

SIMULASI DAN ANALISIS UNJUK KERJA PLTS ATAP OFF-GRID TERINSTAL SUPERCAPACITOR

Erlan Taneza
I Made Ari Nrartha*
Sabar Nababan

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Jl. Majapahit No.62, Gomong, Kec.
Selaparang, Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat, 83115.

Arnawan Hasibuan

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh, Jl. Batam, Blang Pulo, Kec. Muara
Satu, Kota Lhokseumawe, Provinsi Aceh, 24353.

Abstract

The reliability of off-grid solar power systems (PLTS) is highly dependent on battery performance. However, the battery shows limited response in supplying the load due to unstable voltage fluctuations, which causes the battery to heat up quickly. So there is a need for additional components in the system such as supercapacitors. Supercapacitors are energy storage devices with high power and energy density, short charging duration, long service life, and low risk of heat. This research aims to determine the effect of supercapacitors on the performance of off-grid PLTS systems. The research uses data from the specifications of the off-grid rooftop PLTS system at SMKN 1 Lingsar. Temperature and irradiation data are obtained from the data logger installed in the system. The research is a simulation in Simulink MATLAB. Several supercapacitor capacities were selected to determine changes in system performance. The simulation results show that the supercapacitor capacity has a significant effect on the current and voltage in the battery. Supercapacitors show the ability to absorb and release large currents in a relatively short time, thereby speeding up the battery charging process. Supercapacitors with a capacity equivalent to battery capacity have the best contribution to system performance.

Keywords:

Batteries; off-grid rooftop PV system; supercapacitor.

Abstrak

Keandalan sistem tenaga surya (PLTS) *off-grid* sangat bergantung pada kinerja baterai. Namun, baterai menunjukkan respons yang terbatas dalam menyuplai beban karena fluktuasi tegangan yang tidak stabil, yang menyebabkan baterai menjadi cepat panas. Sehingga perlu adanya komponen tambahan pada sistem seperti superkapasitor. Superkapasitor adalah perangkat penyimpanan energi dengan daya dan kepadatan energi tinggi, durasi pengisian daya yang singkat, masa pakai yang lama, serta risiko panas yang rendah. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh superkapasitor pada kinerja sistem PLTS *off-grid*. Penelitian menggunakan data dari spesifikasi sistem PLTS atap *off-grid* di SMKN 1 Lingsar. Data suhu dan iradiasi diperoleh dari data logger yang terpasang pada sistem. Penelitian merupakan simulasi pada Simulink MATLAB. Beberapa kapasitas superkapasitor dipilih untuk mengetahui perubahan kinerja sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kapasitas superkapasitor berpengaruh signifikan terhadap arus dan tegangan pada baterai. Superkapasitor menunjukkan kemampuan menyerap dan melepaskan arus besar dalam waktu relatif singkat sehingga mempercepat proses pengisian baterai. Superkapasitor berkapasitas setara kapasitas baterai mempunyai kontribusi terbaik pada kinerja sistem.

Kata Kunci:

Baterai; sistem PV atap off-grid; superkapasitor.

DOI: 10.38038/vocatech.v5i2.173

Received: 8 Februari 2024; Accepted: 24 April 2024; Published: 25 April 2024

*Corresponding author:

I Made Ari Nrartha, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Jl. Majapahit No.62, Gomong, Kec. Selaparang, Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat. 83115.

Email: nrartha@unram.ac.id

Citation in APA Style: Taneza, E., Nrartha, I M. A., Nababan, S., Hasibuan, A. (2024). Simulasi Dan Analisis Unjuk Kerja PLTS Atap Off-Grid Terinstal Supercapacitor. *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal*, 5(2), 136-146.

1. PENDAHULUAN

Permintaan energi listrik meningkat dan harga bahan bakar fosil yang semakin mahal membuat manusia melakukan terobosan baru untuk mendapatkan sumber energi pembangkit listrik dari energi baru dan terbarukan ([Saputra, 2022](#)). Pengembangan teknologi-teknologi yang memiliki sumber dari energi terbarukan, salah satunya adalah pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Ditinjau dari operasi PLTS, PLTS dibagi menjadi dua yaitu PLTS *on-grid* dan PLTS *off-grid*. PLTS *on-grid* tidak banyak mengalami kendali operasi karena energi yang dihasilkan PLTS langsung di kirim ke *grid*. PLTS *off-grid* adalah pembangkit listrik yang berdiri sendiri tanpa terhubung ke *grid* dalam melayani beban listrik. PLTS *off-grid* memerlukan baterai untuk menyimpan energi listrik hasil konversi dari energi matahari. Secara garis besar komponen penting pada PLTS *off-grid* adalah modul surya, baterai dan inverter (untuk merubah sumber DC menjadi AC sesuai dengan kebutuhan tegangan konsumen listrik).

Pengembangan sistem PLTS *off-grid* sangat membantu penyediaan energi listrik dipedesaan ([Naim, 2017](#)), mendukung program sekolah ramah lingkungan dengan memanfaatkan listrik dari sumber energi terbarukan yaitu energi surya ([Putri et al., 2020](#)), sebagai sumber energi listrik pada daerah terdampak bencana ([Santosa et al., 2022](#)). Untuk memastikan potensi energi surya layak untuk menjadi energi listrik di suatu daerah telah dilakukan kajian ([Santhiarsa & Kusuma, 2005](#)) sehingga kapasitas daya PLTS yang akan dipasang dapat memenuhi kebutuhan listrik konsumen ([Firnanda & Ardiansyah, 2020](#)). Disamping kajian, penting juga memastikan sistem PLTS *off-grid* yang terbangun mempunyai performa yang optimal sehingga sistem dilengkapi dengan data *logger* yang dapat memantau sistem PLTS *off-grid* bekerja optimal ([Wikapti et al., 2023](#)) dan analisis instalasi listrik yang sesuai standar ([Firnanda et al., 2023](#)). Terdapat banyak buku panduan maupun jurnal publikasi untuk merancang PLTS yang dapat digunakan sebagai pengetahuan untuk pembangunan PLTS ([Safitri & Rihayat, 2019](#)), ([Sianipar, 2017](#)) dan dukungan standar peralatan untuk sistem PLTS ("IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems," 2000). Apalagi masyarakat dewasa ini sudah sangat melek terhadap pentingnya menjaga lingkungan dengan memanfaatkan sumber-sumber energi bersih seperti energi surya ([Icasolar, 2020](#)).

Bagian penting dari PLTS *off-grid* adalah baterai. Baterai berfungsi menyimpan energi listrik yang dihasilkan PLTS dan menyalurkan energi tersebut pada saat malam hari atau energi matahari yang tiba-tiba hilang karena mendung atau hujan. Baterai juga mempunyai beberapa kekurangan seperti kurang responsif dalam menyuplai beban, fluktuasi tegangan baterai pada sistem PLTS *off-grid* yang tidak stabil dan kurang efisien sehingga baterai cepat panas. Kelemahan kerja baterai pada sistem PLTS *off-grid* menjadi perhatian beberapa penelitian dengan mengusulkan pemanfaatan *supercapacitor* untuk menunjang kerja baterai bahkan terdapat kajian untuk mengganti baterai dengan *supercapacitor* ([Nurhasmia et al., 2021](#)). *Supercapacitor* dapat menstabilkan tegangan baterai pada sistem PLTS *off-grid* ([Yoga et al., 2022](#)). *Supercapacitor* dapat digunakan untuk mengoptimalkan konsumsi energi listrik dari sistem PLTS *off-grid* ([Jaszczur & Hassan, 2020](#)). Sistem *hybrid* baterai-*supercapacitor* pada operasi turbin angin dengan dengan generator induksi ([Mendis et al., 2014](#)) pada sistem *hybrid* angin-surya ([Akram et al., 2017](#)). Penerapan *supercapacitor* juga digunakan sebagai media penyimpanan alternatif untuk bus listrik di Indonesia ([Lystianingrum, 2019](#)). Bagian terpenting dalam pemanfaatan *supercapacitor* pada charging baterai di sistem PLTS adalah adanya analisis teknik dan kelayakan ([Barbosa et al., 2018](#)) sehingga pemilihan *supercapacitor* pada sistem dapat optimal.

Penelitian ini melakukan simulasi sistem PLTS *off-grid* yang terinstal *supercapacitor*. Pemodelan sistem *charge controller* menggunakan metoda *maximum power point tracking* (MPPT) ([Tan et al., 2020](#)). MPPT sangat berguna untuk mengoptimalkan daya yang diterima oleh panel surya ([Winarno & Marauli, 2018](#)), ([Nrartha et al., 2023](#)), ([Nrartha et al., 2023](#)) dan ([Alfian et al., 2022](#)). *Supercapacitor* memiliki kerapatan daya yang besar, pengisian energi yang cepat dan dengan mempertimbangkan karakteristik yang dimiliki oleh *supercapacitor* yang dinilai mampu menambah kinerja dan keandalan baterai pada PLTS *off-grid*, sehingga penelitian ini menyajikan pengaruh *supercapacitor* yang terinstal pada sistem PLTS *off-grid* dengan simulasi menggunakan Simulink pada MATLAB. Penyajian diawali dengan landasan teori dilanjutkan dengan metode penelitian, kemudian hasil dan pembahasan, dan diakhiri dengan kesimpulan.

2. STUDI PUSTAKA

Energi surya dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, seperti pemanasan air, pembangkit listrik tenaga surya, dan lain sebagainya. Teknologi yang digunakan untuk mengumpulkan, menyimpan, dan mengonversi energi surya semakin maju dan efisien, sehingga meningkatkan ketersediaan dan terjangkaunya energi surya bagi masyarakat. Sistem PLTS menggunakan sumber energi surya melalui *cell photovoltaic* untuk merubah energi matahari menjadi energi listrik. PLTS terdiri dari beberapa komponen seperti komponen penyimpanan energi (baterai), komponen pengontrol daya (*Solar Charge Controller*), dan panel surya. Pengisian baterai oleh modul surya diatur oleh komponen *Solar Charge Controller* (SCC). SCC berfungsi menjaga pengisian pada baterai supaya tidak berlebih, sehingga kerusakan pada baterai dapat dihindari. Energi listrik yang dihasilkan modul surya tergantung dari suhu lingkungan, dan iradiasi matahari. Suhu lingkungan mempengaruhi suhu modul surya. Korelasi suhu modul surya dan suhu lingkungan pada kondisi standar (*Nominal Operating Cell Temperature*) adalah ukuran suhu yang dicapai oleh modul surya dalam kondisi iradiasi matahari 800 W/m², kecepatan angin 1 m/s, dan suhu lingkungan 20 °C. Persamaan 1 adalah formula untuk memprediksi suhu permukaan modul surya apabila suhu lingkungan diketahui.

$$T_{mod} = T_{amb} + Irr \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) \quad (1)$$

Dimana T_{mod} , T_{amb} , Irr , dan $NOCT$ adalah suhu modul surya (°C), suhu lingkungan sekitar modul surya (°C), Intensitas iradiasi matahari (W/m²) dan Nominal Operating Cell Temperature (°C).

Supercapacitor merupakan media penyimpanan energi yang memiliki kapasitansi hingga ribuan Farad dan terbuat dari karbon aktif. *Supercapacitor* memberikan kerapatan energi yang lebih tinggi daripada kapasitor konvensional dan memiliki siklus hidup yang lebih lama dari pada baterai. Cara kerja *supercapacitor* sama seperti kapasitor konvensional dan baterai, tetapi permukaannya yang lebih besar dan lebih tipis membuatnya memiliki kerapatan daya yang lebih tinggi, waktu charging yang lebih pendek, dan siklus hidup yang lebih lama. Kapasitor konvensional dan *supercapacitor* adalah komponen pasif yang dapat menyimpan banyak energi listrik dalam waktu yang singkat. Kapasitor konvensional terdiri dari dua buah plat konduktor, yang biasanya terbuat dari logam, dan isolator yang berfungsi sebagai pemisah di antara kedua pelat tersebut. Ukuran kapasitor untuk menampung muatan elektron disebut kapasitansinya. Menurut Michael Faraday kapasitor memiliki kapasitansi sebesar 1 Farad jika dapat memuat muatan elektron sebanyak satu Coulomb (1 Coulomb sama dengan 6,25×10¹⁸ elektron). Persamaan 2 adalah formula untuk menghitung muatan pada kapasitor.

$$Q = C \times V \quad (2)$$

Dimana Q , C dan V adalah muatan elektron dalam coulombs (C), kapasitansi dalam farad (F) dan tegangan dalam Volt (V). Kapasitas kapasitor dapat dihitung dengan Persamaan 3.

$$C = \epsilon_0 \times k \frac{A}{d} \quad (3)$$

Dimana ϵ_0 , k , A dan d adalah permitivitas bahan (F/m), konstanta bahan dielektrik, luas permukaan pelat (m²) dan jarak pelat (m).

Kapasitansi sebuah kapasitor menentukan kemampuan kapasitor dilewati melewati arus bolak balik (AC). Apabila kapasitor dialiri arus searah (DC), arus akan tertahan pada pinggirannya dielektrikannya, atau dielektrik akan dilaluinya. Kapasitor yang diberi muatan listrik pada titik tertentu kemudian melepaskan kembali dan menyimpan muatan listrik sesuai dengan kapasitasnya. Kapasitansi kapasitor menentukan jumlah muatan yang dapat disimpan di dalam kapasitor, dan nilai kapasitansi menentukan waktu pengosongannya.

3. METODE PENELITIAN

Model PLTS *off-grid* dibuat pada Simulink MATLAB. Data spesifikasi modul surya, baterai, dan inverter untuk membuat model diambil dari data sekunder sistem PLTS *off-grid* SMKN 1 Lingsar, Jl Gora II no.4, Kec.Lingsar, Kabupaten Lombok Barat. Tabel 1 dan 2 menunjukkan data spesifikasi modul surya dan baterai di PLTS *off-grid* SMKN 1 Lingsar. Data suhu dan iradiasi diukur secara langsung menggunakan data *logger* selama 5 hari.

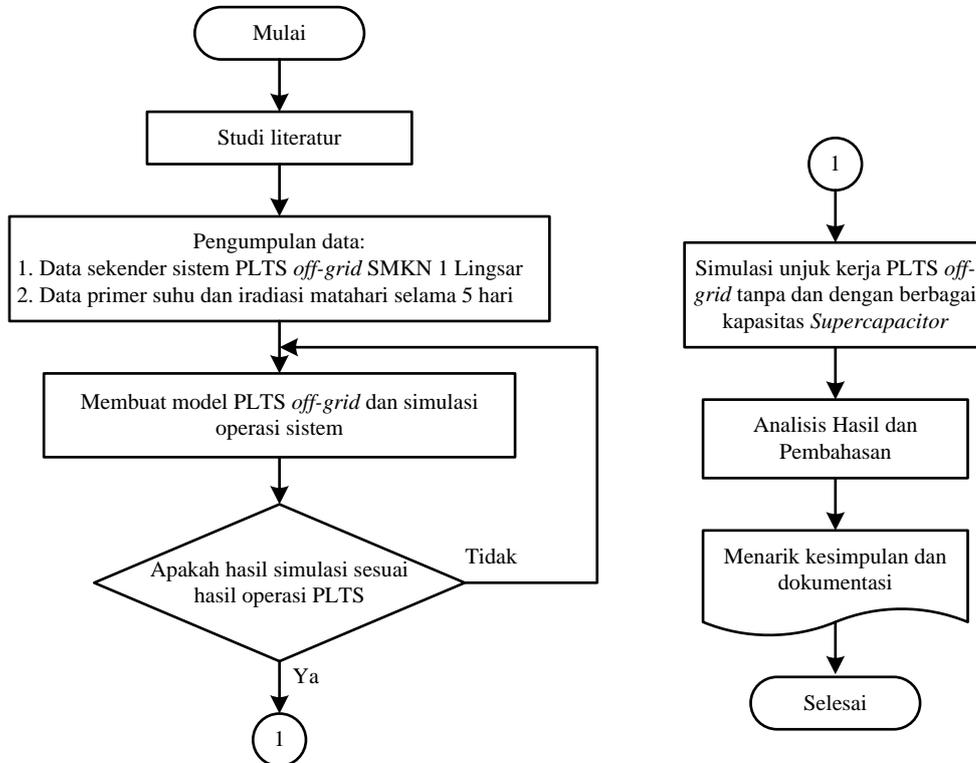
Tabel 1. Spesifikasi modul surya di SMKN 1 Lingsar

| | |
|---|-----------------------|
| Tipe modul surya | Polycrystalline |
| Daya Maksimum (P_{max}) | 340 Wp |
| Tegangan Operasi Maksimum (V_{mp}) | 39,217 V |
| Arus Operasi Maksimum (I_{mp}) | 8,68 A |
| Tegangan Rangkaian Terbuka (V_{oc}) | 46,132 V |
| Arus Hubung Singkat (I_{sc}) | 9,093 |
| Tegangan Sistem Maksimum (V_{max}) | 1500 V |
| Rating Fuse Maksimum | 15 A |
| Iradiansi Maksimum | 1000 W/m ² |
| Suhu Cell | 45 ± 25 °C |

Tabel 2. Spesifikasi Baterai di SMKN 1 Lingsar

| | |
|----------------------------|-------------------|
| Tipe baterai | Lead Acid Battery |
| Pengisian Tegangan Konstan | 12 V |
| Tegangan Stand By | 13,5 – 13,8 V |
| Arus Inisial | 60 A |
| Kapasitas | 200 Ah |

Tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1. Tahapan penelitian dimulai dari studi literatur yang berhubungan dengan penelitian PLTS *off-grid* dan *supercapacitor*, dilanjutkan dengan pengumpulan data sistem berupa data sekunder, primer dan operasi PLTS *off-grid* SMKN 1 Lingsar untuk menyelesaikan penelitian, membuat model pada simulink MATLAB dilanjutkan dengan simulasi sistem untuk diketahui hasil operasi PLTS *off-grid* sesuai dengan kondisi operasi PLTS *off-grid* di SMKN 1 Lingsar. Apabila hasil simulasi sesuai dengan hasil operasi PLTS *off-grid* SMKN 1 Lingsar lanjut ke simulasi PLTS untuk melihat unjuk kerja PLTS tanpa dan dengan berbagai kapasitas kapasitor. Hasil simulasi dianalisis dan dibahas untuk dapat disimpulkan dan didokumentasikan.



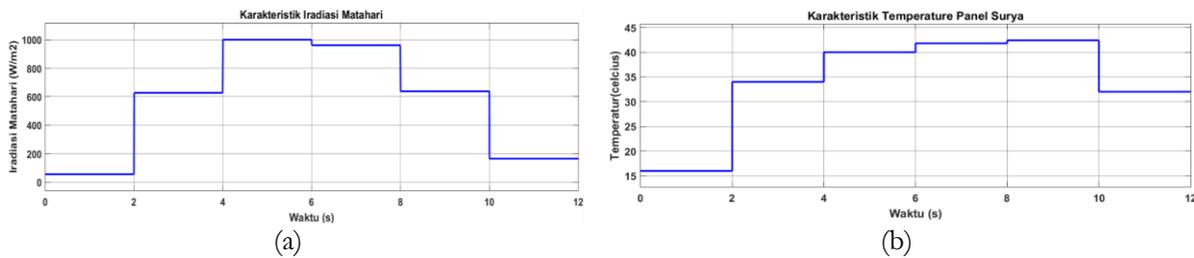
Gambar 1. Tahapan penelitian sistem PLTS *off-grid*

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data suhu dan iradiasi hasil pengukuran data logger yang ditempatkan di SMKN 1 Lingsar ditampilkan pada Tabel 1. Data pada tabel 1 dapat dibuat grafik hubungan waktu terhadap perubahan iradiasi dan suhu lingkungan. Grafik tersebut ditunjukkan pada Gambar 2(a) dan (b) untuk grafik waktu terhadap iradiasi dan grafik waktu terhadap suhu lingkungan. Gambar 2(a) dan (b) menunjukkan iradiasi tertinggi terjadi pada pukul 10.00 – 12.00 sebesar 1000,06 W/m² dan pada suhu lingkungan sebesar 41,16 oC. Gambar 2(b) dan (a) menunjukkan suhu tertinggi pada pukul 12.00 – 14.00 sebesar 41,89 oC dan pada iradiasi sebesar 961,26 W/m².

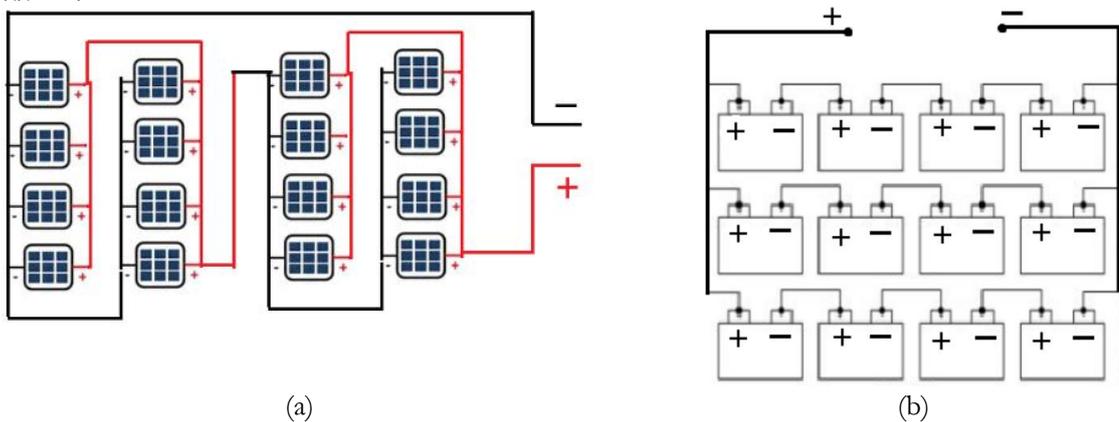
Tabel 3. Data iradiasi matahari dan suhu lingkungan rata-rata selama 5 hari

| Pukul | Ekivalen waktu simulasi (s) | Iradiasi matahari (W/m ²) | Suhu lingkungan (°C) |
|---------------|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| 06:00 – 08:00 | 0 – 2 | 56,54 | 16,89 |
| 08:00 – 10:00 | 2 – 4 | 627,97 | 34,30 |
| 10:00 – 12:00 | 4 – 6 | 1005,06 | 41,16 |
| 12:00 – 14:00 | 6 – 8 | 961,26 | 41,89 |
| 14:00 – 16:00 | 8 – 10 | 658,16 | 41,42 |
| 16:00 – 18.00 | 10 - 12 | 165,55 | 32,59 |



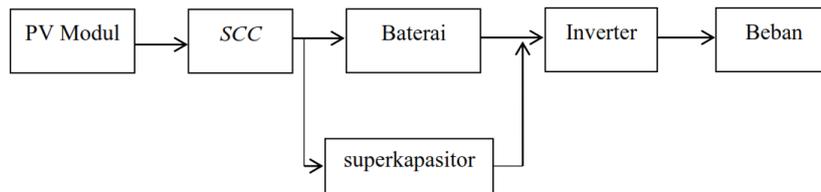
Gambar 2. Data primer hasil pengukuran data logger di SMKN 1 Lingsar

Konfigurasi modul surya dan baterai ditunjukkan pada Gambar 3(a) dan (b). Total modul surya sebanyak 16 dengan konfigurasi empat modul surya disusun seri (string) kemudian di paralel 4 string sehingga kapasitas daya total adalah 5,44 kWp. Empat baterai disusun seri kemudian di paralel 3 susunan seri sehingga kapasitas total baterai adalah 2,4 kAh.

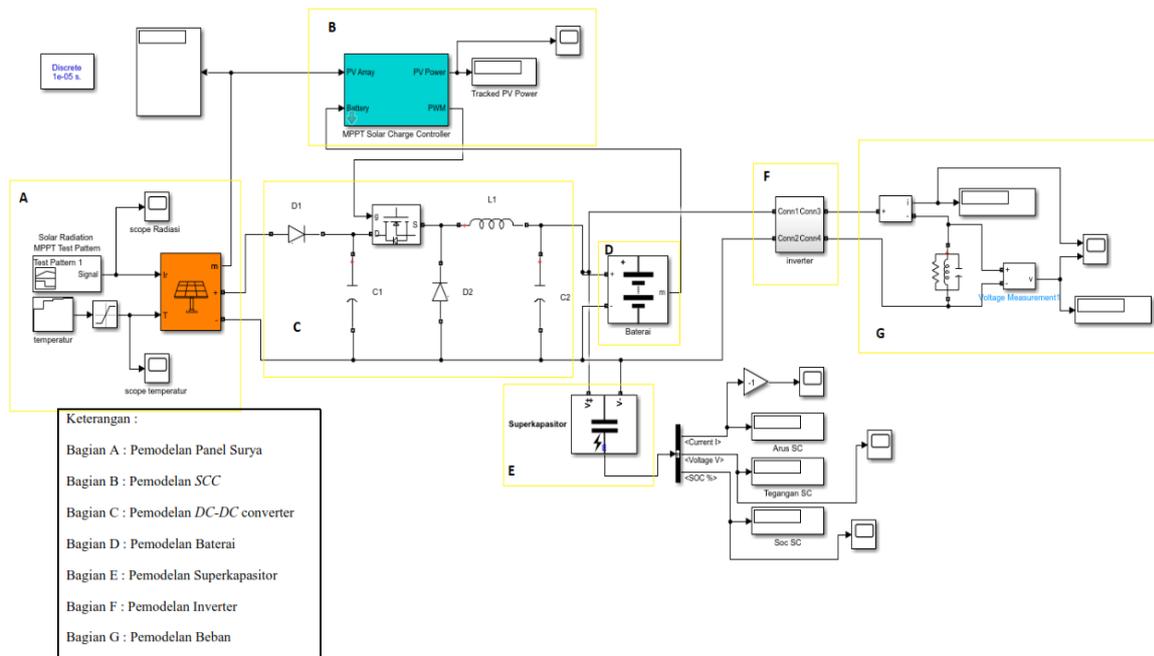


Gambar 3. Konfigurasi modul surya dan baterai

Blok diagram sistem PLTS atap *off-grid* terinstal *supercapacitor* dan pemodelannya di Simulink MATLAB ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Pemodelan pada Simulink terbagi dalam 7 bagian dari bagian A sampai bagian G. Masing-masing bagian merupakan model dari blok diagram Gambar 4.



Gambar 4. Blok diagram PLTS atap *off-grid* terinstal *supercapacitor*



Gambar 5. Model sistem PLTS atap *off-grid* terinstal *supercapacitor* di Simulink MATLAB

Tabel 4 adalah kapasitas *supercapacitor* yang digunakan pada simulasi. Pemilihan nilai kapasitansi *supercapacitor* tersebut didasari oleh kapasitas energi yang tersimpan pada baterai dan kapasitas *supercapacitor* yang ada dipasaran.

Tabel 4. Variasi kapasitansi *supercapacitor* untuk simulasi

| No | Kapasitansi (kF) | Tegangan (V) |
|----|------------------|--------------|
| 1 | 90,0 | 48,0 |
| 2 | 73,6 | 46,0 |
| 3 | 51,5 | 50,0 |
| 4 | 0,5 | 48,0 |

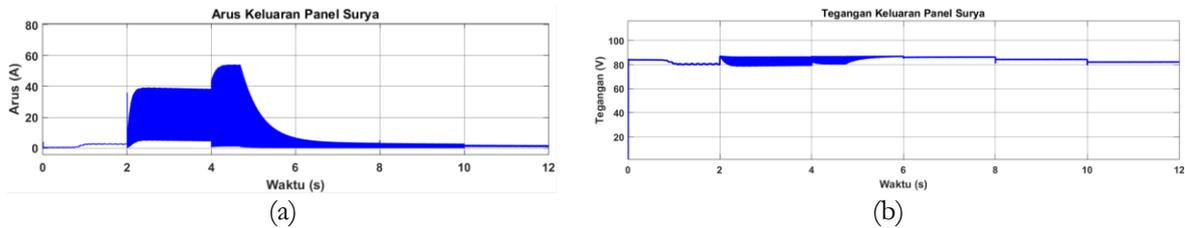
Hasil simulasi dari model PLTS *off-grid* sebelum terinstal *supercapacitor* diuji untuk mengetahui kesesuaian hasil simulasi dengan operasi PLTS *off-grid* SMK N 1 Lingsar. Perbandingan hasil operasi tersebut ditunjukkan pada Tabel 5. Selisih operasi untuk tegangan dan daya yang dibangkitkan untuk iradiasi dan suhu lingkungan yang sama diperoleh cukup kecil (selisih tegangan dan daya sebesar 0,1 dan 0,2).

Tabel 5. Hasil validasi model PLTS *off-grid* di Simulink MATLAB

| | Hasil simulasi | Hasil operasi PLTS SMK | Selisih |
|--------------|----------------|------------------------|---------|
| Tegangan (V) | 80,8 | 80,7 | 0,1 |
| Daya (W) | 118,2 | 118,0 | 0,2 |

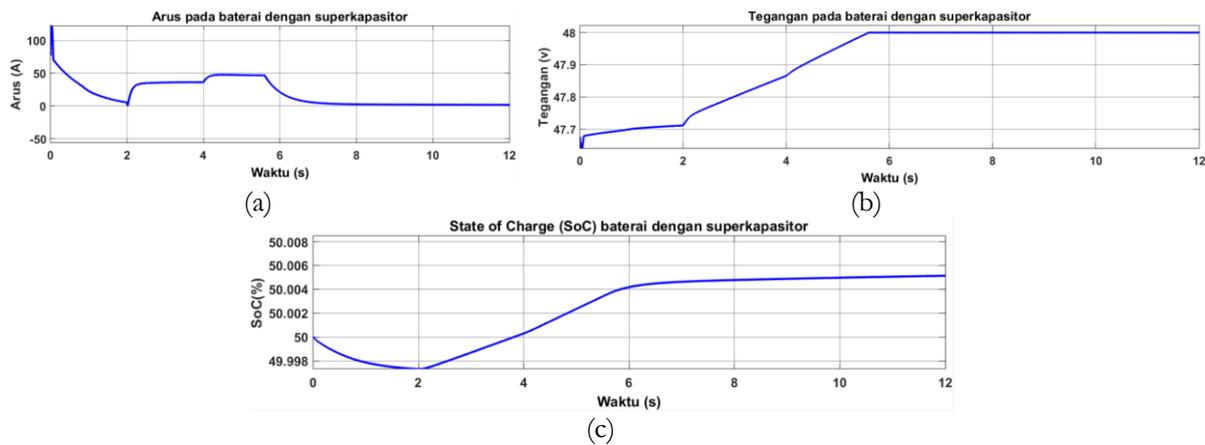
Hasil simulasi arus dan tegangan PLTS *off-grid* tanpa *supercapacitor* untuk perubahan iradiasi dan suhu lingkungan berdasarkan pada data Tabel 3 ditunjukkan pada Gambar 6(a) dan (b). Hasil tersebut hasil kontrol MPPT dari SCC dan pada kondisi baterai State of Charge (SoC) 50%. Peningkatan arus mulai detik kedua karena iradiasi matahari yang meningkat dan berangsur turun yang disebabkan oleh baterai yang sudah

mencapai tegangan maksimumnya atau baterai sudah terisi penuh. Detik ke 5 dan seterusnya arus yang dihasilkan oleh panel surya diatur oleh SCC untuk menjaga baterai yang sudah terisi penuh. Tegangan keluaran dari panel surya dipengaruhi oleh iradiasi matahari dan suhu panel. Semakin besar nilai iradiasi matahari maka tegangan panel surya semakin besar, berlaku terbalik dengan suhu pada panel surya, semakin kecil suhu panel surya maka semakin maksimal tegangan yang dihasilkan oleh panel surya. Tegangan maksimal yang dihasilkan oleh panel surya sekitar 80 V. Tegangan maksimal panel surya sebesar 92 V ketika, tetapi tidak tercapai tegangan tersebut karena suhu panel surya cukup tinggi.



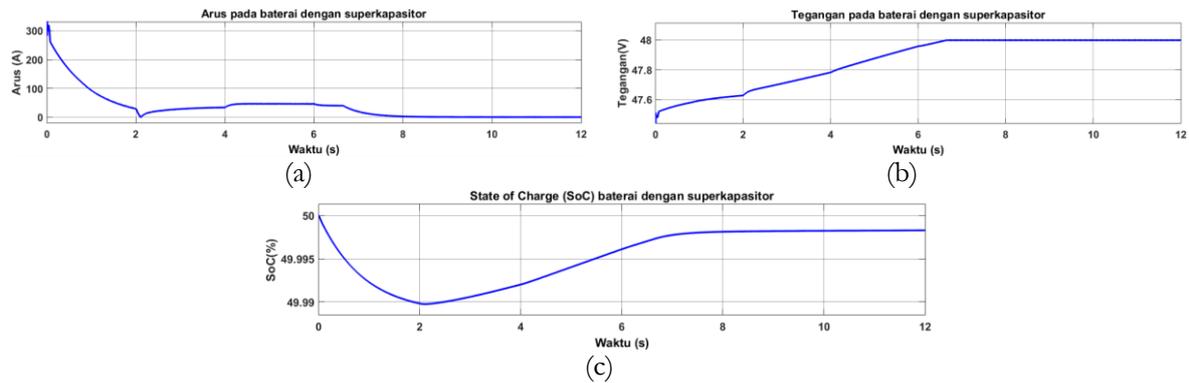
Gambar 6. Hasil simulasi PLTS *off-grid* tanpa *supercapacitor*

PLTS *off-grid* yang terinstal *supercapacitor* dengan kapasitas 90 kF 48 V. Hasil simulasi pemodelan sistem setelah terinstal *supercapacitor* ditunjukkan pada Gambar 7. Waktu charging baterai dengan penambahan *supercapacitor* 90 kF lebih lama dibanding dengan waktu charging sebelum ditambahkan *supercapacitor*. Sebelum ditambahkan *supercapacitor* waktu yang dibutuhkan baterai untuk mencapai level maksimalnya yaitu sebesar 4,3 detik atau 4,3 jam (waktu real) dari kondisi baterai SoC 50 %, setelah ditambahkan *supercapacitor* waktu yang dibutuhkan baterai untuk mencapai level maksimalnya menjadi lebih lama yakni 5,6 detik. Hal ini disebabkan oleh daya yang dihasilkan oleh panel surya disimpan ke *supercapacitor* hingga *supercapacitor* dalam keadaan penuh. Hasil simulasi juga menunjukkan dengan penambahan *supercapacitor* 90 kF arus menjadi lebih tinggi nilainya di 2 detik pertama atau 2 jam pertama yakni berada pada nilai 100-10 A.



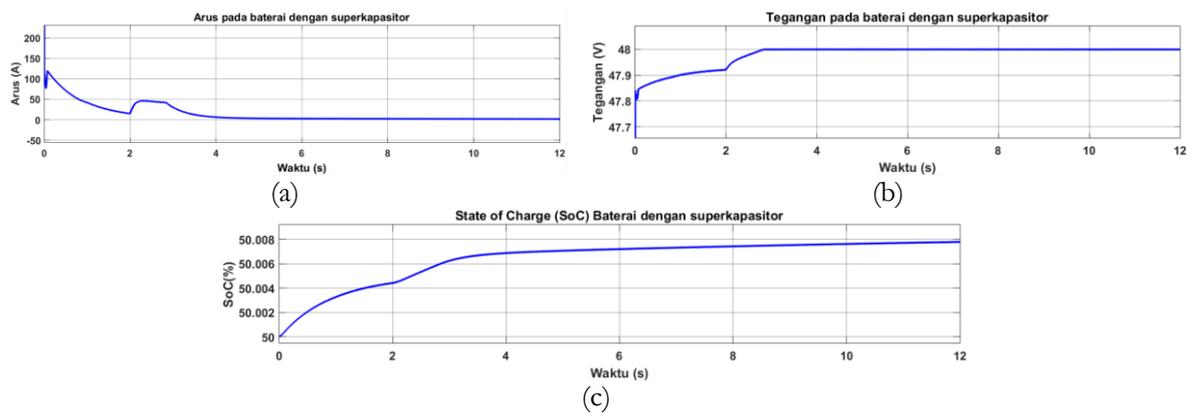
Gambar 7. Hasil simulasi PLTS *off-grid* terinstal *supercapacitor* 90 kF 48V

PLTS *off-grid* yang terinstal *supercapacitor* dengan kapasitas 73,6 kF 46 V. Kapasitansi ini sama dengan 75 % dari total energi baterai. Tegangan *supercapacitor* yang digunakan pada simulasi ini adalah 46 V. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 8. SoC dari baterai mengalami penurunan selama 2 detik yang kemudian kembali naik. Pengisian baterai menjadi lebih lama jika ditambahkan *supercapacitor* dengan kapasitas penyimpanan energinya hanya 75 % dari energi total baterai yaitu menjadi 6,8 detik, sehingga membuat waktu charging lebih lambat 2,8 detik atau 2 jam 40 menit (waktu real). Hal ini dikarenakan adanya perbedaan kapasitas dan tegangan kerja antara baterai dan *supercapacitor*, karena tegangan kerja *supercapacitor* lebih rendah daripada baterai. Penambahan *supercapacitor* ini mempengaruhi nilai arus di 2 detik pertama, dimana nilai arusnya mencapai 300-30 A. Hal ini dikarenakan *supercapacitor* menyediakan arus yang besar pada awal pengisian.



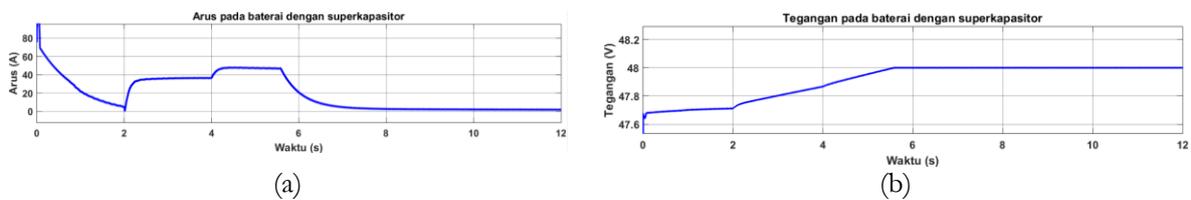
Gambar 8. Hasil simulasi PLTS *off-grid* terinstal *supercapacitor* 73,6 kF 46V

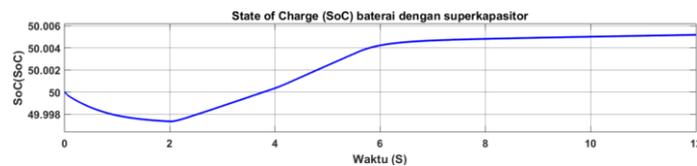
PLTS *off-grid* yang terinstal *supercapacitor* dengan kapasitas 51,1 kF, 50 V. Kapasitansi *supercapacitor* kapasitas ini setara dengan 50 % dari total energi yang tersimpan pada baterai. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 9. Hasil simulasi untuk kapasitas *supercapacitor* ini waktu pengisian baterai dipercepat menjadi 3 detik atau 3 jam (waktu real). Waktu pengisian lebih cepat 1 jam 30 menit dari penambahan *supercapacitor* 51,5 kF, 50V. Selain waktu charging yang menjadi lebih cepat, nilai arus pada baterai menjadi lebih tinggi di dua jam pertama, yakni pada nilai 100-10A, berbeda dengan sebelum ditambahkan *supercapacitor*, nilai arus di dua jam pertama sangat kecil yakni berkisar antara 1-13 A. Nilai SoC yang meningkat mengikuti nilai dari tegangan, nilainya yang semakin meningkat menunjukkan sistem PLTS sedang melakukan charging ke baterai, ketika baterai sudah mencapai tegangan maksimalnya, nilai SoC menjadi konstan yang menandakan bahwa baterai sudah terisi penuh.



Gambar 9. Hasil simulasi PLTS *off-grid* terinstal *supercapacitor* 51,1 kF 50V

PLTS *off-grid* yang terinstal *supercapacitor* dengan kapasitas 0,5 kF, 48 V. Pemilihan kapasitas ini berdasarkan ketersediaan kapasitas ini di pasaran. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 10. Penambahan *supercapacitor* dengan kapasitas ini membuat waktu *charging* baterai 0,30 detik atau 30 menit (waktu real) lebih lama. Tetapi lebih cepat dari pada waktu *charging* supercapacitor kapasitas 73,6 kF yaitu 0,20 detik atau 20 menit (waktu real). Nilai SoC mengikuti nilai tegangan, ketika nilai tegangan sudah mencapai tegangan maksimal yaitu 48 V, maka nilai SoC menjadi konstan. Saat baterai mencapai kondisi penuh atau terisi penuh, SCC akan mengatur daya masuk ke baterai secara bertahap untuk menjaga baterai tetap terisi penuh dan terhindar dari *overcharging*.





(c)

Gambar 10. Hasil simulasi PLTS *off-grid* terinstal *supercapacitor* 0,5 kF 48V

Tabel 6 menunjukkan hasil perbandingan arus dan tegangan pada PLTS *off-grid* tanpa dan dengan *supercapacitor*. Hasil pada Tabel 6 menunjukkan tegangan pada baterai tanda dan dengan *supercapacitor* memiliki nilai yang hampir sama antara 47-48 V, perbedaannya terletak pada waktu untuk mencapai tegangan 48 V. Tegangan 48 V adalah tegangan maksimal pada baterai. Penambahan *supercapacitor* dengan variasi 51,5 kF, 48 V membuat baterai mencapai tegangan maksimalnya lebih cepat. Hal tersebut dikarenakan tegangan pada *supercapacitor* 51,5 kF memiliki nilai tegangan kerja yang lebih tinggi, sehingga daya pada *supercapacitor* menjadi lebih besar. Daya yang besar mampu menambah aliran daya ke baterai sehingga baterai lebih cepat mencapai tegangan maksimumnya. *Supercapacitor* 51,5 kF dapat menghemat waktu *charging* 1 jam 30 menit lebih cepat dari PLTS *off-grid* tanpa *supercapacitor*. *Supercapacitor* 73,6 kF, 46 V, nilai tegangan awal pada detik 0-2 adalah 47,4 V dan mencapai tegangan 48 V di detik 8. *Supercapacitor* 73,6 kF, 46 V mempunyai waktu *charging* lebih lama 2,4 detik dibanding dengan PLTS *off-grid* tanpa *supercapacitor*. *Supercapacitor* 90 kF dan 0,5 kF memiliki nilai tegangan kerja yang sama dengan baterai, *supercapacitor* ini memperlambat proses *charging* 30 menit dibandingkan dengan PLTS *off-grid* tanpa *supercapacitor*. Kapasitas tegangan pada *supercapacitor* mempengaruhi waktu *charging* dari baterai, tegangan *supercapacitor* yang lebih besar memperbaiki waktu *charging* menjadi lebih singkat yakni 1 jam 30 menit sedangkan untuk tegangan *supercapacitor* yang lebih kecil, waktu *charging* lebih lama. Arus pada baterai dengan *supercapacitor* memiliki arus yang lebih besar daripada tanpa *supercapacitor*.

Tabel 6. Perbandingan hasil simulasi PLTS *off-grid* tanda dan dengan *supercapacitor*

| Waktu (s) | Tanpa <i>supercapacitor</i> | | Terinstal <i>supercapacitor</i> | | | | | | | |
|-----------|-----------------------------|----------|---------------------------------|----------|-------------|----------|--------------|----------|------------|----------|
| | Teg. (V) | Arus (A) | 90 kF 48V | | 73,6 kF 46V | | 51,1 kF 50 V | | 0,5 F 48 V | |
| | | | Teg. (V) | Arus (A) | Teg. (V) | Arus (A) | Teg. (V) | Arus (A) | Teg. (V) | Arus (A) |
| 0 – 2 | 47,6-47,7 | 1,6-4,8 | 47,6-47,7 | 100-5 | 47,4-47,6 | 320-20 | 47,8-47,9 | 120-42 | 47,6-47,7 | 120-1,3 |
| 2 – 4 | 47,7-47,9 | 4,8-42 | 47,7-47,9 | 5-48 | 47,6-47,7 | 20-35 | 47,9-48,0 | 42-6 | 47,7-47,8 | 1,3-37 |
| 4 – 6 | 47,9-48,0 | 42-6,6 | 47,9-48,0 | 48-23 | 47,7-47,9 | 35-58 | 48,0 | 6-3 | 47,8-48,0 | 37-21 |
| 6 – 10 | 48,0 | 6,6-3,4 | 48,0 | 23-2 | 47,9-48,0 | 46-4 | 48,0 | 3 | 48,0 | 21-3,5 |
| 10 – 12 | 48,0 | 3,4 | 48,0 | 2 | 48,0 | 4-2 | 48,0 | 3 | 48,0 | 3 |
| 10 – 12 | 48,0 | 3,4 | 48,0 | 2 | 48,0 | 2 | 48,0 | 3 | 48,0 | 3 |

5. SIMPULAN

Penambahan *supercapacitor* pada sistem PLTS *off grid* skala kecil mempengaruhi nilai arus pada baterai. Penambahan *supercapacitor* 90; 73,6; 51,5 dan 0,5 kF menghasilkan nilai arus dan tegangan awal pada SoC 50 % adalah sebesar 100-5 A dan 47,7 V; 320-20 A dan 47,6 V; 120-42 A dan 47,9 V; dan 120-1,3 A dan 47,7 V. Penambahan *supercapacitor* mampu menyerap dan melepaskan arus yang lebih besar dalam waktu yang lebih singkat dan meningkatnya daya serap arus oleh baterai. Nilai tegangan pada baterai dengan dan tanpa *supercapacitor* memiliki nilai yang sama yaitu 48 V tetapi dengan durasi waktu yang berbeda untuk mencapai tegangan tersebut.

Waktu *charging* baterai pada PLTS *off-grid* dengan *supercapacitor* 51,5 kF, 50 V adalah 1 jam 30 menit lebih cepat dari sistem tanpa *supercapacitor*. *Supercapacitor* 73,6 kF 46 V membuat proses *charging* baterai menjadi 2 jam 40 menit lebih lama dibandingkan dengan sistem tanpa *supercapacitor*, dan dari kapasitas *supercapacitor* lainnya yang ditampilkan pada Tabel 6.

DAFTAR PUSTAKA

- Akram, U., Khalid, M., & Shafiq, S. (2017). An innovative hybrid wind-solar and battery-supercapacitor microgrid system—development and optimization. *IEEE Access*, 5, 25897–25912. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2767618>
- Alfian, M. R., Nnartha, I. M. A., & Zubaidah, T. (2022). ANFIS-based MPPT controller design on boost converter to improve photovoltaic system performance. *dielektrika*, 9(2), 88–97. <https://doi.org/10.29303/dielektrika.v9i2.310>
- Barbosa, V., Nogueira, T., Carati, E., & Felgueiras, C. (2018). Supercapacitor in battery charges of photovoltaic panel: analysis of the technical feasibility. *Energy Procedia*, 153, 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.019>
- Firnanda, A., & Ardiansyah, H. (2020). Analisis kebutuhan daya listrik di Akademi Komunitas Negeri Aceh Barat. *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal*, 2(1), 59–66.
- Firnanda, A., Saputra, H., Ardiansyah, H., Denk, T. M. Sya'rani, Novriza, F., Saputra, A., & Simbolon, Z. K. (2023). Analisis kuat hantar arus pada instalasi listrik. *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal*, 5(1), 82–93. <https://doi.org/10.38038/vocatech.v5i1.142>
- Icasolar. (2020). *Solar Energy for Everybody*. Icasolar.Com. <https://m.icasolar.com/support/blog/pwm>
- IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems. (2000). In *IEEE Std 929-2000* (p. i). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2000.91304>
- Jaszczur, M., & Hassan, Q. (2020). An Optimisation and sizing of photovoltaic system with supercapacitor for improving Self-Consumption. *Applied Energy*, 279, 115776. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115776>
- Lystianingrum, V. (2019). *Superkapasitor sebagai alternatif penyimpan energi untuk bus listrik di indonesia: potensi dan tantangan*.
- Mendis, N., Muttaqi, K. M., & Perera, S. (2014). Management of battery-supercapacitor hybrid energy storage and synchronous condenser for isolated operation of pmsg based variable-speed wind turbine generating systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2), 944–953. <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2287874>
- Naim, M. (2017). Rancangan sistem kelistrikan plts off-grid 1000 watt di desa mahalona kecamatan towuti. *DINAMIKA – Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 9(1), 27–32.
- Nnartha, I. M. A., Ginarsa, I. M., & Muljono, A. B. (2023). Proceedings of the First Mandalika International Multi-Conference on Science and Engineering 2022, MIMSE 2022 (Mechanical and Electrical). In *Proceedings of the First Mandalika International Multi-Conference on Science and Engineering 2022, MIMSE 2022 (Mechanical and Electrical)*. Atlantis Press International BV. <https://doi.org/10.2991/978-94-6463-078-7>
- Nnartha, I. M. A., Ginarsa, I. M., Muljono, A. B., Sultan, Sri Adnyani, I. A., Bilad, M. R., & Abid, M. (2023). Improvement of rooftop solar panels efficiency using maximum power point tracking based on an adaptive neural network fuzzy inference system. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 16(1). <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2023.1.11>
- Nurhasmia, N., Subagiada, K., & Natalisanto, A. I. (2021). Studi penggunaan superkapasitor sebagai media penyimpan energi. *Progressive Physics Journal*, 2(2), 79. <https://doi.org/10.30872/ppj.v2i2.770>
- Putri, R., Meliala, S., & Zuraida, Z. (2020). Penerapan instalasi panel surya off-grid menuju energi mandiri di yayasan pendidikan islam dayah miftahul jannah. *JET (Journal of Electrical Technology)*, 5(3), 117–120.
- Safitri, N., & Rihayat, T. (2019). *Buku Teknologi Photovoltaic*. Yayasan Puga Aceh Riset.
- Santhiarsa, I. G. N. N., & Kusuma, I. G. B. W. (2005). Kajian energi surya untuk pembangkit tenaga listrik. *Teknologi elektro*, 4(1), 29–33.
- Santosa, A. N. T., Hani, S., & Santoso, G. (2022). Perancangan sistem PLTS Off-Grid Kapasitas 100 Wp sebagai sumber energi alternatif charging 220 V Di Daerah Terdampak Bencana Semeru. *Prosiding Snast, November*, A35-43. <https://doi.org/10.34151/prosidingnast.v8i1.4102>
- Saputra, H. (2022). Analisa potensi energi angin di pantai lhong kabupaten aceh besar menggunakan distribusi weibull. *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal*, 4(1), 56–64.
- Sianipar, R. (2017). Dasar perencanaan pembangkit listrik tenaga surya. *Jetri : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 11, 61–78. <https://doi.org/10.25105/jetri.v11i2.1445>
- Tan, R. H. G., Er, C. K., & Solanki, S. G. (2020). Modeling of photovoltaic MPPT lead acid battery charge controller for standalone system applications. *E3S Web of Conferences*.

- Wikapti, I. A. N. I., Nrartha, I. M. A., & Muljono, A. B. (2023). Monitoring system design for Off-Grid solar power plant based on internet of things. *dielektrika*, 10(1), 14–23.
- Winarno, I., & Marauli, M. (2018). Implementasi Maximum Power Point Tracker (MPPT) untuk optimasi daya pada panel surya berbasis algoritma incremental conductance. *Seminar Nasional Teknologi Informasi Dan Multimedia*, 49–54.
- Yoga, S. T., Isdawimah, I., & Kamil, I. (2022). Implementasi penggunaan super kapasitor pada sistem PLTS Off-Grid sebagai penstabil baterai. *ELECTRICES*, 4(1), 7–11.