Horizontal Irradiance* (GHI) pada Desa Karamina adalah sebesar 4,905 kWh/m<sup>2</sup> per hari dengan nilai radiasi langsung dari matahari atau *Direct Normal Irradiance* (DNI) sebesar 3,124 kWh/m<sup>2</sup> per hari.

#### 2.1.2. Beban Listrik Desa Karamina

Pemodelan beban pada penelitian ini menggunakan model beban rumah tangga dengan total bangunan yang harus dilistriki di Desa Karamina sebanyak 28 bangunan. Besar energi harian yang dikonsumsi beban rumah tangga pada daerah 3T adalah sebesar 600 Wh berdasarkan pada kriteria dari Direktorat Jenderal Energi. Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi (EBTKE). Maka jumlah beban harian yang harus disuplai untuk Desa Karamina adalah sebesar 16,8 kWh dengan kurva beban harian mengacu pada beban tipikal di *rural areas*.

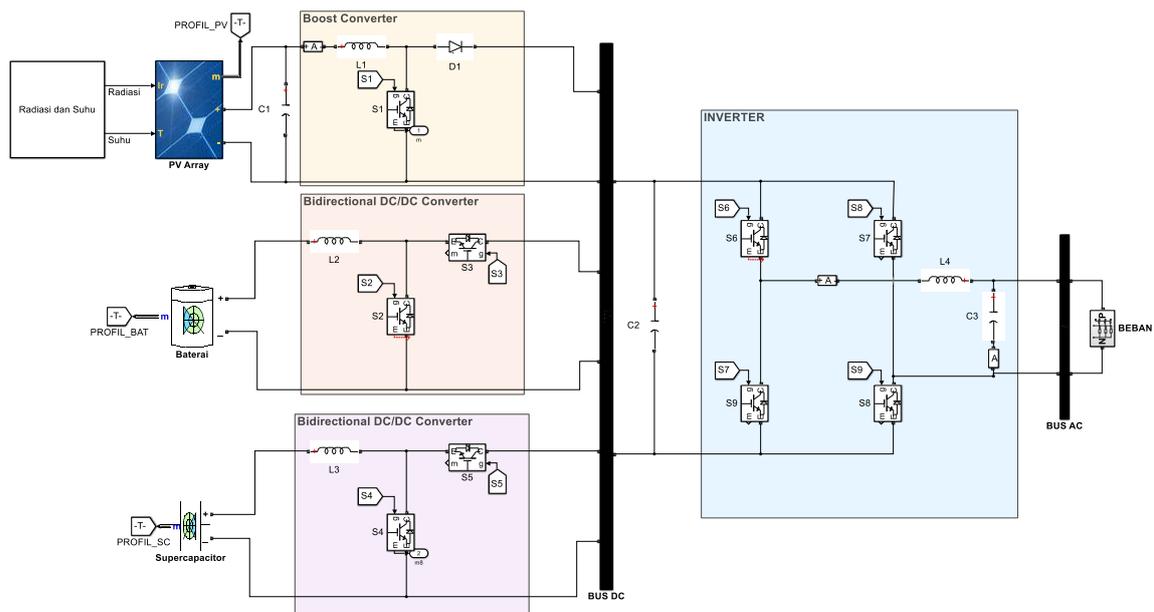
## 2.2. Pemodelan Sistem PLTS Off-Grid dengan Penyimpanan Energi Hibrida pada Simulink

Perancangan dan pemodelan PLTS *off-grid* dengan sistem *hybrid energy storage* yang terdiri dari baterai dan superkapasitor dapat menyediakan daya yang dibutuhkan beban dengan baik, seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram rangkaian PLTS *Off-Grid*

Sistem ini terdiri dari PV *array* sebagai pembangkit energi listrik, baterai dan superkapasitor sebagai peralatan penyimpanan energi, seperti terlihat pada Gambar 3 mengenai pemodelan secara menyeluruh sistem PLTS *off-grid* pada Matlab/Simulink. Terminal keluaran PV terhubung dengan *boost converter* yang berfungsi untuk menaikkan tegangan dan aktuatur dari algoritma MPPT. Sistem PV ini juga dilengkapi dengan sebuah *inverter* untuk menyuplai daya ke beban AC dan dua *bidirectional DC-DC converter* untuk mengatur *charge* dan *discharge* daya pada superkapasitor dan baterai. Simulasi pada Simulink bertujuan untuk melihat profil tegangan, arus, daya dan kualitas daya sistem, terutama dalam rentang waktu yang pendek. Tabel 1 menunjukkan spesifikasi parameter pada PLTS *off-grid* yang digunakan pada penelitian ini.

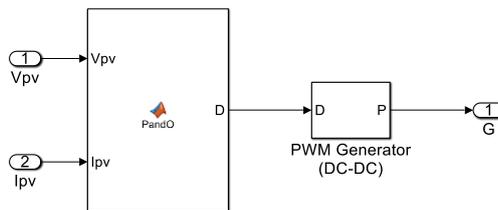


Gambar 3. Diagram Rangkaian PLTS *Off-Grid* yang Digunakan dalam Penelitian

Tabel 1. Parameter Komponen pada PLTS Off-Grid

| Spesifikasi Sistem | Parameter                           | Nilai                 | Satuan |
|--------------------|-------------------------------------|-----------------------|--------|
| Modul Surya        | Jumlah sel per modul                | 120                   | Sel    |
|                    | Dimensi                             | 1721 x 1016 x 30      | mm     |
|                    | Berat                               | 19,5                  | kg     |
|                    | Rating daya                         | 360                   | W      |
|                    | Tegangan <i>open circuit</i>        | 44,1                  | V      |
|                    | Arus hubung singkat                 | 10,23                 | A      |
|                    | Tegangan pada titik daya maksimum   | 37,7                  | V      |
|                    | Arus pada titik daya maksimum       | 9,55                  | A      |
|                    | Temperatur operasi                  | - 40 s/d +85          | °C     |
|                    | Efisiensi panel                     | 20,6                  | %      |
| Baterai            | Tegangan nominal                    | 12                    | V      |
|                    | Kapasitas                           | 200                   | Ah     |
|                    | Berat                               | 58                    | kg     |
|                    | Temperatur operasi                  | 0 - 50                | °C     |
|                    | Resistansi Internal                 | 3                     | mΩ     |
| Superkapasitor     | Tegangan kerja                      | 48                    | V      |
|                    | Kapasitansi                         | 165                   | F      |
|                    | <i>Equivalent series resistance</i> | 6                     | mΩ     |
|                    | Energi tersimpan                    | 53                    | Wh     |
|                    | Arus maksimum                       | 1900                  | A      |
|                    | Berat                               | 13,7                  | kg     |
|                    | Jumlah Siklus Maksimum              | 1000000               | Kali   |
| Konverter          | Rating daya AC                      | 8000                  | W      |
|                    | Daya maksimum PV array              | 5000 (Opsional 10000) | W      |
|                    | Tegangan baterai                    | 48                    | V      |
|                    | Tegangan AC                         | 220/230/240           | V      |
|                    | Frekuensi Tegangan AC               | 50/60                 | Hz     |
|                    | Efisiensi <i>inverter</i>           | 88%                   |        |
|                    | Efisiensi solar <i>charger</i>      | 98%                   |        |

*Boost converter* digunakan sebagai penggerak dari algoritma MPPT untuk melacak titik maksimum pembangkitan daya panel surya. *Boost converter* dilengkapi dengan MPPT agar PV selalu dapat membangkitkan daya maksimum secara terus-menerus walaupun dalam keadaan nilai iradiasi dan suhu yang berubah-ubah. Skema *switching* yang digunakan adalah skema *pulse width modulation* (PWM) dengan besar nilai sinyal *control* yang diatur oleh MPPT. Algoritma MPPT yang digunakan adalah *Perturb and Observe* (P&O). Algoritma tersebut diimplementasikan dalam suatu Simulink *block* seperti pada Gambar 4.

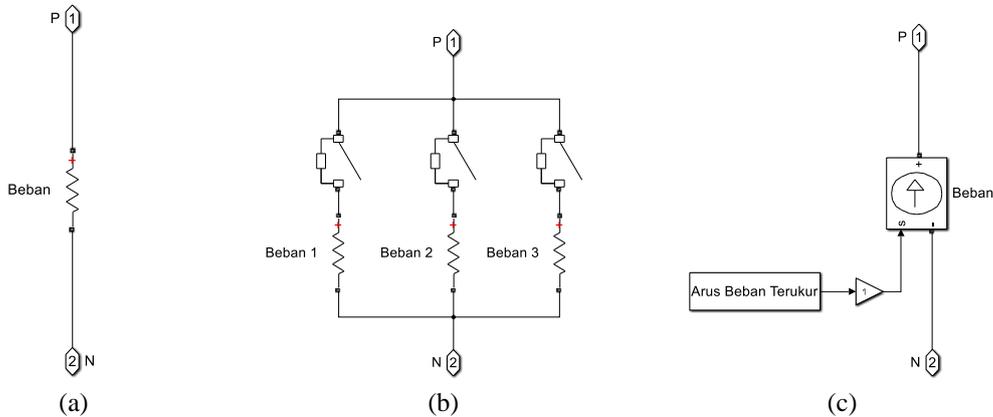


Gambar 4. Pemodelan kendali MPPT *boost converter* pada Simulink

Pemodelan *inverter* pada Simulink menggunakan topologi *full-bridge* satu fasa yang dirancang untuk mengubah tegangan DC 400 V menjadi tegangan AC 220 Vrms dengan frekuensi sebesar 50 Hz. Supaya *Inverter* menyuplai tegangan keluaran (*root mean square*) rms sebesar 220 V dengan frekuensi 50 Hz secara konsisten, dibutuhkan suatu sistem kontrol. Metode kontrol yang digunakan adalah *synchronous reference frame PI controller* (SRFPI) seperti terlihat pada Gambar 5. Untuk mengontrol tegangan keluaran *inverter*, SRFPI menggunakan tegangan keluaran *inverter* sebagai referensi, bersama dengan *inner current loop* dan *voltage feed forward loop* untuk meningkatkan stabilitas ketahanan sistem. Dimana sinyal umpan balik untuk *inner current loop* menggunakan arus yang terukur pada *filter* kapasitor. Untuk menghasilkan sinyal D-Q dari gelombang 1 fasa maka perlu dibangkitkan dulu sinyal  $\alpha$ - $\beta$  dengan menggeser sinyal terukur sebesar 90°.



pengukuran pada laboratorium dengan menggunakan beban seperti pada Tabel 2. Kemudian, beban-beban tersebut dinyalakan dan dimatikan beberapa kali dengan kombinasi yang berbeda sehingga diperoleh data *inrush current*.



Gambar 7. Pemodelan beban pada Simulink (a) beban konstan (b) beban berubah atau beban Desa Karamina (c) beban *inrush current*

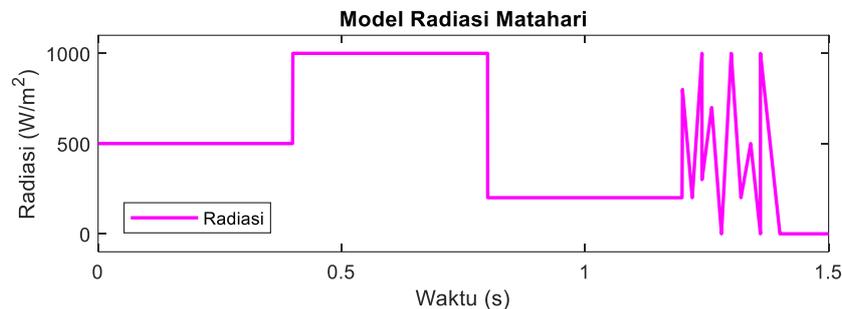
Tabel 2. Detail Beban yang Diukur di Laboratorium

| Beban                            | Daya (W) |
|----------------------------------|----------|
| Pemanas ( <i>resistor bank</i> ) | 1800     |
| Lampu LED (32x2 W + 5 x 11 W)    | 119      |
| Pompa air dengan <i>dimmer</i>   | 130      |
| Beban motor ( <i>drill</i> )     | 850      |

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

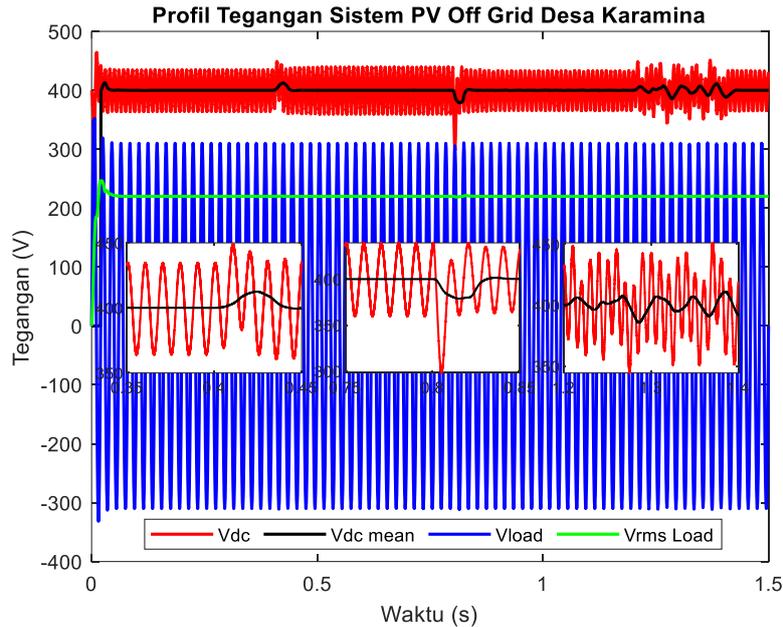
#### 3.1. Profil PLTS Off-grid Akibat Perubahan Radiasi

Pada skema ini dilakukan simulasi kenaikan dan penurunan nilai radiasi yang diterima PV, seperti pada Gambar 8. Pada awal simulasi PV menerima radiasi sebesar  $500 \text{ W/m}^2$ , pada waktu simulasi 0,4 detik radiasi naik menjadi  $1000 \text{ W/m}^2$ , pada waktu simulasi 0,8 detik turun menjadi  $200 \text{ W/m}^2$ , kemudian terjadi perubahan naik turun yang cepat dari rentang 1,2 s sampai 1,4 s dan akhirnya PV tidak menerima radiasi sama sekali pada 1,4 detik sampai 1,5 detik. Simulasi dilakukan dengan beban konstan sebesar 3,5 kW dan suhu konstan sebesar  $25^\circ \text{ C}$ .

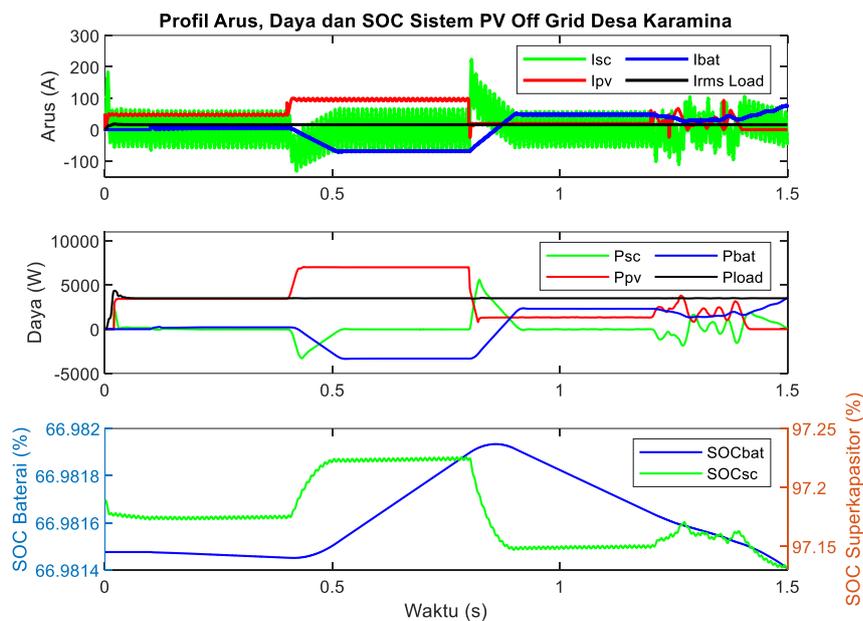


Gambar 8. Kenaikan dan Penurunan Nilai Radiasi

Pada Gambar 9 menunjukkan profil tegangan bus DC dan tegangan beban selama simulasi pada Simulink. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa tegangan beban (gelombang AC dan rms) tidak terganggu akibat adanya kenaikan dan penurunan radiasi. Sedangkan tegangan pada sisi bus DC mengalami kenaikan pada saat radiasi matahari naik dan mengalami penurunan pada saat radiasi matahari turun. Namun kondisi perubahan tegangan tersebut tidak berlangsung lama (kurang dari 0,05 s), karena *energy storage* dapat menyuplai kekurangan atau menyerap kelebihan daya beban tersebut. Begitu juga pada saat terjadi perubahan radiasi yang sangat cepat dari waktu simulasi 1,2 – 1,4 detik, *energy storage* selalu berusaha menjaga tegangan agar tetap berada pada nilai 400 V.



Gambar 9. Profil Tegangan Sistem Akibat Perubahan Radiasi Matahari



Gambar 10. Profil Arus, Daya Dan SoC Sistem Akibat Perubahan Beban

Pada Gambar 10 menunjukkan profil arus, daya dan SoC sistem PLTS *off-grid* Desa Karamina akibat perubahan radiasi matahari. Pada rentang 0,4 – 0,8 detik, produksi daya PV lebih besar daripada konsumsi daya beban, sehingga baterai mengalami proses *charge*, hal ini ditunjukkan oleh nilai SoC baterai yang meningkat. Pada waktu simulasi 0,8 - 1,2 detik terjadi kenaikan beban, daya yang dikonsumsi beban lebih besar dari daya yang diproduksi PV sehingga baterai mengalami proses *discharge*, hal ini ditunjukkan oleh SoC baterai yang menurun. Sedangkan pada saat perubahan radiasi yang cepat, dari waktu simulasi 1,2 hingga 1,4 detik, walaupun PV sempat mengalami kenaikan daya yang lebih besar dari daya beban, namun karena adanya superkapasitor, baterai tidak mengalami perubahan dari proses *discharge* ke *charge*. Hal ini dapat meningkatkan atau memperpanjang umur baterai. Karena proses *charge* dan *discharge* yang terjadi berulang-ulang dapat mengurangi siklus hidup baterai. Sedangkan untuk superkapasitor, SoC cenderung konstan dan hanya akan berubah drastis pada saat transien atau perubahan daya. Pada Gambar 10 juga menunjukkan bahwa dengan penambahan superkapasitor arus yang harus disuplai oleh *energy storage* dapat dipisah, dimana arus riak akan disuplai oleh superkapasitor. Sehingga arus yang disuplai oleh baterai akan menjadi lebih konstan jika dibandingkan dengan hasil simulasi sistem tanpa superkapasitor. Perbandingan dengan penelitian [15]

menunjukkan bahwa penggunaan superkapasitor dapat memperpanjang umur baterai dan menjaga stabilitas tegangan sistem lebih baik dibandingkan sistem yang hanya menggunakan baterai.

Tabel 3. Ringkasan Hasil Simulasi Perubahan Radiasi

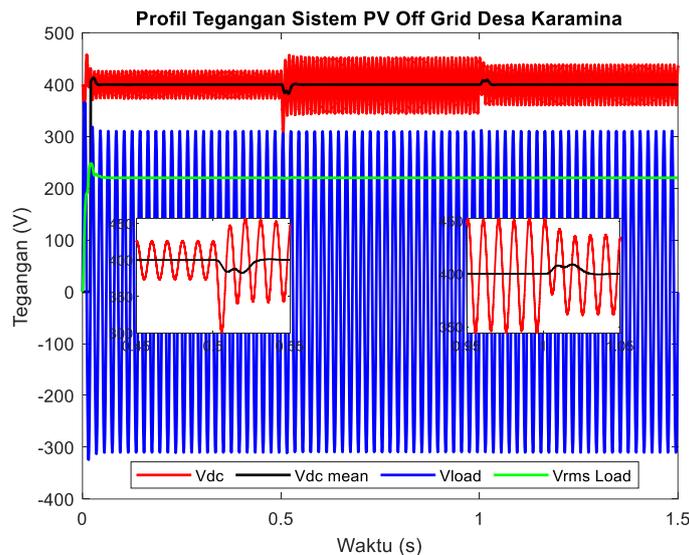
| Parameter         | Hasil Pengamatan                           |
|-------------------|--|
| Tegangan AC beban | Stabil pada 220V                           |
| Tegangan Bus DC   | Fluktuatif, cepat dikoreksi oleh HESS      |
| SoC Baterai       | Stabil pada transien berkat superkapasitor |
| Arus riak         | Ditangani oleh superkapasitor              |

### 3.2. Profil Sistem PLTS Off-Grid akibat Perubahan Beban

Naik atau turunnya beban dapat mempengaruhi profil tegangan dan arus pada sistem tenaga listrik, terutama pada sistem *weakgrid*. Oleh sebab itu pada bagian ini dibahas tentang profil sistem PLTS *off-grid* Desa Karamina saat terjadi perubahan beban.

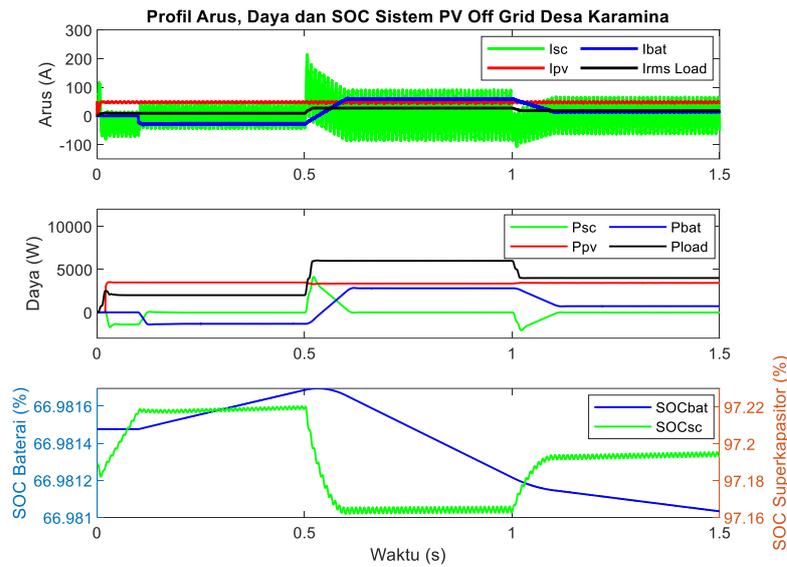
#### 3.2.1. Simulasi Perubahan Beban

Pada skema ini dilakukan simulasi kenaikan dan penurunan beban. Pada awal simulasi beban yang disuplai sistem adalah sebesar 2 kW, kemudian pada waktu simulasi 0,5 detik beban naik menjadi 6 kW dan kemudian turun menjadi 4 kW pada waktu simulasi 1 detik. Sedangkan radiasi matahari diatur konstan pada nilai 500 W/m<sup>2</sup>. Pada Gambar 11 menunjukkan profil tegangan bus DC dan beban. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa tegangan beban (gelombang AC dan rms) tidak terganggu akibat adanya kenaikan dan penurunan beban. Sedangkan tegangan pada sisi bus DC mengalami penurunan pada saat beban naik dan mengalami kenaikan pada saat beban turun. Namun kondisi perubahan tegangan tersebut tidak berlangsung lama (kurang dari 0,05 s), karena *energy storage* dapat menyuplai kekurangan atau menyerap kelebihan daya beban tersebut.



Gambar 11. Profil Tegangan Sistem Akibat Perubahan Beban

Pada Gambar 12 menunjukkan profil arus, daya dan SoC sistem PLTS *off-grid* Desa Karamina akibat perubahan beban. Pada rentang 0 – 0,5 detik, produksi daya PV lebih besar daripada konsumsi daya beban, sehingga baterai mengalami proses *charge*, hal ini ditunjukkan oleh nilai SoC baterai yang meningkat. Pada detik 0,5 terjadi kenaikan beban yang menyebabkan daya yang dikonsumsi beban lebih besar dari daya yang diproduksi PV sehingga baterai mengalami proses *discharge*, hal ini ditunjukkan oleh SoC baterai yang menurun. Sedangkan untuk superkapasitor, yang selalu melakukan proses *charge* dan *discharge*, SoC cenderung konstan dan hanya akan berubah drastis pada saat transien atau perubahan daya. Pada Gambar 12 juga menunjukkan bahwa dengan penambahan superkapasitor arus yang harus disuplai oleh *energy storage* dapat dipisah, dimana arus riak akan disuplai oleh superkapasitor. Sehingga arus yang disuplai oleh baterai akan menjadi lebih konstan jika dibandingkan dengan hasil simulasi sistem tanpa superkapasitor. Studi ini menguatkan hasil pada penelitian [13] dan [14] bahwa superkapasitor efektif dalam memitigasi beban dinamis dan menjaga kestabilan arus pada sistem *hybrid*.



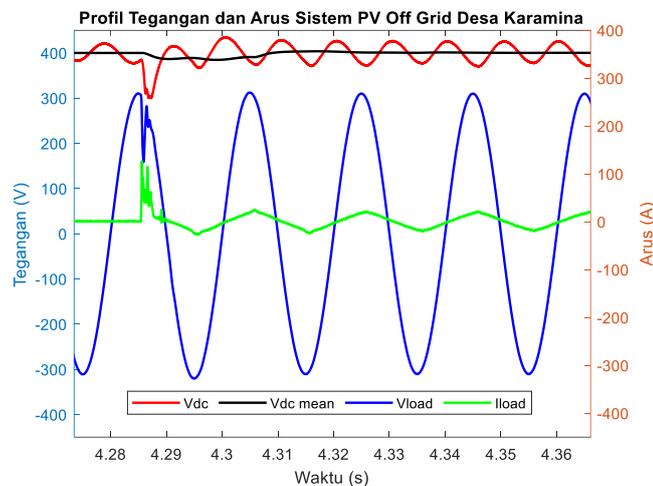
Gambar 12. Profil Arus, Daya dan SoC Sistem Akibat Perubahan Beban

Tabel 4. Ringkasan Hasil Simulasi Perubahan Beban

| Parameter                | Hasil Pengamatan                                    |
|--------------------------|---|
| Tegangan AC beban        | Tetap stabil  |
| Tegangan Bus DC          | Fluktuasi sesaat, dikoreksi oleh superkapasitor     |
| SoC Baterai              | Menurun saat beban tinggi, naik saat beban rendah   |
| Arus suplai oleh Baterai | Lebih konstan dibanding sistem tanpa superkapasitor |

### 3.2.2. Simulasi Inrush Transient Current

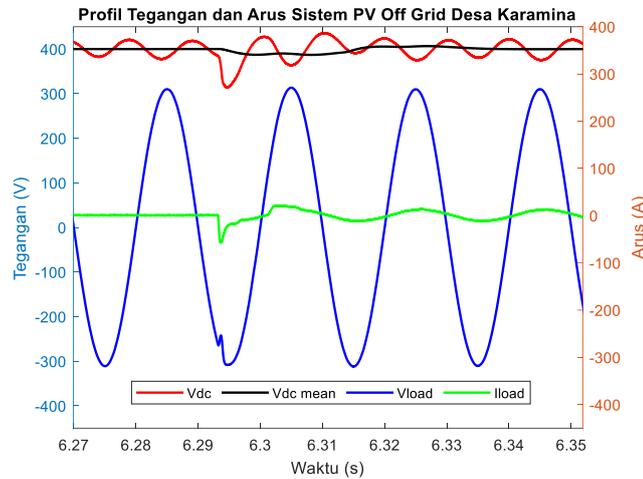
Pada skema ini dilakukan simulasi *inrush transient current*. Kondisi ini terjadi saat beban non linier yang menarik *inrush current* dinyalakan. Pada awal simulasi tidak ada beban yang disuplai sistem, kemudian beban dinyalakan dan dimatikan berulang kali, sehingga menghasilkan arus seperti pada Gambar 13 bagian arus beban (*Iload*). Pada saat terjadi kenaikan beban dari tanpa beban menjadi berbeban, *inrush transient current* yang ditarik oleh beban menyebabkan tidak hanya bus DC yang mengalami penurunan tegangan sementara, namun juga terjadi *voltage dip* pada tegangan AC. Namun, tingkat keparahan dari *voltage dip* akan berkurang sebanding dengan berkurangnya tingkat keparahan *inrush transient current*. Seperti pada Gambar 14, dengan nilai *inrush peak* yang lebih rendah dan *rising time* yang lebih lambat, *voltage dip* yang terjadi semakin sedikit.



Gambar 13. Profil Tegangan dan Arus Sistem pada Kondisi *Inrush Current*

Salah satu cara untuk memitigasi *voltage dip* yang diakibatkan oleh *inrush current* pada *microgrid* atau *weakgrid* adalah dengan penambahan *auxiliary supply* yang terhubung secara paralel dengan keluaran *inverter*.

*Auxiliary supply* ini hanya akan menyuplai daya atau arus frekuensi tinggi saja. Sehingga, saat terjadi *inrush transient current*, *auxiliary supply* akan menyerap atau menyuplai kelebihan daya dan mengurangi tingkat keparahan *voltage dip* yang terjadi. Perbandingan dengan literatur [17] menunjukkan bahwa solusi *auxiliary supply* searah dengan pendekatan umum mitigasi *transient current* pada mikrogrid.



Gambar 14. Profil Tegangan dan Arus Sistem pada Kondisi Keparahan *Inrush Current* yang Lebih Rendah

Tabel 5. Ringkasan Hasil Simulasi *Inrush Current*

| Parameter         | Hasil Pengamatan                                  |
|-------------------|---|
| Tegangan AC beban | Tetap stabil                                      |
| Tegangan Bus DC   | Fluktuasi sesaat, dikoreksi oleh superkapasitor   |
| SoC Baterai       | Menurun saat beban tinggi, naik saat beban rendah |

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan memodelkan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* berbasis penyimpanan energi hibrida superkapasitor-baterai untuk Desa Karamina, Papua. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kestabilan tegangan dan arus meskipun terjadi fluktuasi radiasi matahari maupun perubahan beban. Superkapasitor terbukti efektif dalam merespons perubahan daya secara cepat dan mengurangi arus riak yang diterima oleh baterai, sehingga memperpanjang umur baterai serta meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Pada kondisi tanpa sinar matahari, baterai mampu menyuplai daya ke beban, sementara di siang hari energi dari panel surya digunakan untuk mengisi ulang baterai. Sistem yang dirancang terbukti handal untuk memenuhi kebutuhan energi harian masyarakat Desa Karamina yang berada di wilayah tanpa akses listrik PLN, sekaligus menjadi model solusi elektrifikasi untuk daerah-daerah terpencil lainnya di Indonesia.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. M. Haegel and S. R. Kurtz, "Global Progress Toward Renewable Electricity: Tracking the Role of Solar (Version 2)," *IEEE J Photovolt*, vol. 12, no. 6, pp. 1265–1272, 2022, doi: 10.1109/JPHOTOV.2022.3206532.
- [2] B. Chegari, M. Tabaa, E. Simeu, and M. El Ganaoui, "Optimal energy management of a hybrid system composed of PV, Wind turbine, pumped hydropower storage and battery storage to achieve a complete energy self-sufficiency in residential buildings," *IEEE Access*, vol. 12, no. September, pp. 126624–126639, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3454149.
- [3] J. T. Bialasiewicz, "Renewable energy systems with photovoltaic power generators: Operation and modeling," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 7, pp. 2752–2758, 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.920583.
- [4] S. Ganesan, U. Subramaniam, A. A. Ghodke, R. M. Elavarasan, K. Raju, and M. S. Bhaskar, "Investigation on sizing of voltage source for a battery energy storage system in microgrid with renewable energy sources," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 188861–188874, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3030729.
- [5] F. R. Albogamy *et al.*, "Real-Time Scheduling for Optimal Energy Optimization in Smart Grid Integrated with Renewable Energy Sources," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 35498–35520, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3161845.
- [6] R. Raff, V. Golub, D. Topic, G. Knezevic, and J. Perok, "Optimization of the off-grid systems based on renewable energy for power supply in rural areas," *International Conference on the European Energy Market, EEM*, vol. 2019-Septe, 2019, doi: 10.1109/EEM.2019.8916573.
- [7] J. O. Oladigbolu, M. A. M. Ramli, and Y. A. Al-Turki, "Feasibility study and comparative analysis of hybrid renewable power system for off-grid rural electrification in a typical remote village located in Nigeria," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 171643–171663, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3024676.

- [8] B. Hachim, D. Dahlioui, and A. Barhdadi, "Electrification of rural and arid areas by solar energy applications case study: Boumhaout village in south of Morocco," *Proceedings of 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2018*, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/IRSEC.2018.8702978.
- [9] A. Zaharim *et al.*, "Public acceptance on stand-alone renewable energy project in rural area of Malaysia," *Energy and Sustainability in Small Developing Economies, ES2DE 2017 - Proceedings*, 2017, doi: 10.1109/ES2DE.2017.8015349.
- [10] F. Bartyzel and P. Oclón, "Simulation software for design improvement," *2023 8th International Conference on Smart and Sustainable Technologies, SpliTech 2023*, p. 10193173, 2023, doi: 10.23919/SpliTech58164.2023.10193173.
- [11] M. I. Hossain, M. Tanvir Islam Mim, T. Banik, M. R. Jany, M. Mukter Hossain Emon, and A. Shufian, "Decentralized Solar PV/Battery-based Energy Management for Isolated Areas," *2024 IEEE 3rd International Conference on Robotics, Automation, Artificial-Intelligence and Internet-of-Things, RAAICON 2024 - Proceedings*, pp. 188–193, 2024, doi: 10.1109/RAAICON64172.2024.10928452.
- [12] M. F. Elmorshedy, M. R. Elkadeem, K. M. Kotb, I. B. M. Taha, and D. Mazzeo, "Optimal design and energy management of an isolated fully renewable energy system integrating batteries and supercapacitors," *Energy Convers Manag*, vol. 245, no. July, p. 114584, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114584.
- [13] H. W. Yan *et al.*, "Battery Lifetime Extension in a Stand-Alone Microgrid with Flexible Power Point Tracking of Photovoltaic System," *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 11, no. 2, pp. 2281–2290, 2023, doi: 10.1109/JESTPE.2022.3212702.
- [14] R. Alfanz, A. Nugraha, M. Oton, M. F. Haekal, W. Martiningsih, and M. F. Fauzy, "Design and Development of An Automatic Energy Buffer System and Hybrid Energy Storage on PV System Using Supercapacitors," *2024 International Conference on Informatics Electrical and Electronics, ICIEE 2024 - Proceedings*, p. 2024, 2024, doi: 10.1109/ICIEE63403.2024.10920392.
- [15] B. Ihsan, D. Sahidin, T. D. Rachmildha, and D. Hamdani, "Peningkatan Umur Baterai pada PLTS Off-grid menggunakan Penyimpanan Energi Hibrida Berbasis," vol. 05, no. 2, pp. 77–84, 2024.
- [16] B. Ihsan, "Perancangan Dan Analisis Sistem PV Off-Grid Dengan Sistem Hybrid Energy Storage," *Thesis, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung*, 2021.
- [17] B. Ihsan, A. Matthee, F. Leferink, T. D. Rachmilda, and D. Hamdani, "Active Transient EMI Stabilization," *Asia Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, p. 2021, 2021.