

PENGARUH PENAMBAHAN SUPERKAPASITOR PADA SISTEM PLTS OFF GRID SKALA KECIL

Erlan Taneza¹, Ir. I Made Ari Nrartha, ST., MT.², Sabar Nababan, ST., MT.³

¹Jurusan Teknik Elektro Universitas Mataram

Jl. Majapahit no. 62, Mataram, Lombok, NTB, Indonesia

1erlantaneza2208@gmail.com, 2ari.nrartha@gmail.com, 3nababan.sabar@gmail.com

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah teknologi yang menghasilkan energi listrik dari energi surya. PLTS membutuhkan baterai untuk menyimpan energi yang dihasilkan pada siang hari. Keandalan sebuah PLTS off grid terletak pada baterai. Penambahan superkapasitor pada sistem PLTS off grid skala kecil, bertujuan untuk menambah keandalan baterai, karena baterai memiliki beberapa kekurangan seperti kurangnya responsifitas dalam menyuplai beban, fluktuasi tegangan yang tidak stabil dan kurang efisien karena baterai cepat panas. Pemodelan sistem PLTS Off Grid Skala kecil melalui Simulink digunakan pada penelitian ini untuk melihat pengaruh dari penambahan superkapasitor pada sistem PLTS off grid skala kecil. Data yang digunakan pada pemodelan sistem PLTS ini menggunakan data skunder berupa spesifikasi panel surya dan baterai. Data primer berupa data logger iradiasi matahari dan suhu, dari SMKN 1 Lingsar. Hasil simulasi dari Simulink menunjukkan peningkatan nilai arus dan tegangan pada baterai yang meningkat berdasarkan kapasitas superkapasitor yang ditambahkan. Peningkatan nilai arus dan tegangan dikarenakan superkapasitor mampu menyerap dan melepaskan arus yang besar dalam waktu yang relatif singkat. serta superkapasitor mempengaruhi waktu charging baterai berdasarkan kapasitas superkapasitor yang digunakan, seperti dengan kapasitas 51,5 kF mampu membuat charging baterai menjadi lebih cepat 1 jam 30 menit.

Kata Kunci : Superkapasitor, PLTS, Off Grid, Kapasitor, Baterai

1. PENDAHULUAN

Meningkatnya akan permintaan kebutuhan energi listrik, membuat manusia melakukan terobosan yang baru guna mendapat sumber pembangkit listrik yang bisa menggunakan energi baru dan terbarukan. Penggunaan energi terbarukan ini dikarenakan sumber daya energi fosil seperti gas, minyak bumi, batu bara, dll sewaktu-waktu bisa habis. Pengembangan teknologi-teknologi yang memiliki sumber energi dari alam, salah satunya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). *PLTS off grid* adalah sebuah pembangkit listrik yang berdiri sendiri dan menggunakan baterai sebagai media penyimpanan. *PLTS off grid* memerlukan baterai untuk menampung energi listrik yang didapatkan dari hasil konversi sinar matahari menjadi listrik. akan tetapi pengisian secara langsung pada baterai kurang efektif karena *output* dari panel

surya bergantung pada kondisi cuaca sehingga membuat pengisian kurang ideal Sulit bagi baterai untuk mengalami fluktuasi daya yang sering dan cepat tanpa kehilangan kerugian dalam pemakaiannya. Keandalan sebuah *PLTS off grid* terletak pada baterai yang berfungsi sebagai suplai utama. Namun, baterai memiliki beberapa kekurangan seperti kurangnya responsifitas dalam menyuplai beban yang butuh arus starting yang tinggi, fluktuasi tegangan yang tidak stabil dan kurang efisien karena baterai cepat panas. Sebagai alternatif untuk mengatasi beberapa masalah baterai pada *PLTS off grid*, maka digunakan superkapasitor sebagai komponen tambahan. Superkapasitor memiliki kerapatan daya yang besar, pengisian energi yang cepat dibandingkan dengan baterai biasa. Mempertimbangkan karakteristik yang dimiliki oleh superkapasitor yang dinilai

mampu menambah kinerja dan keandalan baterai pada *PLTS off grid* tersebut akibatnya tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan superkapasitor pada sistem *PLTS off grid* melalui pemodelan simulasi menggunakan Simulink / Matlab.

2. LANDASAN TEORI

Energi surya dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, seperti pemanasan air, pembangkit listrik tenaga surya, dan lain-lain. teknologi yang digunakan untuk mengumpulkan, menyimpan, dan mengonversi energi surya semakin maju dan efisien, sehingga meningkatkan ketersediaan dan terjangkaunya energi surya bagi Masyarakat. Sistem pembangkit listrik tenaga surya (*PLTS*) menggunakan sumber energi surya melalui photovoltaic, yang mengubah sinar foton matahari menjadi energi. Pembangkit listrik tenaga surya terdiri dari berbagai bagian, seperti komponen penyimpanan energi, sistem pengontrol daya, dan photovoltaic. Pengisian baterai oleh modul surya diatur oleh komponen yang bernama *Solar Charge controller* agar tidak terjadi pengisian berlebihan pada baterai. ketika baterai dalam keadaan penyimpanan penuh, sehingga tidak menyebabkan kerusakan pada baterai. Temperatur lingkungan, selain iradiasi matahari, adalah komponen lain yang dapat memengaruhi kinerja modul surya. Temperatur lingkungan dan modul surya berkorelasi linier. Ada parameter yang menjelaskan bagaimana suhu modul surya dan suhu lingkungan berhubungan satu sama lain. Pada kondisi standar, Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) adalah ukuran suhu yang dicapai oleh modul surya dalam kondisi iradiasi matahari 800 W/m², kecepatan angin 1 m/s, dan temperatur lingkungan 20 °C, iradiasi matahari mengacu. Berikut persamaan untuk memprediksi temperature permukaan modul surya:

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

Keterangan:

- T_{mod} = Temperatur modul surya (°C)
- T_{amb} = Temperature lingkungan sekitar modul surya (°C)
- I_{rr} = Intensitas iradiasi matahari (W/m²)

NOCT = *Nominal Operating Cell Temperature* (°C)

Dua konfigurasi kerja yang paling umum digunakan saat menerapkan *PLTS off grid* adalah sistem penyambung listrik dan penyambung listrik AC. menggunakan istilah coupling sesuai dengan titik koneksi yakni AC Coupling dan DC Coupling. Sistem *PLTS off grid* ini memiliki beberapa komponen utama yang saling berhubungan sehingga dapat beroperasi dengan baik seperti panel surya, solar charge controller, baterai, dan inverter. Berdasarkan standar *IEEE standard 929-2000*, *PLTS off grid* skala kecil adalah *PLTS* yang menghasilkan daya dibawah 10 kWp.

Superkapasitor juga disebut sebagai ultrakapasitor, adalah media penyimpanan energi yang memiliki kapasitansi hingga ribuan Farad. Terbuat dari karbon aktif, superkapasitor memberikan kerapatan energi yang lebih tinggi daripada kapasitor konvensional dan memiliki siklus hidup yang lebih lama daripada baterai. Superkapasitor bekerja sama dengan kapasitor dan baterai biasa, 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 dan superkapasitor adalah komponen pasif elektronika yang dapat menyimpan banyak listrik dalam waktu yang singkat karena kapasitansinya adalah Farad. Kapasitor terdiri dari dua buah plat konduktor, yang biasanya terbuat dari logam, dan isolator yang berfungsi sebagai pemisah di antara kedua plat tersebut. Kemampuan kapasitor untuk menampung muatan elektron disebut kapasitansinya. Karena 1 Coulomb = 6,25×10¹⁸ elektron, Michael Faraday mengusulkan bahwa kapasitor akan memiliki kapasitansi sebesar 1 Farad jika dapat memuat muatan elektron sebanyak 1 Coulombs, seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan 2:

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

Keterangan:

- Q = muatan electron dalam coulombs (C)
 - C = nilai kapasitansi dalam farad (F)
 - V = besar tegangan dalam volt (V)
- Kapasitas kapasitor dapat dihitung saat membuat kapasitor dengan mengetahui luas area pelat metal (A), jarak (d) antara dua plat metal, dan konstanta (k) bahan dielektrik. Dengan rumus dapat ditulis seperti Persamaan 3.

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

Keterangan:

ϵ_0 = Permittivitas Bahan (F/m)

k = konstanta bahan dielektrik

A = luas permukaan pelat (m²)

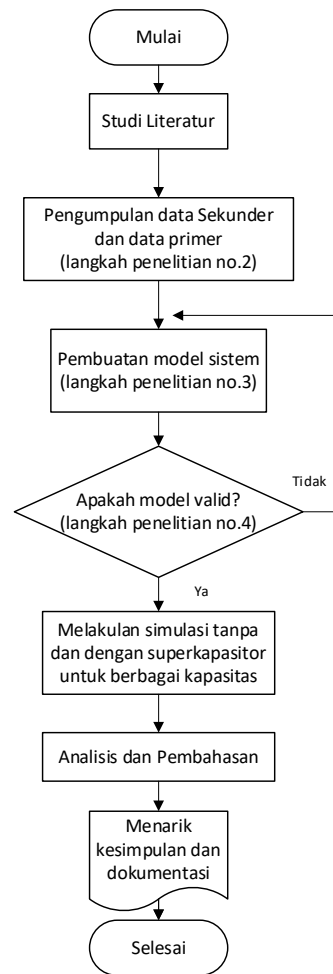
d = jarak pelat (m)

Kapasitansi sebuah kapasitor menentukan kemampuan kapasitor untuk melewati arus bolak balik (AC). Apabila kapasitor dialiri arus searah (DC), arus akan tertahan pada pinggiran dielektrikunya, atau dielektrikunya akan dilaluinya. Kapasitor yang diberi muatan listrik pada titik tertentu kemudian dilepaskan kembali, 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

Penelitian ini membuat model *PLTS off grid* skala kecil pada Simulink Matlab. Media untuk menyimpan energi listrik adalah baterai dan superkapasitor. Data-data dari hasil simulasi Simulink Matlab tersebut dianalisis dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh superkapasitor terhadap arus dan tegangan baterai pada sistem *PLTS off grid*, dan mendapatkan hasil perbandingan nilai arus dan tegangan sistem *PLTS off grid* dengan superkapasitor dan tanpa superkapasitor. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Sistem Tenaga Listrik, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Mataram. Penelitian dilakukan menggunakan data sekunder dan primer dari *PLTS off grid* SMKN 1 Lingsar, Jl Gora II no.4, Kec.Lingsar, Kabupaten Lombok Barat. Data sekunder berupa spesifikasi *PLTS*, termasuk spesifikasi panel surya dan baterai. Data primer berupa data iradiasi matahari, suhu, dan kelembaban udara. Pengambilan data primer selama 5 hari.

Demi mencapai tujuan dalam penyusunan penelitian ini, maka perlu adanya susunan kerangka kerja yang jelas tahapantahapannya. Kerangka kerja ini merupakan langkah-langkah yang akan dilakukan dalam penyelesaian masalah yang akan dibahas. Berikut adalah kerangka kerja penelitian yang digunakan:



Alur penelitian dimulai dengan studi literatur untuk mendapatkan informasi yang diperlukan. Dilanjutkan ketahap persiapan dan pengambilan data skunder berupa spesifikasi panel surya dan baterai, dan data primer menggunakan data logger yang dapat mengukur iradiasi matahari dan suhu. setelah pengambilan data dilanjutkan ketahap membuat pemodelan sistem *PLTS off grid* skala kecil menggunakan Simulink / Matlab. Validasi dilakukan untuk menguji akurasi sistem yang telah dibuat pada Simulink dengan sistem *PLTS off grid* yang berada di SMKN 1 Lingsar. Setelah pemodelan sistem valid dengan sistem *PLTS off grid* SMKN 1 Lingsar maka dilanjutkan ketahap simulasi. Hasil didapatkan setelah dilakukan simulasi untuk dianalisis selanjutnya dan diakhiri dengan menarik kesimpulan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

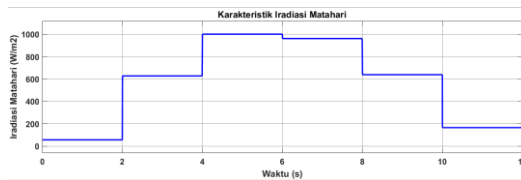
Penelitian ini menggunakan pemodelan sistem *PLTS off grid* pada Simulink/Matlab

Pemodelan yang telah dibuat memerlukan data-data untuk dijalankan. Pemodelan sistem yang telah dibuat tentu saja membutuhkan data iradiasi matahari dan tempertur panel sebagai inputan. data iradiasi yang digunakan dalam simulasi ini dirata-ratakan perdua jam seperti Tabel 1, dari data yang telah didapatkan sebelumnya dengan cara pengukuran langsung ditempat PLTS SMKN 1 Lingsar.

Tabel 1 Data rata-rata iradiasi matahari tanggal 24 Mei 2023

Detik (waktu simulink)	Jam	Iradiasi Matahari (W/m^2)
0-2	06:00-08:00	56,54
2-4	08:00-10:00	627,97
4-6	10:00-12:00	1005,06
6-8	12:00-14:00	961,26
8-10	14:00-16:00	658,16
10-12	16:00-18:00	165,55

karakteristik yang didapat dari pengukuran, dimodelkan ke dalam sistem pemodelan pada Simulink sebagai inputan, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Iradiasi matahari

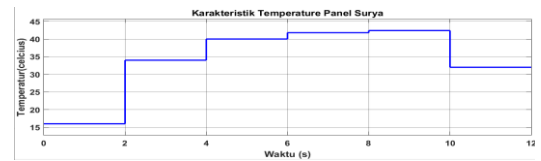
Data temperature panel juga diperlukan sebagai inputan pemodelan sistem dalam penelitian ini. Hasil dari pengambilan data selama lima hari di SMKN 1 Lingsar, data suhu panel per lima menit kemudiann dirata-ratakan per dua jam seperti pada Tabel 4.2

Tabel 2. Data rata-rata suhu panel

Detik	Jam	Suhu panel ($^{\circ}C$)
0-2	06:00-08:00	16,89
2-4	08:00-10:00	34,30
4-6	10:00-12:00	41,16
6-8	12:00-14:00	41,89
8-10	14:00-16:00	41,42
10-12	16:00-18:00	32,59

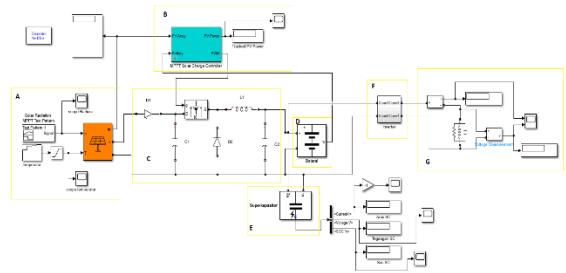
Data temperature yang sudah dirata-ratakan pada Tabel 2. kemudian dijadikan inputan

pada sistem pemodelan yang telah dibuat seperti Gambar 2.



Gambar 2. Temperatur panel surya

Data iradiasi matahari dan temperature panel tersebut dimasukkan kedalam sistem pemodelan yang telah dibuat seperti pada Gambar 3.

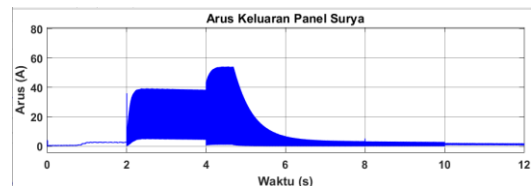


Gambar 3. Sistem PLTs off grid

Pemodelan yang telah dibuat seperti pada Gambar 3.diberikan data-data iradiasi matahari dan temperature panel sehingga dapat melanjutkan simulasi dan analisis lebih lanjut.

HASIL SIMULASI TANPA SUPERKAPASITOR

Hasil simulasi tanpa superkapasitor didapatkan sebagai berikut:

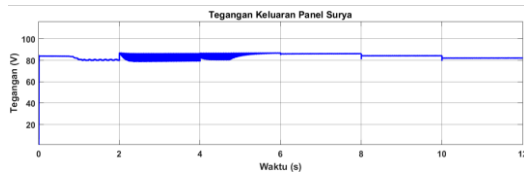


Gambar 4. Arus panel surya

Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan pengontrol MPPT dan baterai yang diatur SoCnya senilai 50 %. Hasil dari simulasi ini dipengaruhi oleh iradiasi matahari yang diberikan dan sikontrol SCC MPPT. arus yang dihasilkan sangat maksimal sasuai dengan iradiasi matahari yang terus meningkat sampai detik ke 5, yang kemudian berangsur turun dan stabil 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 pengontrol *MPPT* untuk menjaga keadaan baterai yang sudah terisi penuh

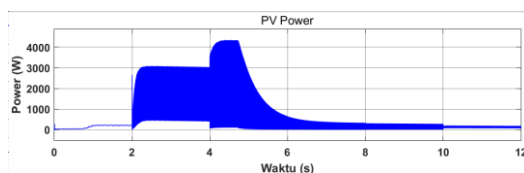
Hasil keluaran tegangan dari sistem panel surya sebelum ditambahkan superkapsior:



Gambar 5. Tegangan panel surya

Tegangan keluaran dari panel dipengaruhi oleh iradiasi matahari dan temperatur panel surya. Dimana semakin besar nilai radia matahari maka tegangan keluaran panel surya juga akan semakin besar, begitu sebaliknya pada temperatur panel surya, semakin kecil temperatur panel surya maka semakin maksimal tegangan yang dihasilkan oleh panel surya. tegangan maksimal yang dihasilkan oleh panel surya di angka sekitar 80 volt. Hal ini dikarenakan spesifikasi panel surya yang sebesar 46 volt sebanyak 2 string yang dirangkai secara paralel sehingga tegangan maksimal yang bisa dihasilkan oleh panel surya adalah sebesar 92 volt ketika dalam keadaan maksimal. Tidak tercapainya tegangan maksimal yang seharusnya tentu dipengaruhi oleh nilai temperature panel surya.

Keluaran daya sistem *PLTS off grid* dengan diberikan inputan iradiasi matahari dan temperatur panel surya tanpa superkapsior:



Gambar 6. Daya panel surya

Daya merupakan hasil perkalian antara arus dan tegangan. dalam hal ini, panel surya menghasilkan daya listrik dengan mengalikan arus yang dihasilkan oleh cahaya matahari yang terkonversi menjadi energi listrik, dan tegangan hasil dari potensial listrik yang dihasilkan oleh panel surya. Gambar 4.16 memperlihatkan grafik daya yang dihasilkan oleh panel surya pada sistem simulasi ini mencapai 4000 Watt sampai dengan detik ke 5, kemudian

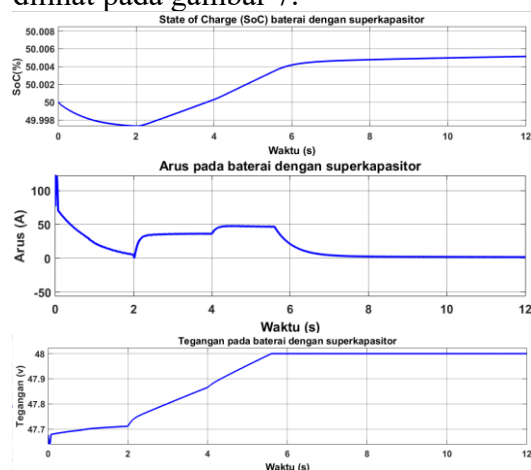
kembali turun dan menuju stabil seperti keluaran arus. Pengontrol *MPPT* terus bekerja untuk menjaga keadaan baterai tetap penuh dan mengatur daya keluaran panel surya agar sesuai dengan kebutuhan beban daya yang terhubung ke sistem.

HASIL SIMULASI DENGAN SUPERKAPSITOR

Sistem yang telah dibuat selanjutnya ditambahkan komponen superkapsitor, setelah sebelumnya dilakukan simulasi tanpa komponen superkapsitor. Penambahan superkapsitor ini dilakukan untuk melihat pengaruhnya terhadap sistem *PLTS off grid* skala kecil. Besarnya kapasitansi superkapsitor yang ditambahkan ke dalam sistem pomodelan adalah divariasikan

PENAMBAHAN SUPERKAPSITOR DENGAN KAPASITANSI 90 Kf 48 V

Hasil simulasi pemodelan sistem setelah ditambahkan superkapsitor dapat dilihat pada gambar 7.



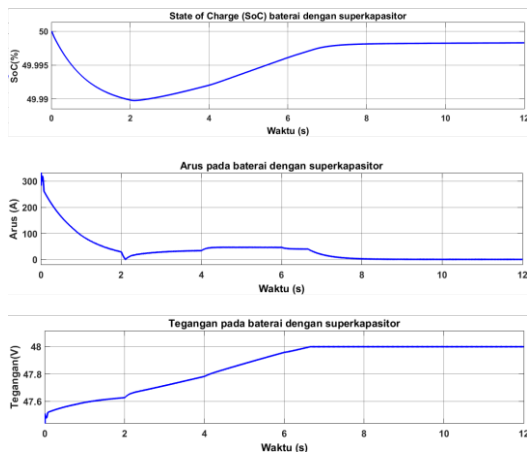
Gambar 7. SoC, Arus, dan Tegangan Baterai dengan superkapsitor

Waktu charging baterai dengan penambahan superkapsitor 90 kF lebih lama dibanding dengan waktu charging sebelum ditambahkan superkapsitor. Sebelum ditambahkan superkapsitor waktu yang dibutuhkan baterai untuk mencapai level maksimalnya yaitu sebesar 4,3 detik atau 4,3 jam dalam waktu real dengan keadaan awal baterai pada 50 %, setelah ditambahkan superkapsitor waktu yang dibutuhkan baterai untuk mencapai level maksimalnya menjadi lebih lama yakni 5,6 detik Artinya dengan penambahan superkapsitor dengan kapasitas ini

membuat waktu charging lebih lama, hal ini disebabkan oleh daya yang dihasilkan oleh panel surya disimpan ke superkapasitor terlebih dahulu hingga superkapasitor dalam keadaan penuh. Perbedaan hasil simulasi penambahan superkapasitor dengan sebelum ditambahkan superkapasitor juga dapat dilihat pada nilai arus, dimana dengan penambahan superkapasitor 90 kF arus menjadi lebih tinggi nilainya di 2 detik pertama atau 2 jam pertama dalam real time yakni berada pada nilai 100-10 A.

PENAMBAHAN SUPERKAPASITOR DENGAN KAPASITANSI 73,6 kF 46 V

Kapasitansi ini sama dengan 75 % dari total energi baterai. Tegangan superkapasitor yang digunakan pada simulasi ini adalah 46 Volt. Adapun hasil simulasi dengan variasi ini dapat dilihat pada gambar 8.



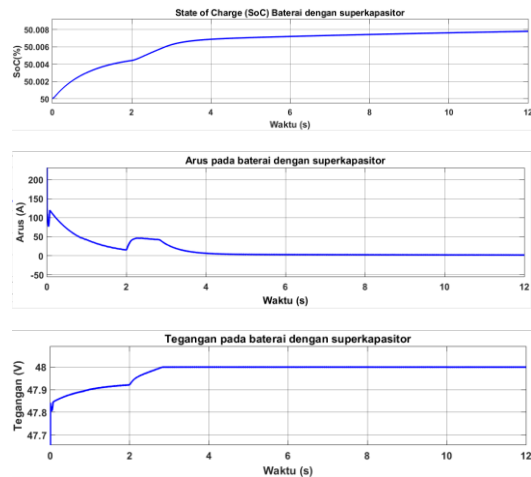
Gambar 8. SoC, Arus, dan Tegangan Baterai dengan superkapasitor

hasil simulasi Soc baterai mengalami penurunan selama 2 detik yang kemudian kembali naik. Pengisian baterai menjadi lebih lama jika ditambahkan superkapsitor dengan kapasitas penyimpanan energinya hanya 75 % dari energi total baterai yaitu menjadi 6,8 detik, dimana dengan penambahan superkapsitor dengan kapasitansi 73,6 kF, 46 Volt ini membuat waktu charging lebih lambat 2,8 detik atau 2 jam 40 menit dalam real time. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan kapasitas dan tegangan kerja antara baterai dan superkapasitor, karena tegangan kerja superkapsitor lebih rendah daripada baterai, superkapsitor tidak akan menerima tegangan penuh dari baterai. dengan penambahan superkapasitor ini mempengaruhi nilai arus di 2 detik pertama,

dimana nilai arusnya mencapai 300-30 A. hal ini dikarenakan sueprkapasitor menyediakan arus yang besar pada awal pengisian atau pada saat dibutuhkan.

PENAMBAHAN SUPERKAPASITOR DENGAN KAPASITANSI 51,1 kF 50 V

variasi penambahan superkapsitor menggunakan kapasitansi 51.5 kF, 50 Volt. Kapasitansi superkapsitor yang digunakan ini adalah setara dengan 50 % dari total energi yang tersimpan pada baterai. Hasil simulai dengan variasi ini dapat dilihat pada gambar 9.



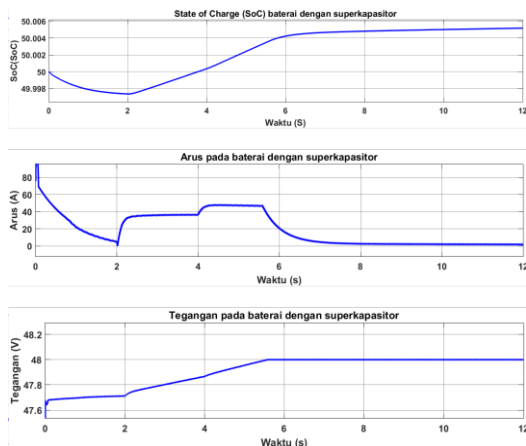
Gambar 9. SoC, Arus, dan Tegangan Baterai dengan superkapasitor

Hasil simulasi dengan variasi penambahan superkapsitor dengan kapsitansi 51,5 kF, 50 Volt menunjukkan hasil yang signifikn yakni dengan mempercepat waktu pengisian baterai. Berdasarkan hasil simulasi dengan variasi sebelumnya waktu charging baterai untuk mencapai tegangan maksimalnya atau untuk terisi penuh, membutuhkan waktu lebih dari 4 detik waktu simulasi atau 4 jam dalam real time. Dengan penambahan superkapasitor 51,5 kF, waktu yang dibutuhkan baterai untuk mencapai tegangan maksimalnya atau baterai terisi penuh, membutuhkan waktu 3 detik waktu simulasi atau 3 jam dalam waktu nyata. Artinya dengan penambahan superkapasitor ini membuat waktu pengisian baterai menjadi lebih hemat, yakni menghemat waktu hingga 1 jam 30 menit dengan penambahan kapasitas 51,5 kF , 50V. Selain waktu *charging* yang menjadi lebih cepat, nilai arus pada baterai dengan penambahan superkapasitor 51.500 F ini menjadi lebih tinggi di dua jam pertama, yakni berada

pada nilai 100-10A, berbeda dengan sebelum ditambahkan superkapasitor, nilai arus di dua jam pertama sangat kecil yakni berkisar 1-13A. Nilai SoC yang meningkat mengikuti nilai dari tegangan, nilainya yang semakin meningkat berarti sistem sedang melakukan *charging* ke baterai, ketika baterai sudah mencapai tegangan maksimalnya, nilai SoC juga akan berhenti meningkat dan akan menjadi konstan yang menandakan bahwa baterai sudah terisi penuh.

PENAMBAHAN SUPERKAPASITOR DENGAN KAPASITANSI 500 F 48 V

Pemilihan variasi ini untuk simulasi ini berdasarkan ketersediaan superkapasitor di pasaran. Perlunya melihat pengaruh penambahan superkapasitor dengan kapasitas kapasitor yang banyak dijumpai dipasaran, yakni 500 farad dengan tegangan 48. Adapun hasil simulasi dari variasi ini dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. SoC, Arus, dan Tegangan Baterai dengan superkapasitor

Penambahan superkapasitor dengan kapasitas ini mempengaruhi dari segi waktu charging baterai, yaitu membuat waktu charging baterai 0,30 detik lebih lama, atau 30 menit lebih lama dalam real time. Kapasitansi superkapasitor ini dibanding dengan kapasitas 73.6 kF dari variasi sebelumnya, kapasitas 500 Farad ini lebih cepat waktu chargingnya yakni 0,20 detik lebih cepat atau 20

menit dalam real time. Nilai arus di 2 detik pertama memiliki nilai yang sama di setiap variasi yang diberikan pada simulasi ini. Nilai SoC mengikuti nilai tegangan, ketika nilai tegangan sudah mencapai tegangan maksimalnya yakni 48 volt, maka nilainya akan menjadi konstan, begitu juga dengan nilai SoC. Saat baterai mencapai kondisi penuh atau terisi penuh, pengontrol pengisian baterai akan mengatur daya masuk ke baterai secara bertahap untuk menjaga baterai tetap terisi penuh dan menghindari overcharging.

PERBANDINGAN ARUS DAN TEGANGAN TANPA DAN DENGAN SUPERKAPASITOR

Setelah dilakukan simulasi tanpa superkapasitor dan dengan superkapasitor yang divariasikan kapasitasnya, maka dapat diketahui perbandingannya atau perbedaannya berdasarkan hasil simulasi. Perbedaan arus dan tegangan pada baterai ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Arus dan Tegangan Charging pada baterai

Waktu (s)	Tanpa Superkapasitor		Dengan Superkapasitor							
			90 kF 48 V		73,6 kF 46 V		51,5 kF 50 V		500 F 48 V	
	Tegangan (V)	Arus (A)	Tegangan (V)	Arus (A)	Tegangan (V)	Arus (A)	Tegangan (V)	Arus (A)	Tegangan (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	47,7-47,8	5-48	47,6-47,7	20-35	47,9-48	42-6	47,7-47,8	1,3-37
4-6	47,9-48	42-6,6	47,8-48	48-23	47,7-47,9	35-58	48	6-3	47,8-48	37-21
6-8	48	6,6-3,4	48	23-2	47,9-48	46-4	48	3	48	21-3,5
8-10	48	3,4	48	2	48	4-2	48	3	48	3
10-12	48	3,4	48	2	48	2	48	3	48	3

Tabel 3 merupakan perbandingan arus dan tegangan dari hasil simulasi dengan dan tanpa superkapasitor. Tabel 4.5 dapat diketahui nilai tegangan pada baterai dengan superkapasitor dan tanpa superkapasitor relatif memiliki nilai yang sama yakni dari 47-48 Volt, perbedaannya terletak pada waktu untuk mencapai tegangan 48 Volt, karena 48 Volt adalah tegangan maksimal pada baterai. Penambahan superkapasitor dengan variasi 51.5 kF, 48 Volt membuat baterai mencapai tegangan maksimalnya lebih cepat. Terjadinya hal tersebut dikarenakan tegangan pada superkapasitor dengan variasi 51,5 kF memiliki nilai tegangan kerja yang lebih tinggi, sehingga daya pada superkapasitor menjadi lebih besar, yang

kemudian daya yang besar tersebut mampu menambah aliran daya ke baterai sehingga baterai lebih cepat mencapai tegangan maksimalnya. Penambahan superkapasitor dengan variasi 51.500 Farad ini mampu menghemat waktu charging 1 jam 30 menit lebih cepat dengan tanpa superkapasitor. Dengan variasi 73,6 kF, 46 Volt terlihat pada Tabel 4.5 nilai tegangan pada detik 0-2 dimulai dari 47,4 dan mencapai tegangan 48 Volt pada detik 8. Variasi 73,6 kF, 46Volt ini membuat waktu *charging* lebih lama 2,4 detik dibanding dengan tanpa superkapasitor atau dengan variasi superkapasitor yang lain. hal ini dikarenakan tegangan kerja dari superkapasitor dengan variasi 73,6 kF ini lebih kecil dari tegangan kerja baterai yakni 46 Volt. Variasi 90 kF dan 500 Farad memiliki nilai tegangan kerja yang sama yakni 48 Volt, dengan variasi ini memperlambat 30 menit proses charging dibanding tanpa superkapasitor. Variasi tegangan superkapasitor mempengaruhi waktu charging dari baterai, tegangan superkapasitor yang lebih besar memperbaiki waktu charging menjadi lebih singkat yakni 1 jam 30 menit sedangkan dengan tegangan yang lebih kecil dari tegangan kerja baterai membuat waktu charging lebih lama. Arus pada baterai dengan superkapasitor yang bervariasi, memiliki arus yang lebih besar dari pada arus tanpa superkapasitor, hal ini dikarenakan superkapasitor mampu mendukung arus pengisian dan pengosongan dengan tingkat daya yang lebih tinggi. Penggunaan superkapasitor dalam sistem ini membantu mengoptimalkan arus pengisian dan mengurangi beban pada baterai, yang pada akhirnya dapat meningkatkan umur pakai baterai dan menghindari masalah seperti *overcharging*.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian sistem dan analisis hasil penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil simulasi, pengaruh penambahan superkapasitor pada sistem *PLTS off grid* skala kecil mempengaruhi nilai arus pada baterai dengan penambahan superkapasitor 90 ; 73,6 dan 51,5 kF serta 500 Farad. Masing-masing kapasitas tersebut

menghasilkan nilai arus dan tegangan sebesar, 100-5 A 47 volt, 320-20 A 47 volt, 120-42 A 48 volt dan 120-1,3 A 48 volt. Penambahan superkapasitor mampu menyerap dan melepaskan arus yang besar dalam waktu yang relatif singkat. Dengan meningkatnya daya serap arus oleh baterai berarti menambah jumlah daya simpan sistem *PLTS off grid*. Nilai tegangan pada baterai dengan dan tanpa superkapasitor memiliki nilai yang relatif sama yakni dari 47-48 V. Namun perbedaannya terletak pada waktu untuk mencapai tegangan 48 Volt yang berbeda.

2. Perbandingan arus dan tegangan hasil simulasi sistem *PLTS off grid* dengan superkapasitor dan tanpa superkapasitor menunjukkan hasil yaitu:
 - a. Nilai arus dan tegangan pada baterai, menunjukkan baterai dengan superkapasitor menyerap daya yang dihasilkan oleh panel surya menjadi lebih besar, sehingga daya yang disimpan menjadi lebih banyak. penyimpanan energi yang bertambah dengan adanya superkapasitor
 - b. Waktu charging menjadi lebih cepat. Adanya penambahan superkapasitor yang divariasikan kapasitansinya menunjukkan dampak pada waktu charging baterai. Variasi 51,5 kF, 50 Volt mempengaruhi waktu charging menjadi 1 jam 30 menit lebih cepat dari sistem *PLTS off grid* tanpa superkapasitor. Tegangan kerja yang lebih besar menghasilkan daya lebih besar sehingga mempercepat waktu charging baterai. Variasi 73,6 kF 46 Volt justru membuat proses charging baterai menjadi 2 jam 40 menit lebih lama dibanding dengan tanpa superkapasitor, dan lebih lama dari variasi superkapasitor yang lain. kemudian variasi 90 kF dan 500 F memiliki pengaruh pada *charging* baterai yakni memperlambat 30 menit dengan yang tanpa superkapasitor. Daya yang dihasilkan oleh panel surya terlebih dahulu digunakan untuk superkapasitor.

SARAN

Dalam pengerjaan dan penyelesaian tugas akhir ini tentu tidak lepas dari kekurangan dan kelemahan baik dari pada sistem maupun pemodelan yang telah dibuat. Untuk memperbaiki kekurangan tersebut, maka peneliti memberikan saran yang perlu dilakukan sebagai berikut:

1. Peneliti selanjutnya melakukan simulasi dengan penambahan superkapsitor pada pemodelan *PLTS off grid* dengan skala yang lebih besar, dan pemodelan *PLTS on grid* dengan mempertimbangkan efisiensi biaya, serta menggunakan software yang berbeda.
2. Penerapan superkapsitor secara langsung pada sistem *PLTS off grid* maupun *on grid* dan tidak lagi menggunakan simulasi software.

DAFTAR PUSTAKA

- Akram, U., Khalid, M., & Shafiq, S. (2017). An innovative hybrid wind-solar and battery-supercapacitor microgrid sistem—development and optimization. *IEEE Access*, 5, 25897–25912. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2767618>
- 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.
- Basri, I.Y., Irfan, D., (2018). *KOMPONEN ELEKTRONIKA*. Padang: SUKABINA Press.
- Hassan, Q., Jaszczur, M., Abdulateef, A. M., Abdulateef, J., Hasan, A., & Mohamad, A. (2022). An analysis of photovoltaic/supercapacitor energy system for improving self-consumption and self-sufficiency. *Energy Reports*, 8, 680–695.
- Icasolar.com. (2020). Solar Energy For Everybody. Icasolar.com. <https://m.icasolar.com/support/blog/pwm>
- IEEE Standards Coordinating Committee 21, on F. C., Institute of Electrical and Electronics Engineers., & IEEE-SA Standards Board. (2000). IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) systems. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.
- Isnaini, M., & Silfia D, M. (2021). PEMANFAATAN MATLAB SIMULINK SEBAGAI MEDIA PEMBELAJARAN PRAKTIKUM SECARA DARING. *Jurnal TIK Dalam Pendidikan*.
- Jaszczur, M., & Hassan, Q. (2020). An optimisation and sizing of photovoltaic system with supercapACitor for improving self-consumption. *Applied Energy*, 279. <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.
- Naim, M. (2017). RANCANGAN SISTEM KELISTRIKAN PLTS OFF GRID 1000 WATT DI DESA MAHALONA KECAMATAN TOWUTI.
- Newsgroup, compsoft-sysmatlab. (1984). Anonymous FTP server Product enhancement suggestions Subscribing user registration Sales, pricing, and general information. <http://www.mathworks.comWeb>
- Newsgroup, compsoft-sysmatlab. (1996). Anonymous FTP server Product enhancement suggestions Subscribing user registration Sales, pricing, and general information Getting Started with MATLAB. <http://www.mathworks.comWeb>
- Santhiarsa, I,G, N., Kusuma, I,G,W., (2005). KAJIAN ENERGI SURYA UNTUK PEMBANGKIT TENAGALISTRIK (Vol. 4, Issue 1).
- Nurhasmia., Subagiada, K., & Inu N, A. (2021). STUDI PENGGUNAAN SUPERKAPASITOR SEBAGAI MEDIA PENYIMPAN ENERGI. *Progressive Physics Journal* (Vol. 2, Issue 2).

- Parapa, H. B. P. (2022). Studi Skema Konfigurasi PLTS (Studi Kasus: Pulau Kaledupa, Sulawesi Tenggara). *Jurnal Teknologi Elektroika*, 19(2), 71.
- Putri, R., & Meliala, S. (2020). Penerapan Instalasi Panel Surya Off Grid Menuju Energi Mandiri Di Yayasan Pendidikan Islam Dayah Miftahul Jannah. In *Journal of Electrical Technology* (Vol. 5, Issue 3).
- Sianipar, R. (2014.). DASAR PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA. *JETri* (Vol.11), 61–78.
- Safitri, N., Rihayat, T., Riskina, S., (2019). TEKNOLOGI PHOTOVOLTAIC. Banda Aceh: Yayasan Puga Aceh Riset.
- Santosa, 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 Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST)*.35-45
- Tan, R. H. G., Er, C. K., & Solanki, S. G. (2020). Modeling of Photovoltaic MPPT Lead ACid Battery Charge Controller for Standalone Sistem Applications. *E3S Web of Conferences*, 182.
- <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018203005>
- Yoga, T., dan Kamil, I., (2022). IMPLEMENTASI PENGGUNAAN SUPER KAPASITOR PADA SISTEM PLTS OFF-GRID SEBAGAI PENSTABIL BATERAI. *ELECTRICES VOL* (Vol. 4).
- Widayana, G. (2012). Pemanfaatan Energi Surya. *JPTK*, 37-46.
- Wicaksono M.T.C., Bangsa. I.A., (2022). INSTALASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) PHOTOVOLTAIC ROOFTOP PADA GEDUNG GARDU INDUK KANTOR PUSAT PT PEMBANGKITJAWA BALI. *Aisyah Journal of Informatics and Electrical Engineering*, 107-115.
- Winarno, I., Marauli. (2018). IMPLEMENTASI MAXIMUM POWER POINT TRACKER (MPPT) UNTUK OPTIMASI DAYA PADA PANEL SURYA BERBASIS ALGORITMA INCREMENTAL CONDUCTANCE. *Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Multimedia*, 10-49.