

Peningkatan Umur Baterai pada PLTS *Off-grid* menggunakan Penyimpanan Energi Hibrida Berbasis Superkapasitor-Baterai

Boy Ihsan¹, Dwi Sahidin², Tri Desmana Rachmildha³, Deny Hamdani⁴

¹Program Studi Teknik Elektro S1 – Universitas Riau
Simang Baru, Kec. Tampan, Kota Pekanbaru, Riau 28293
¹boy.ihsan@lecturer.unri.ac.id

²Program Studi Teknik Listrik – Politeknik Negeri Cilacap
Jl. Dr. Soetomo No.1, Sidakaya, Kab. Cilacap, Jawa Tengah 53212
²dwisahidin@pnc.ac.id

^{3,4}Sekolah Teknik Elektro dan Informatika – Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Kec. Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132
³trides@konversi.ee.itb.ac.id

⁴denyhamdani@itb.ac.id

Abstrak— Perubahan iklim akibat pemanasan global menuntut penggunaan teknologi pembangkit listrik yang ramah lingkungan. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu pembangkit yang ramah lingkungan. Namun, pembangkit ini bersifat intermiten sehingga jika dioperasikan secara *off-grid* akan memerlukan perangkat penyimpanan energi. Paper ini merancang suatu sistem PV *off-grid* pada daerah 3T (tertinggal, terdepan, dan terluar) di Indonesia dengan menggunakan sistem penyimpanan energi hibrida, yaitu baterai dan superkapasitor. Fluktuasi energi jangka pendek diutamakan ditangani oleh superkapasitor, sedangkan energi jangka panjang yang lebih stabil disuplai oleh baterai. Pendekatan ini bertujuan mengurangi stres dan siklus *charge-discharge* baterai, sehingga memperlambat degradasi baterai. Performa dari sistem ini diuji dengan melakukan pemodelan dan simulasi aliran energi pada MATLAB. Berdasarkan hasil simulasi, dilakukan prediksi umur baterai dengan menggunakan algoritma *rain flow counting* dan perhitungan *Levelized Cost of Energy (LCOE)* dari sistem pembangkit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan superkapasitor pada sistem penyimpanan energi dapat menstabilkan transien daya dan mengurangi siklus *charge-discharge* baterai, sehingga memperpanjang umur baterai. Selain itu, LCOE pada sistem dengan superkapasitor lebih rendah daripada sistem tanpa superkapasitor.

Kata kunci: sistem PV *off-grid*, penyimpanan energi hibrida, baterai, superkapasitor, umur baterai

Abstract— Climate change caused by global warming demands the use of environmentally friendly power generation technologies. Solar Power Plants (Solar PV) represent one such solution. However, solar generation is intermittent, and *off-grid* operation requires energy storage systems. This paper designs an *off-grid* PV system for 3T regions (remote, frontier, and outermost areas) in Indonesia using a hybrid energy storage system consisting of

batteries and supercapacitors. Short-term energy fluctuations are primarily managed by supercapacitors, while long-term, stable energy supply is handled by batteries. This approach aims to reduce stress and charge-discharge cycles on batteries, thereby slowing battery degradation. The performance of this system is evaluated through energy flow modeling and simulation using MATLAB. Based on the simulation results, battery lifespan predictions are conducted utilizing the rain flow counting algorithm, and the Levelized Cost of Energy (LCOE) is calculated for the system. The results show that integrating supercapacitors into the energy storage system stabilizes power transients and reduces battery charge-discharge cycles, thereby extending battery lifespan. Furthermore, the LCOE of the system with supercapacitors is lower than that of a system without them.

Keywords: *off-grid* PV system, hybrid energy storage system, battery, supercapacitor, battery lifetime

*boy.ihsan@lecturer.unri.ac.id

I. PENDAHULUAN

Dewasa kini, integrasi PLTS dengan *energy storage* menjadi sebuah keniscayaan, terutama untuk daerah 3T di Indonesia. Beberapa penelitian yang mengintegrasikan superkapasitor dan baterai sebagai *energy storage* telah dilakukan sebelumnya. Penelitian [1] Menyajikan suatu algoritma pengontrolan daya pada sistem PV *off-grid* dengan sistem penyimpanan energi hibrida baterai dan superkapasitor pada sistem microgrid DC. Sistem kontrol yang diajukan mengatur superkapasitor untuk menyuplai dan menyerap transien daya. Simulasi pada Simulink menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga keseimbangan energi meskipun terjadi perubahan daya mendadak.

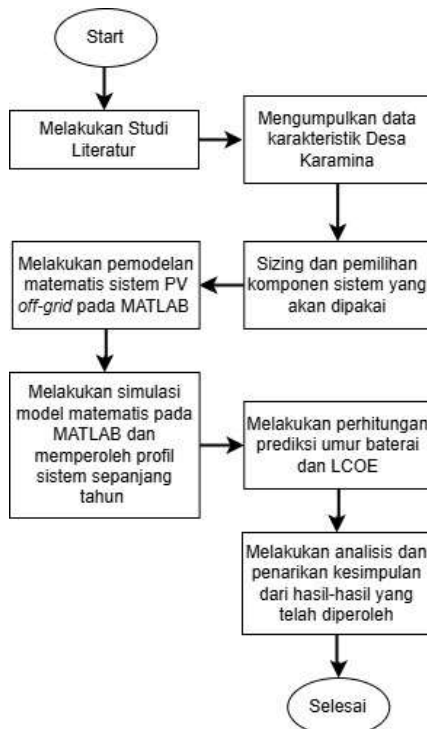
Penelitian [2] melihat pengaruh penambahan superkapasitor pada kesehatan baterai. Simulasi menggunakan Simulink dilakukan untuk topologi sistem *energy storage* baterai saja, baterai dengan superkapasitor pasif (terhubung secara paralel di terminal baterai), baterai dengan superkapasitor aktif (menggunakan *bidirectional converter*) dan multilevel *energy storage* (dua baterai dan superkapasitor aktif). Simulasi dilakukan dengan menggunakan data radiasi dan suhu selama satu hari. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan superkapasitor dapat menghasilkan arus baterai yang lebih halus dan mengurangi baterai *healt cost*, sehingga memperpanjang umur baterai.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa superkapasitor pada *energy storage* dapat memperhalus arus baterai dan memperpanjang umurnya. Sehingga, penelitian ini merancang sistem PV *off-grid* dengan penyimpanan energi hibrida untuk Desa Karamina, salah satu desa tanpa listrik di Indonesia. Analisis meliputi prediksi umur baterai, perhitungan LCOE, serta variasi jumlah superkapasitor untuk menentukan konfigurasi optimal.

II. METODE

A. Metode Penelitian

Langkah-langkah yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 1.



Gambar 1. Langkah – langkah penelitian

B. Obyek Penelitian

Pada penelitian ini, Desa Karamina digunakan sebagai objek penelitian untuk acuan dalam perancangan sistem PV *off-grid*. Desa Karamina adalah salah satu desa di Kabupaten Yalimo yang terletak di Distrik Benawa yang belum memiliki suplai listrik baik dari PLN maupun Mandiri pada saat penelitian ini dilakukan. Desa Karamina yang terletak pada koordinat $3^{\circ}44'33.8''S$ dan $139^{\circ}42'00.6''E$, seperti pada Gambar 2, memiliki populasi penduduk sebanyak 100 jiwa dengan jumlah kepala keluarga sebanyak 50. Desa Karamina memiliki luas wilayah sebesar 36,4749 km² dengan jumlah bangunan sebanyak 28 bangunan [3].



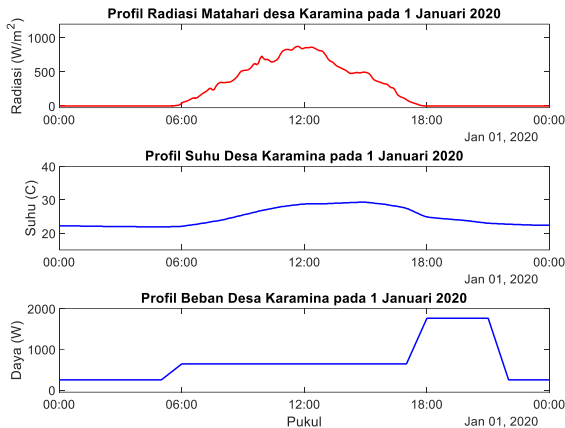
Gambar 2. Letak geografis Desa Karamina pada Google Maps ($3^{\circ}44'33.8''S$ $139^{\circ}42'00.6''E$)



Gambar 3. Profil radiasi matahari, suhu dan beban Desa Karamina sepanjang tahun 2020

Data radiasi dan suhu yang digunakan adalah data pada Desa Karamina dari 1 Januari hingga 31 Desember 2020 [4]. Pemodelan beban menggunakan model rumah tangga untuk 28 bangunan dengan konsumsi energi harian per rumah 600 Wh sesuai kriteria Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan

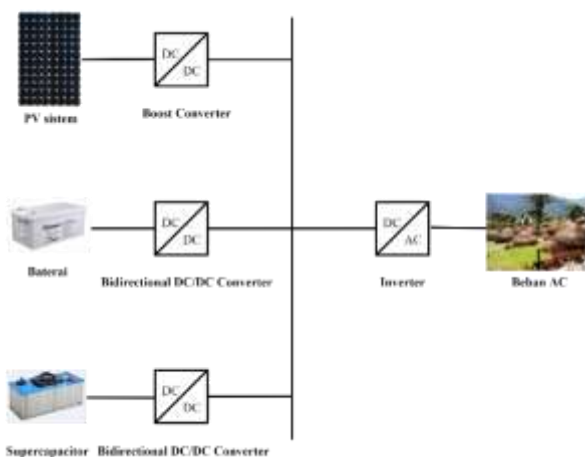
Konservasi Energi (EBTKE) [5], menghasilkan total beban harian 16,8 kWh. Pola konsumsi mengacu pada kurva beban tipikal di daerah pedesaan [6] dengan asumsi pola beban harian sama sepanjang tahun. Data beban, radiasi, dan suhu untuk simulasi satu tahun penuh ditunjukkan pada Gambar 3, sementara contoh profil harian pada 1 Januari 2020 ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Profil radiasi matahari, suhu dan beban desa Karamina pada tanggal 1 Januari 2020

C. Sistem PV off-grid dengan Sistem Penyimpanan Energi Hibrida (Baterai dan Superkapasitor)

Penelitian ini bertujuan untuk merancang suatu sistem penyimpanan energi hibrida yang terdiri dari baterai dan superkapasitor sebagai bantuan untuk PV off-grid agar dapat menyediakan daya yang dibutuhkan beban dengan baik, seperti terlihat pada Gambar 5. Sistem ini dilengkapi dengan dua *bidirectional* DC-DC converter (BDC) untuk mengatur pengisian dan pelepasan daya pada baterai dan superkapasitor.



Gambar 5. Diagram rangkaian sistem PV off-grid yang digunakan dalam penelitian

D. Sizing Peralatan pada Sistem PV Off-grid

Spesifikasi Peralatan pada Sistem PV Off-grid yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Peralatan pada Sistem PV Off-grid

Parameter	Nilai	Satuan
PV MODUL		
Rating daya	360	W
Tegangan pada titik daya maksimum	37,7	V
Arus pada titik daya maksimum	9,55	A
Efisiensi panel	20,6	%
Power conditioning efficiency PV	90	%
Efisiensi modul PV	20,6	%
Koefisien suhu pada daya yang dibangkitkan PV	-0,26	%
Suhu nominal sel PV	44	°C
KONVERTER		
Rating daya AC	8000	W
Tegangan baterai	48	V
Efisiensi DC-DC konverter	98	%
Efisiensi inverter	88	%
BATERAI		
Tegangan nominal	12	V
Kapasitas	200	Ah
Coulombic efficiency baterai lead-acid	85	%
SUPERKAPASITOR		
Tegangan kerja	48	V
Kapasitansi	165	F
Energi tersimpan	53	Wh
Arus maksimum	1900	A

1) Sizing PV

Untuk memenuhi kebutuhan energi beban dan tegangan yang sesuai, modul surya dihubungkan secara seri atau paralel. Jumlah modul paralel dihitung menggunakan metode *sun hours* sesuai berdasarkan standar IEEE Std 1562TM-2021 pada persamaan (1).

$$N_p = \frac{L_{DA} \times A:L}{(1 - \sigma_L) \times I_{mpp} \times Sh} \quad (1)$$

L_{DA} adalah beban harian rata-rata dalam *ampere hours* (Ah). $A:L$ adalah nilai *array to load ratio*. σ_L adalah total rugi-rugi pada sistem. I_{mpp} adalah arus keluaran modul surya pada saat daya keluaran maksimum. Sh adalah nilai *peak sun hours*.

Pada penelitian ini jumlah modul surya yang terhubung seri ditetapkan sebanyak 2 modul, nilai $A:L$ sebesar 1,1 dan total rugi-rugi pada sistem sebesar 27% yang terdiri dari rugi-rugi inverter sebesar 12% dan rugi-rugi akibat modul *mismatch* dan debu pada PV sebesar 15% [7]. Nilai Sh menggunakan data radiasi matahari terendah pada bulan Februari di Desa

Karamina yang setara dengan 3.525 jam. Dengan menggunakan persamaan (1) jumlah total modul yang dibutuhkan untuk sistem PLTS di desa Karamina adalah 20 Modul dengan kapasitas total sebesar 7,2 kWp.

2) Sizing Konverter

Pemilihan kapasitas konverter dilakukan dengan mempertimbangkan daya puncak pembangkitan PV. Oleh karena itu, dipilih konverter berkapasitas 8 kW, yang memiliki kapasitas lebih dari daya maksimum PV Array 7,2 kW.

3) Sizing Baterai

Kapasitas baterai dihitung menggunakan persamaan (2) dan (3). Dengan konsumsi energi harian Desa Karamina, *days of autonomy* selama 3 hari, dan *depth of discharge* (DOD) sebesar 75%, total kapasitas baterai sistem PV *Off-grid* adalah sebesar 1400 Ah atau 62,7 kWh.

$$I_{Beban (baterai)} = \frac{\text{Beban harian (kWh)}}{\text{Tegangan DC sisi baterai (V)}} \quad (2)$$

$$E_{Bat} = \frac{I_{Beban (baterai)}}{DOD} \times \text{Days of Autonomy} \quad (3)$$

E. Pemodelan Matematis Sistem PV Off-grid dengan Sistem Hybrid Energy storage

Pemodelan matematis atau aliran daya kondisi *steady-state* sistem PV *off-grid* dengan sistem penyimpanan energi hibrida dilakukan dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut. Daya yang dibangkitkan PV berdasarkan nilai radiasi matahari dan suhu lingkungan dihitung menggunakan persamaan berikut [8].

$$P_{pv} = \eta_G A I_r \quad (4)$$

$$\eta_G = \eta_r \eta_{pv} (1 - \alpha(T_c - T_N)) \quad (5)$$

$$T_c = 30 + 0,0175 (300 - I_r) + 1,14(T_a - 25) \quad (6)$$

P_{pv} adalah Daya yang dibangkitkan PV (W). η_G adalah Efisiensi total pembangkitan PV. η_r adalah Efisiensi modul PV η_{pv} adalah Power conditioning efficiency β adalah Koefisien pengaruh suhu terhadap daya yang dibangkitkan PV T_c adalah Suhu sel PV (°C) T_a adalah Suhu lingkungan PV (°C) I_r adalah Radiasi matahari (W/m²).

Daya yang mengalir ke *energy storage* dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$P_{HESS} = \eta_{cdc} P_{pv} - \frac{P_L}{\eta_{inv}} \quad (7)$$

P_{HESS} adalah daya yang mengalir dari dan ke *energy storage* (baterai dan superkapasitor (W)), P_L adalah daya beban (W),

η_{cdc} adalah efisiensi konverter DC-DC (%), η_{inv} adalah efisiensi *inverter* (%).

Daya baterai adalah nilai rata-rata dari daya *energy storage* dalam rentang waktu tertentu (*moving average filter*). Sedangkan daya superkapasitor adalah selisih daya yang harusnya diterima atau keluar dari *energy storage* dengan daya baterai.

$$P_{FILTER} = \frac{\sum_{t-Ts}^{Ts} P_{HESS}}{N} \quad (8)$$

$$P_B = (P_{FILTER}) \eta_b \quad (9)$$

$$P_{SC} = P_{HESS} - P_B \quad (10)$$

P_B adalah daya yang mengalir dari atau ke baterai (W). P_{HESS} adalah selisih daya yang dibangkitkan PV dengan daya yang dikonsumsi beban (W). P_{FILTER} adalah Daya HESS setelah dirata-ratakan (W). N adalah jumlah data. P_{SC} adalah daya yang mengalir dari dan ke superkapasitor (W). η_b adalah *coulombic efficiency* baterai (%). T_s adalah waktu *Filter*.

Sehingga *state of charge* (SOC) baterai dan superkapasitor dapat dihitung sebagai berikut.

$$SOC_b(t) = SOC_b(t-1) + \int_0^t \frac{P_B}{V_B C_B} dt \quad (11)$$

$$SOC_{SC}(t) = SOC_{SC}(t-1) + \int_0^t \frac{P_{SC}}{0,5 C_{SC} V_{SC}^2} dt \quad (12)$$

$SOC_b(t)$ adalah SOC baterai pada waktu ke t. $SOC_{SC}(t)$ adalah SOC superkapasitor pada waktu ke t. C_B adalah kapasitas baterai (Ah). V_B adalah tegangan baterai (V). C_{SC} adalah kapasitansi superkapasitor (F). V_{SC} adalah tegangan superkapasitor (V).

F. Algoritma Manajemen Daya

Sistem PV *Off-grid* ini dilengkapi dengan algoritma pengontrolan yang mengelola daya beban, SOC baterai, dan SOC superkapasitor untuk mengoptimalkan aliran daya, memaksimalkan efisiensi pembangkitan PV, dan memperpanjang umur baterai. Baterai dan superkapasitor diatur beroperasi pada rentang SOC tertentu. Saat superkapasitor aktif, baterai hanya menyuplai daya rata-rata yang diatur oleh *moving average filter* pada kendali BDC, sementara sisanya ditangani oleh superkapasitor. Jika SOC superkapasitor mencapai batas, baterai akan beroperasi normal, menyuplai atau menyerap seluruh selisih daya antara pembangkitan PV dan konsumsi beban

G. Perhitungan Prediksi Umur Baterai

Perubahan daya yang dibangkitkan oleh PV dan daya yang dikonsumsi oleh beban dari hari ke hari menyebabkan DOD baterai selalu berubah-ubah tiap harinya. DOD baterai saat melakukan proses *charge-discharge* tersebut berpengaruh

terhadap umur baterai. Oleh sebab itu, pada penelitian ini dilakukan perhitungan prediksi umur baterai yang mengacu pada nilai DOD baterai saat melakukan proses *charge-discharge*. Adapun langkah-langkah untuk memprediksi umur baterai yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Langkah 1: Menghitung SOC baterai dalam periode tertentu menggunakan simulasi matematis
- Langkah 2: Menghitung jumlah siklus *charge-discharge* baterai pada setiap rentang nilai DOD yang diterapkan dengan menggunakan algoritma *rain flow counting*.
- Langkah 3: Menghitung prediksi umur baterai dengan menggunakan model penuaan yang dipakai.

1) Model Penuaan Baterai

Setelah jumlah siklus dihitung dengan algoritma *rain flow counting*, Jumlah siklus tersebut dibandingkan dengan kurva maksimum siklus baterai terhadap besarnya DOD. Kemudian, penuaan yang dialami oleh baterai sepanjang tahun simulasi dan umur baterai dapat dihitung sesuai dengan persamaan berikut [9].

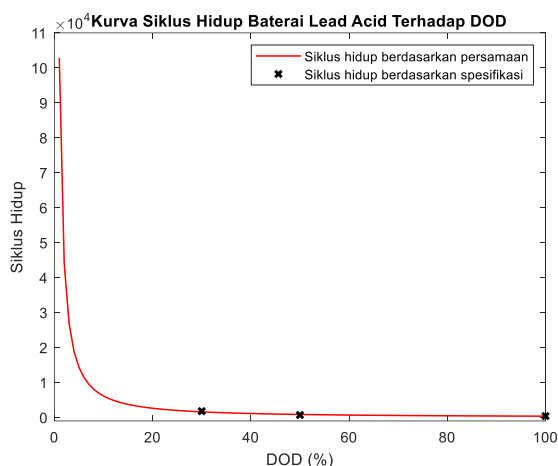
$$Penuaan\ baterai = \sum_{DOD=1}^{100} \frac{N_{cyc}(DOD)}{N_{max}(DOD)} \quad (13)$$

$$Umur\ baterai = \frac{Durasi\ Simulasi}{Penuaan\ baterai} \quad (14)$$

$N_{cyc}(DOD)$ adalah Jumlah siklus *charge-discharge* pada nilai DOD tertentu dan $N_{max}(DOD)$ adalah Jumlah maksimum siklus *charge-discharge* pada nilai DOD tertentu.

2) Siklus Hidup Baterai Lead-Acid

Jumlah siklus hidup baterai lead-acid mengacu pada data spesifikasi baterai Renogy Deep Cycle AGM Battery 12 Volt 200 Ah, seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. kurva siklus hidup terhadap DOD Baterai lead-acid

H. Asumsi dalam perhitungan LCOE

Data yang diperlukan dalam perhitungan LCOE adalah data biaya investasi awal, biaya penggantian peralatan, biaya perawatan (O&M) dan umur masing-masing peralatan yang diperoleh dari beberapa referensi [10] [11]. Sedangkan untuk umur baterai yang dilakukan. Data yang digunakan dalam perhitungan LCOE dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Harga komponen sistem PV *off-grid*

Peralatan	Investasi Awal	Penggantian	O&M
Solar Panel (Rp/kWp)	14.161.835	-	455.456
Konverter (Rp /kW)	8.539.800	4.269.900	42.699
Baterai lead-acid (Rp /kWh)	3,080,093	3,080,093	8.148
Superkapasitor 165 F (Rp /unit)	11.030.575	-	-

Tabel 3. Asumsi dalam perhitungan LCOE

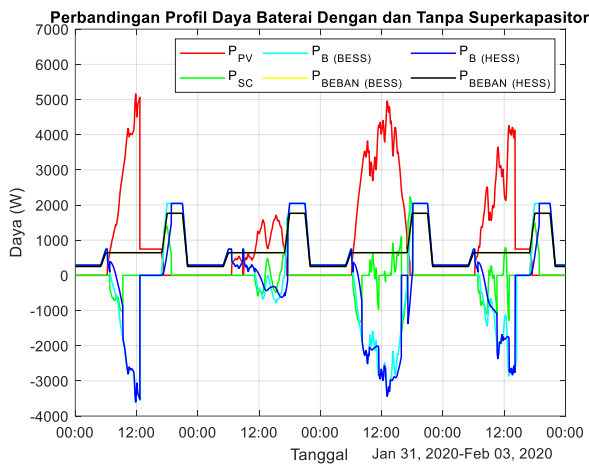
Parameter	Nilai	Satuan
Discount rate	3,5	%
Umur PV	25	Tahun
Umur Konverter	15	Tahun
Umur superkapasitor	25	Tahun
Umur baterai	Y	Tahun
Umur proyek	25	Tahun

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

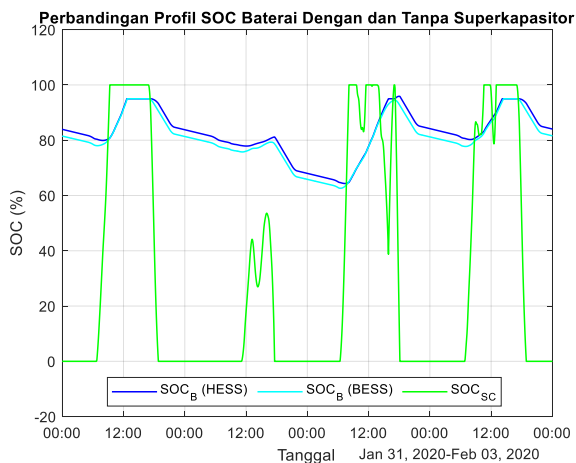
Dalam sub bab ini akan dibahas hasil prediksi umur baterai pada sistem PV *off-grid* desa Karamina dengan dan tanpa superkapasitor. Untuk kondisi sistem dengan superkapasitor, perhitungan umur baterai dilakukan beberapa kali dengan jumlah superkapasitor yang berbeda. Hal tersebut dilakukan untuk melihat bagaimana pengaruh jumlah superkapasitor terhadap penambahan umur baterai, sehingga dapat dipilih kombinasi mana yang cocok untuk sistem PV *off-grid* Desa Karamina.

A. Hasil Simulasi Matematis Sistem PV *Off-grid* Desa Karamina

Simulasi matematis dilakukan dengan menggunakan data radiasi, suhu dan beban Desa Karamina selama satu tahun. Gambar 7 dan 8 adalah perbandingan hasil simulasi sistem PV *off-grid* dengan *hybrid energy storage system* (HESS) (baterai dan 35 superkapasitor) dengan sistem PV *off-grid* tanpa superkapasitor atau *battery energy storage system* (BESS). Waktu filter pada skenario HESS diatur sebesar 7200 detik.



Gambar 7. Profil daya sistem PV dengan dan tanpa superkapasitor dari tanggal 31 Januari hingga 3 Februari



Gambar 8. Profil SOC baterai dengan dan tanpa superkapasitor dari tanggal 31 Januari hingga 3 Februari

Gambar 7 menunjukkan profil daya sistem PV *Off-grid* dari tanggal 31 Januari hingga 3 Februari dengan dan tanpa superkapasitor. Dari gambar tersebut dapat dilihat superkapasitor membantu menyerap daya dari PV dan menyuplai beban, sehingga daya *charge-discharge* baterai lebih *smooth* jika dibandingkan dengan sistem tanpa superkapasitor atau *battery energy storage system* (BESS). Sehingga, pada saat discharge, SOC baterai pada sistem HESS lebih tinggi dibandingkan dengan sistem BESS, seperti terlihat pada Gambar 8.

Dari Gambar 8 dapat dilihat akibat rendahnya radiasi matahari pada tanggal 1 Februari, dengan produksi daya PV dibawah 2000 W, menyebabkan SOC baterai turun hingga 62,63 % pada sistem tanpa superkapasitor sedangkan pada sistem dengan superkapasitor SOC turun hingga 64,34%. Namun, pada tanggal 3 Februari SOC baterai kembali naik

hingga ke batas maksimum, yaitu 95%, yang menyebabkan baterai berhenti mengisi daya. Setelah superkapasitor berhenti mengisi daya karena SOC superkapasitor juga mencapai nilai maksimum, yaitu 100%, sistem kontrol PV berubah menjadi kontrol tegangan dan PV hanya membangkitkan daya sebesar daya yang dikonsumsi beban sehingga baterai dan superkapasitor terlindungi dari *overcharging*.

B. Hasil Perhitungan Prediksi Umur Baterai Sistem PV *Off-grid* dengan dan Tanpa Superkapasitor

Setelah memperoleh nilai SOC baterai selama satu tahun dengan menggunakan simulasi matematis. Maka prediksi umur baterai dilakukan dengan menggunakan algoritma *rain flow counting* dan kurva DOD terhadap siklus hidup baterai. Perhitungan dan simulasi dilakukan beberapa kali dengan memvariasikan jumlah superkapasitor yang terhubung secara paralel dengan waktu filter diatur sebesar 7200 detik dengan kapasitansi masing-masing superkapasitor sebesar 165 F. Untuk menjaga total kapasitas *energy storage* tetap sebesar 67,2 kWh, kapasitansi baterai terpasang dikurangi sebesar kapasitansi superkapasitor yang terpasang. Hal tersebut bertujuan untuk melihat pengaruh konfigurasi *energy storage* terhadap umur baterai lead-acid yang terpasang di sistem PV *off-grid* Desa Karamina. Hasil prediksi umur baterai tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.

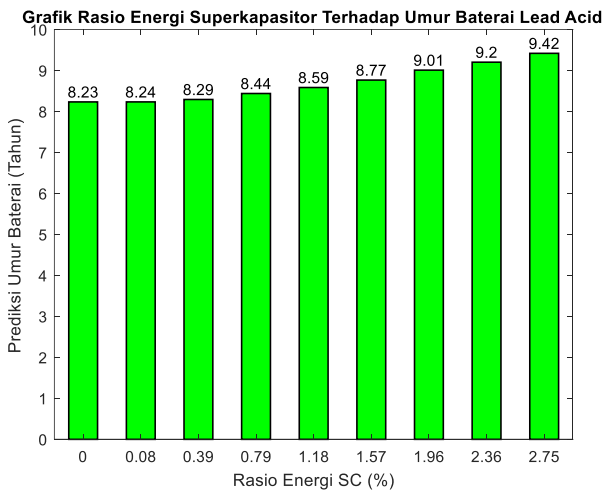
Tabel 4. Hasil perhitungan prediksi umur baterai pada berbagai konfigurasi sistem *energy storage*

Kapasitas baterai lead-acid (kWh)	Konfigurasi Superkapasitor		Prediksi Umur (Tahun)	Penambahan baterai lead-acid (%)
	Jumlah	Kapasitas (kWh)		
67,2	-	0	8,23	-
67,1472	1	0,0528	8,24	0,01%
66,936	5	0,264	8,29	0,72%
66,672	10	0,528	8,44	2,50%
66,408	15	0,792	8,59	4,27%
66,144	20	1,056	8,77	6,48%
65,88	25	1,32	9,01	9,42%
65,616	30	1,584	9,20	11,78%
65,352	35	1,848	9,42	14,40%

Dari hasil perhitungan prediksi umur baterai pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa penggunaan superkapasitor pada sistem PV *off-grid* dapat memperpanjang umur baterai lead-acid. Jumlah superkapasitor yang digunakan berpengaruh terhadap besar penambahan umur baterai. Penambahan umur baterai mulai dari 0,01% dengan jumlah 1 superkapasitor hingga 14,40% dengan jumlah 35 superkapasitor. Dari konfigurasi *energy storage* yang disimulasikan dapat dilihat bahwa, besar

penambahan umur baterai meningkat sehubungan dengan bertambah banyaknya superkapasitor.

Jika dibandingkan kapasitas penyimpanan energi superkapasitor dengan total kapasitas *energy storage* yang terpasang yaitu 67200 Wh, maka dapat dibuat kurva rasio energi superkapasitor terhadap umur baterai lead-acid seperti pada Gambar 9. Gambar tersebut menunjukkan bahwa seiring meningkatnya rasio energi superkapasitor maka umur baterai juga meningkat.



Gambar 9. Grafik rasio energi superkapasitor terhadap prediksi umur baterai lead-acid

C. Perhitungan LCOE Sistem PV Off-grid Desa Karamina dengan dan Tanpa Superkapasitor

Perhitungan LCOE dilakukan bertujuan untuk mengetahui aspek ekonomis dari pemasangan superkapasitor terhadap PV *off-grid*. Perhitungan dilakukan untuk sistem dengan konfigurasi *energy storage* yang berbeda-beda, yaitu konfigurasi baterai lead-acid saja dan konfigurasi kombinasi antara baterai lead-acid dengan superkapasitor. Pada perhitungan, umur baterai diasumsikan sama dengan hasil prediksi umur baterai yang telah dilakukan sebelumnya (Tabel 4).

Hasil perhitungan pada Tabel 5 menunjukkan LCOE sistem PV *off-grid* Desa Karamina dengan konfigurasi *energy storage* menggunakan baterai lead-acid tanpa superkapasitor adalah sebesar Rp. 5.370,87, nilai LCOE tersebut dapat dikurangi dengan memperpanjang umur baterai dengan penambahan superkapasitor pada sistem. Konfigurasi yang paling baik dari segi ekonomi adalah menggunakan 25 superkapasitor 165 F yang terhubung secara paralel dengan biaya produksi energi listrik per kWh atau LCOE yaitu sebesar Rp. 4.824,00.

Tabel 5. Hasil perhitungan LCOE pada berbagai konfigurasi *energy storage*

Jml. SC	Biaya Investasi Awal	Biaya Penggantian Baterai (Present Value)	LCOE
-	Rp. 377.265.882,43	Rp. 1.127.972.885,07	Rp. 5.370,87
1	Rp. 388.133.828,51	Rp. 1.127.086.620,66	Rp. 5.404,10
5	Rp. 431.605.612,80	Rp. 1.123.541.563,02	Rp. 5.537,38
10	Rp. 485.945.343,16	Rp. 1.119.110.240,97	Rp. 5.704,66
15	Rp. 540.285.073,53	Rp. 1.114.678.918,92	Rp. 5.872,78
20	Rp. 594.624.803,90	Rp. 1.110.247.596,87	Rp. 6.041,72
25	Rp. 648.964.534,26	Rp. 664.945.987,53	Rp. 4.824,00
30	Rp. 703.304.264,63	Rp. 662.281.358,80	Rp. 4.997,17
35	Rp. 757.643.995,00	Rp. 659.616.730,07	Rp. 5.171,13

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini merancang sistem PV *off-grid* untuk Desa Karamina, Papua, dengan menggunakan penyimpanan energi hibrida berupa kombinasi superkapasitor dan baterai. Sistem ini terbukti efektif menerapkan superkapasitor untuk mengurangi fluktuasi pada baterai akibat perubahan beban atau radiasi matahari, yang berkontribusi pada pengurangan *Depth of Discharge* (DOD) dan perpanjangan umur baterai hingga 14,40% dengan konfigurasi 35 superkapasitor dan waktu filter 7200 detik. Selain itu, implementasi sistem penyimpanan energi hibrida ini juga berhasil menurunkan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) dari Rp. 5.370,87 menjadi Rp. 4.824,00 dengan penambahan 25 superkapasitor. Hasil ini menunjukkan bahwa teknologi penyimpanan energi hibrida tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga memberikan manfaat ekonomis yang signifikan untuk sistem PV *off-grid* di wilayah tersebut.

REFERENSI

- [1] N. E. Zakzouk and R. A. Lotfi, "Power Flow Control of a Hybrid Battery/Supercapacitor Standalone PV System under Irradiance and Load Variations," in 2020 10th International Conference on Power and Energy Systems, ICPES 2020, 2020, pp. 469–474.
- [2] W. Jing, C. H. Lai, W. S. H. Wong, and M. L. D. Wong, "A comprehensive study of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for standalone PV power system in rural electrification," *Appl. Energy*, vol. 224, pp. 340–356, 2018.
- [3] PLN, "Survey Listrik Desa PT PLN (Persero) Unit Induk Wilayah Papua Dan Papua Barat," 2020.
- [4] Solcast, "Global solar irradiance data and PV system power output data," 2019.



- [5] B. Kencana et al., *Panduan Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)*, no. November. Jakarta: Direktur Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi, 2018.
- [6] GIZ, *What size shall it be? A guide to mini-grid sizing and demand forecasting*. 2016.
- [7] R. Messenger and J. Ventre, *Photovoltaic Systems Engineering*, Third Edition. 2010.
- [8] D. Abbes, A. Martinez, and G. Champenois, "Eco-design optimisation of an autonomous hybrid wind – photovoltaic system with battery storage," *IET Renew. Power Gener.*, pp. 1–14, 2011.
- [9] H. Beltran, J. Barahona, R. Vidal, J. C. Alfonso, C. Ariño, and E. Pérez, "Ageing of different types of batteries when enabling a PV power plant to enter electricity markets," in *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2016, pp. 1986–1991.
- [10] H. Mun, B. Moon, S. Park, and Y. Yoon, "A study on the economic feasibility of stand-alone microgrid for carbon-free island in Korea," *Energies*, vol. 14, no. 1913, pp. 1–16, 2021.
- [11] A. A. Kebede et al., "Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application," *J. Energy storage*, vol. 40, no. November 2020, p. 102748, 2021.
- [12] B. Ihsan, "Perancangan dan Analisis Sistem PV *Off-Grid* dengan Sistem *Hybrid Energy Storage*," Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, Nov. 2021.