

Perancangan Sistem Penyedia Daya PLTS Off-Grid untuk Operasional Mesin Pembuat Es di Pulau Sadulang Besar, Sumenep, Jawa Timur, Indonesia

Rafli Fadil Maulana^{1*}, Yuli Mafendro Dedet Eka Saputra¹, Muslimin², dan Dana Saputra³

¹ Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425; ² PT Alana Green Electric, Indonesia

*E-mail address: rafli.fadil.maulana.tm22@mhs.pnj.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan merancang sistem penyedia daya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid untuk operasional mesin pembuat es di Pulau Sadulang Besar, Sumenep, Jawa Timur. Metode kuantitatif dan deskriptif-analitis digunakan melalui identifikasi profil beban, perhitungan kapasitas komponen, penyusunan konfigurasi, serta simulasi PVsyst dengan data Meteonorm. Kebutuhan energi sistem sebesar 42,01 kWh/hari, terdiri atas 25,33 kWh pada siang hari dan 16,68 kWh pada malam hari, dengan daya simultan maksimum 3,51 kW. Rancangan menggunakan 24 modul monokristalin 550 Wp berkapasitas total 13,20 kWp, inverter hibrida 8 kW, dan empat baterai lithium iron phosphate 51,2 V 200 Ah dengan kapasitas nominal 40,96 kWh. Simulasi menghasilkan kebutuhan energi 15.334 kWh/tahun dan energi tersuplai 15.213,83 kWh/tahun, dengan missing energy 119,82 kWh/tahun, solar fraction 99,26%, dan performance ratio 54,67%. Rancangan mampu memenuhi sebagian besar kebutuhan energi pada profil operasi harian, tetapi implementasi tetap memerlukan penjadwalan beban dan verifikasi karakteristik start-up kompresor.

Kata-kata kunci: Energi terbarukan, PLTS off-grid, mesin pembuat es, kepulauan terpencil, PVsyst

Abstract

This study designs an off-grid photovoltaic power supply system for an ice-making machine on Sadulang Besar Island, Sumenep, East Java. A quantitative and descriptive-analytical method was applied through load-profile identification, component sizing, system configuration, and PVsyst simulation using Meteonorm data. The energy demand was 42.01 kWh/day, consisting of 25.33 kWh during daytime and 16.68 kWh during nighttime, with a maximum simultaneous load of 3.51 kW. The proposed system consists of 24 monocrystalline modules rated at 550 Wp, providing 13.20 kWp of installed capacity, an 8 kW hybrid inverter, and four 51.2 V 200 Ah lithium iron phosphate batteries with 40.96 kWh nominal storage. The simulation produced an annual demand of 15,334 kWh and supplied energy of 15,213.83 kWh/year, with 119.82 kWh/year of missing energy, a solar fraction of 99.26%, and a performance ratio of 54.67%. The configuration can meet most of the daily load demand, although load scheduling and verification of compressor start-up characteristics are required before field implementation.

Keywords: Renewable energy, off-grid photovoltaic system, ice-making machine, remote island, PVsyst

1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik melalui modul fotovoltaik. Pada sistem off-grid, energi digunakan langsung oleh beban atau disimpan pada baterai, kemudian inverter mengubah arus searah menjadi arus bolak-balik. Konfigurasi ini sesuai untuk wilayah kepulauan karena dapat beroperasi secara mandiri tanpa jaringan PLN, tetapi keandalan sistem sangat dipengaruhi ketepatan profil beban, kapasitas array, penyimpanan energi, dan proteksi instalasi [1], [6].

Keterbatasan energi di wilayah kepulauan juga memengaruhi kegiatan produktif masyarakat pesisir. Ikan harus dipertahankan pada suhu rendah agar penurunan mutu dapat diperlambat, sehingga pabrik es, cold storage, dan fasilitas rantai dingin menjadi infrastruktur penting [4], [5]. Pemanfaatan listrik terbarukan untuk pendinginan dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar dan menekan kerusakan hasil perikanan [11], [12].

Pulau Sadulang Besar, Kabupaten Sumenep, membutuhkan pasokan listrik yang andal untuk mendukung produksi es bagi nelayan. Mesin pembuat es memiliki beban kompresor dengan kebutuhan energi tinggi dan karakteristik start-up yang harus diperhatikan. Penelitian terdahulu telah membahas sistem fotovoltaik untuk mesin es dan pendinginan perikanan [3], [7], tetapi konfigurasi untuk beban produktif skala 42,01 kWh/hari dengan profil siang-malam, baterai LFP, inverter hibrida ber-MPPT terintegrasi, dan evaluasi PVsyst masih perlu dikaji. Penelitian ini bertujuan menentukan kebutuhan energi, kapasitas komponen, konfigurasi sistem, serta kinerja energi PLTS off-grid untuk operasional mesin pembuat es.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dan deskriptif-analitis. Prosedur difokuskan pada tahapan teknis perancangan, tanpa menggunakan diagram alir penyelesaian tugas akhir. Data masukan terdiri atas profil daya dan waktu operasi beban, data meteorologi Meteoronorm melalui PVsyst, data iradiasi matahari Ecowatt WS2910 sebagai pembanding regional, serta spesifikasi modul, baterai, dan inverter.

Kebutuhan energi dihitung dari jumlah hasil perkalian daya dan waktu operasi setiap beban. Profil dipisahkan menjadi energi siang dan malam karena array fotovoltaik menyuplai beban sekaligus mengisi baterai pada periode produksi surya, sedangkan baterai menjadi sumber utama ketika produksi fotovoltaik tidak mencukupi. Kapasitas array ditentukan menggunakan kebutuhan energi, peak sun hour desain 4,57 jam/hari, dan faktor derating 0,75. Kapasitas baterai dihitung dari kebutuhan energi malam, depth of discharge, efisiensi, dan margin operasi. Pemilihan inverter mempertimbangkan daya kontinu, surge, tegangan baterai, rentang MPPT, arus masukan, dan batas daya fotovoltaik [6], [8], [9]. Urutan prosedur teknis dan keluaran setiap tahap perancangan dirangkum pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Prosedur perancangan dan evaluasi sistem

Tahap	Prosedur teknis	Keluaran
1	Menyusun profil daya, durasi, dan periode operasi seluruh beban	Energi siang, malam, harian, dan daya simultan
2	Menetapkan PSH desain dan faktor derating dari data Meteoronorm/PVsyst	Parameter sumber energi untuk sizing array
3	Menghitung kapasitas array, jumlah modul, serta konfigurasi seri-paralel	Kapasitas PV dan pembagian string pada MPPT
4	Menghitung baterai dari energi malam, DoD, efisiensi, dan margin	Jumlah baterai, energi nominal, dan energi efektif
5	Memeriksa daya kontinu/surge, tegangan, arus, MPPT, serta proteksi	Kesesuaian inverter dan batas teknis komponen
6	Menyimulasikan konfigurasi dan profil beban pada PVsyst	Neraca energi, missing energy, SF, PR, dan losses

Berdasarkan Tabel 1, proses perancangan dimulai dari penyusunan profil beban, dilanjutkan dengan penentuan parameter sumber energi, perhitungan kapasitas komponen, pemeriksaan batas teknis, dan simulasi kinerja. Konfigurasi terpilih selanjutnya dimodelkan pada PVsyst menggunakan profil beban harian, array 13,20 kWp, empat baterai 51,2 V 200 Ah, dan inverter hibrida 8 kW. Evaluasi didasarkan pada energi kebutuhan pengguna (ELoad), energi tersuplai (EUser), missing energy (EMiss), solar fraction, performance

ratio, unused energy, serta rugi-rugi sistem. Hasil simulasi diperlakukan sebagai estimasi kinerja berdasarkan data masukan dan skenario operasi, bukan pengukuran langsung di lapangan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

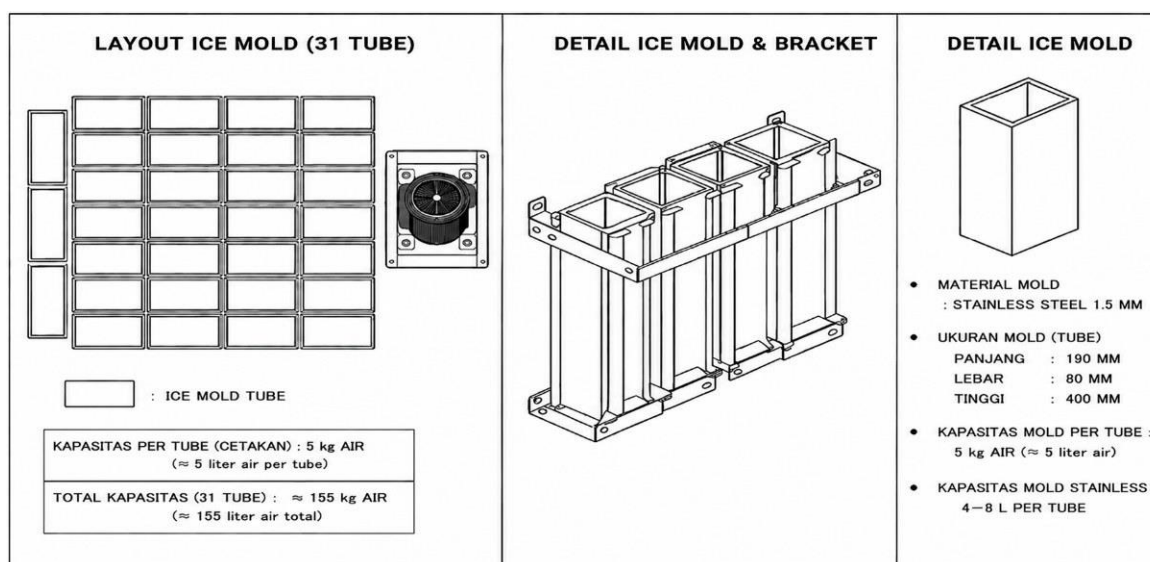
3.1 Profil Beban dan Kebutuhan Energi

Profil beban disusun selama 24 jam. Mesin pembuat es dan motor agitator beroperasi 16 jam/hari, sistem reverse osmosis (RO) 8 jam/hari, sedangkan beban pendukung mengikuti jadwal penggunaan. Pemisahan distribusi waktu diperlukan untuk memperkirakan energi yang langsung dipenuhi fotovoltaik dan energi yang harus disediakan baterai. Rincian daya, durasi operasi, energi harian, dan distribusi energi setiap beban disajikan pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Profil beban listrik sistem

Beban	Daya total	Operasi	Energi harian	Distribusi energi
Lampu LED	50 W	5 jam	0,25 kWh	Malam 0,25 kWh
Televisi	70 W	4 jam	0,28 kWh	Malam 0,28 kWh
Kipas angin	70 W	4 jam	0,28 kWh	Malam 0,28 kWh
Kulkas mini	40 W	24 jam	0,96 kWh	Siang 0,40; malam 0,56 kWh
Motor agitator	150 W	16 jam	2,40 kWh	Siang 1,35; malam 1,05 kWh
Mesin pembuat es	1.600 W	16 jam	25,60 kWh	Siang 14,40; malam 11,20 kWh
Sistem RO	1.530 W	8 jam	12,24 kWh	Siang 9,18; malam 3,06 kWh
Total	3,51 kW	-	42,01 kWh	Siang 25,33; malam 16,68 kWh

Berdasarkan Tabel 3.1, kebutuhan energi total sebesar 42,01 kWh/hari. Mesin pembuat es menyumbang 25,60 kWh/hari atau sekitar 60,94% dari kebutuhan, sedangkan RO menyumbang 12,24 kWh/hari atau sekitar 29,14%. Dominasi kedua beban tersebut menunjukkan bahwa pengaturan jam operasi RO dan keberhasilan start-up kompresor berpengaruh langsung terhadap kecukupan energi sistem. Beban malam sebesar 16,68 kWh menjadi dasar utama penentuan kapasitas baterai. Selain profil kelistrikan, bentuk dan susunan cetakan diperlukan untuk menjelaskan objek mesin pembuat es; tata letak 31 cetakan ditunjukkan pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Tata letak 31 cetakan pada mesin pembuat es

Berdasarkan Gambar 3.1, mesin menggunakan 31 cetakan berukuran 190 mm × 80 mm × 400 mm dengan kapasitas sekitar 5 kg per cetakan. Tata letak tersebut menunjukkan posisi cetakan dan dudukannya di dalam mesin, serta menjadi dasar untuk memahami skala produksi es. Meskipun demikian, pembahasan artikel tetap difokuskan pada sistem penyedia daya, sedangkan aspek mekanik cetakan tidak dianalisis secara terperinci.

3.2 Kapasitas dan Konfigurasi Komponen

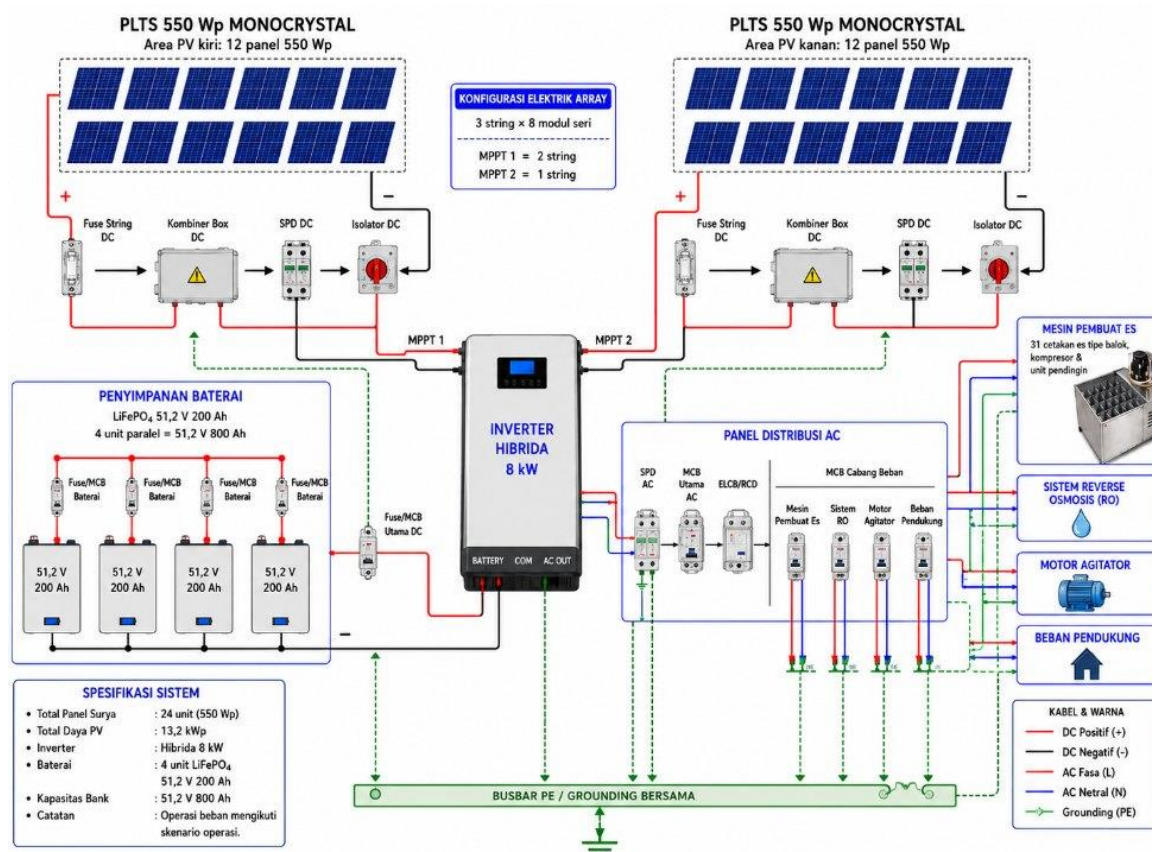
Perhitungan menghasilkan kebutuhan minimum array sebesar 12,26 kWp. Jumlah minimum sekitar 23 modul dibulatkan menjadi 24 modul 550 Wp agar konfigurasi dapat disusun menjadi tiga string seimbang, masing-masing delapan modul seri. Kapasitas terpasang menjadi 13,20 kWp. Pembulatan memberi margin terhadap variasi iradiasi dan rugi-rugi, sekaligus menjaga tegangan string berada dalam rentang MPPT inverter.

Kebutuhan minimum bank baterai sebesar 497,85 Ah. Rancangan akhir menggunakan empat baterai LFP 51,2 V 200 Ah secara paralel sehingga kapasitas bank menjadi 800 Ah atau 40,96 kWh nominal. Setelah memperhitungkan DoD 80% dan efisiensi inverter 90%, energi efektif sekitar 29,49 kWh. Nilai ini setara 1,77 kali kebutuhan energi malam, tetapi hanya sekitar 0,70 hari apabila seluruh kebutuhan harian harus disuplai tanpa kontribusi fotovoltaik. Hasil akhir pemilihan kapasitas dan konfigurasi komponen dirangkum pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 Ringkasan konfigurasi hasil perancangan

Parameter	Hasil perancangan
Kebutuhan energi	42,01 kWh/hari; siang 25,33 kWh; malam 16,68 kWh
Array fotovoltaik	24 x 550 Wp = 13,20 kWp; 3 string x 8 modul seri
Pembagian MPPT	MPPT 1: dua string; MPPT 2: satu string
Bank baterai	4 x 51,2 V 200 Ah paralel; 800 Ah; nominal 40,96 kWh
Energi efektif baterai	29,49 kWh
Inverter hibrida	IPV-8K48U, 8 kW; surge 16 kW selama 5 detik
Daya simultan maksimum	3,51 kW
Estimasi start-up kompresor	11,51-14,71 kW; durasi start-up harus diverifikasi

Berdasarkan Tabel 3.2, kapasitas array 13,20 kWp telah berada di atas kebutuhan minimum dan dapat dibagi menjadi tiga string yang seimbang. Bank baterai 40,96 kWh memberikan cadangan yang memadai untuk beban malam, sedangkan inverter 8 kW memenuhi kebutuhan daya kontinu dan secara teoritis memiliki kemampuan surge yang lebih besar daripada estimasi start-up kompresor. Namun, durasi dan arus start-up aktual tetap harus diukur. Hubungan kelistrikan antara array, inverter, baterai, panel distribusi, proteksi, dan beban divisualisasikan pada Gambar 3.2.

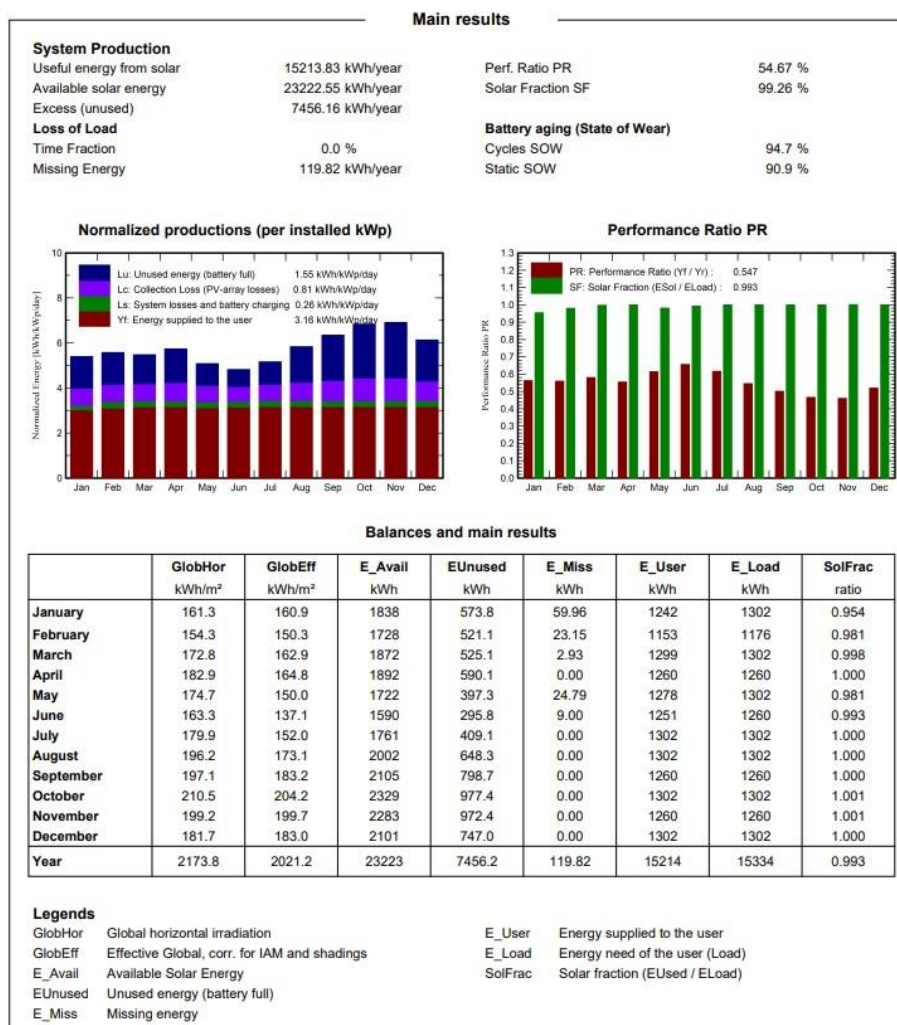


Gambar 3.2. Konfigurasi sistem penyedia daya PLTS off-grid

Berdasarkan Gambar 3.2, tiga string fotovoltaik dihubungkan melalui fuse string, combiner box, SPD DC, dan isolator DC menuju inverter hibrida. Bank baterai dipasang paralel melalui pengaman masing-masing unit dan pengaman utama. Sisi AC terdiri atas SPD, MCB utama, ELCB/RCD, MCB cabang, serta busbar grounding. Penggabungan MPPT, inverter, dan pengelolaan baterai dalam satu perangkat menyederhanakan arsitektur dibandingkan sistem yang memakai pengendali dan inverter terpisah. Akan tetapi, Gambar 2 masih bersifat konfigurasi konseptual; rating proteksi, ukuran kabel, jatuh tegangan, dan koordinasi proteksi DC-AC tetap harus dihitung sebelum digunakan sebagai gambar kerja instalasi [1], [8], [9].

3.3 Hasil Simulasi PVsyst

Simulasi dilakukan menggunakan kebutuhan energi tahunan 15.334 kWh, array 13,20 kWp, empat baterai LFP, dan profil beban harian. Hasil produksi, neraca energi bulanan, solar fraction, dan performance ratio ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3.3 Hasil utama dan neraca energi bulanan PVsyst

Berdasarkan Gambar 3.3, kekurangan energi muncul ketika produksi array dan energi baterai tidak cukup mengikuti beban, sedangkan energi berlebih meningkat pada bulan beriradiasi tinggi saat baterai telah penuh. Parameter kinerja utama dirangkum pada Tabel 3.3.

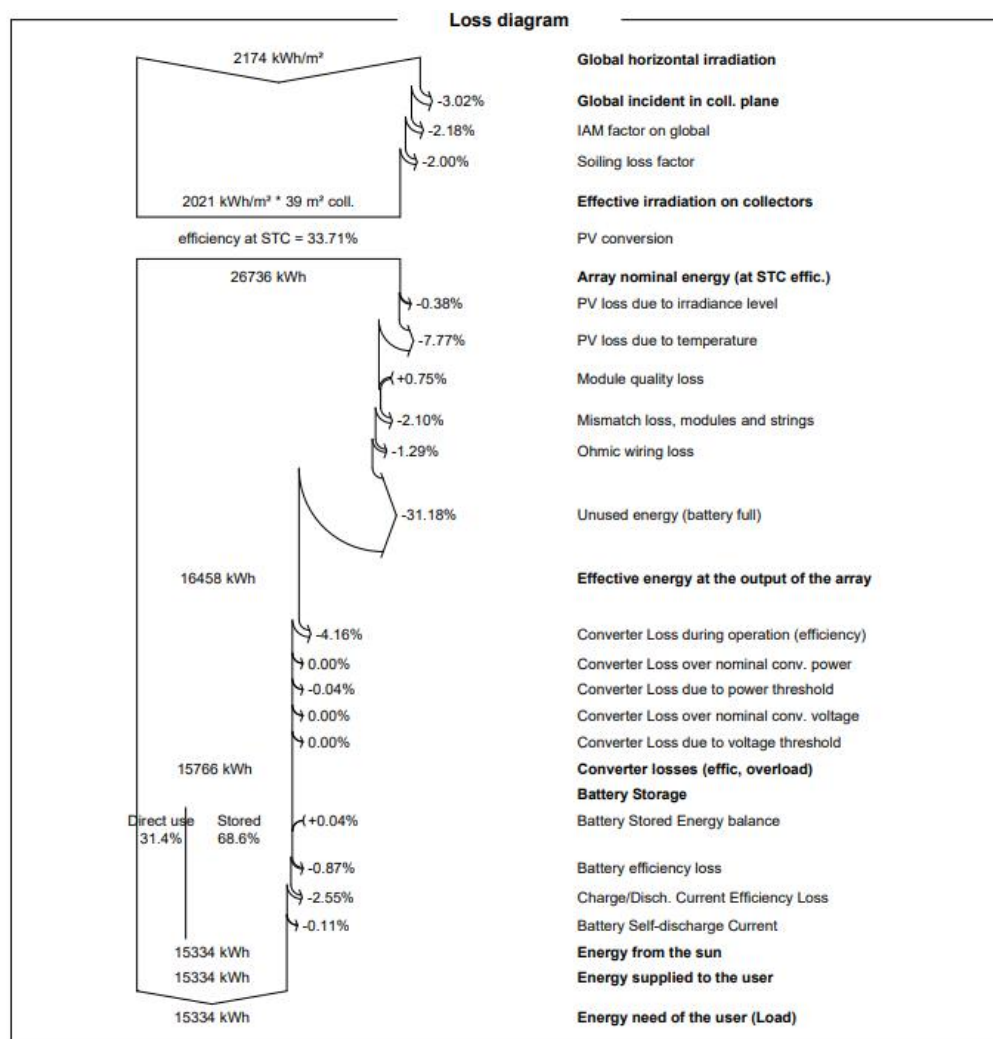
Tabel 3.3. Parameter kinerja hasil simulasi

Parameter	Nilai
Kebutuhan energi pengguna	15.334 kWh/tahun
Energi disuplai ke pengguna	15.213,83 kWh/tahun
Missing energy	119,82 kWh/tahun
Solar fraction	99,26%
Performance ratio	54,67%
Unused energy ketika baterai penuh	7.456,16 kWh/tahun
Rugi unused energy pada loss diagram	31,18%
Rugi temperatur modul	7,77%

Berdasarkan Tabel 3.3, missing energy sebesar 119,82 kWh/tahun berada di bawah 1% dari kebutuhan tahunan sehingga solar fraction mencapai 99,26%. Kekurangan energi terutama terjadi pada Januari, Februari, Maret, Mei, dan Juni ketika iradiasi lebih rendah atau energi baterai tidak mencukupi. Hasil ini menunjukkan sistem mampu memenuhi sebagian besar kebutuhan tahunan, tetapi tidak menjamin pemenuhan 100% pada setiap jam dan kondisi cuaca.

Performance ratio sebesar 54,67% terutama dipengaruhi unused energy 31,18% ketika baterai penuh, selain rugi temperatur modul 7,77%, konverter, mismatch, kabel, serta proses penyimpanan. Oleh karena itu, PR rendah pada sistem off-grid tidak dapat langsung diartikan sebagai kegagalan teknis; nilainya harus dibaca

bersama solar fraction dan neraca energi. Rincian aliran energi dan kontribusi setiap jenis rugi-rugi ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Loss diagram sistem PLTS off-grid berdasarkan simulasi PVsyst

Berdasarkan Gambar 3.4, rugi terbesar berasal dari unused energy sebesar 31,18%, diikuti rugi temperatur modul 7,77%, rugi konverter 4,16%, mismatch 2,10%, soiling 2,00%, kabel 1,29%, serta rugi pada proses pengisian dan pelepasan baterai. Besarnya unused energy menunjukkan kapasitas array cukup besar pada bulan beriradiasi tinggi, tetapi energi tidak seluruhnya dapat diserap karena baterai telah penuh atau beban tidak beroperasi pada saat yang sama. Temuan ini mendukung perlunya penjadwalan RO pada periode produksi PV tinggi dan evaluasi kapasitas array-baterai secara teknis dan ekonomis.

3.4 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Hakim et al. merancang sistem fotovoltaik untuk mesin pembuat es menggunakan array 10,4 kWp, 82 baterai 12 V 100 Ah, 11 pengendali MPPT, dan 20 inverter 1.200 W [3]. Penelitian ini menggunakan array 13,20 kWp, empat baterai LFP 51,2 V 200 Ah, dan satu inverter hibrida ber-MPPT terintegrasi. Perbedaan jumlah komponen terutama berasal dari skala energi, teknologi baterai, dan integrasi konverter, sehingga perbandingan jumlah unit tidak dapat dilakukan tanpa melihat tegangan, kapasitas energi, serta profil operasi.

Cheepati et al. mengembangkan ice maker off-grid skala kecil dengan PV 300 W, baterai 100 Ah, dan inverter 2 kW yang memberikan cadangan 6–8 jam tanpa iradiasi [7]. Rancangan dalam penelitian ini ditujukan untuk beban produktif 42,01 kWh/hari dengan mesin es, agitator, RO, dan beban pendukung, sehingga kapasitas PV dan penyimpanannya jauh lebih besar. Keduanya menegaskan bahwa inverter harus memperhitungkan arus awal kompresor, bukan hanya daya nominal.

Cahyadi et al. memperoleh performance ratio 54% dan solar fraction 92% pada PLTS off-grid 5,5 kWp [2]. Nilai PR penelitian ini, 54,67%, berada pada kisaran yang hampir sama, sedangkan solar fraction lebih tinggi,

yaitu 99,26%. Kesamaan PR memperlihatkan pengaruh penyimpanan dan energi tidak terpakai pada sistem off-grid; perbedaan solar fraction dipengaruhi rasio kapasitas array-baterai terhadap profil beban dan kondisi meteorologi.

Azman dan Sulistiawan melaporkan renewable fraction 79,9% pada sistem PV-diesel-battery Pulau Legundi [10], sedangkan penelitian ini tidak memakai diesel dan menghasilkan solar fraction 99,26%. Meskipun indikatornya tidak identik, kedua studi menunjukkan pentingnya karakterisasi beban, kapasitas baterai, dan strategi operasi pada sistem kepulauan. Pada aplikasi perikanan, Setiawan et al. dan Carlsson et al. juga menunjukkan bahwa energi surya dapat mendukung pendinginan dan mengurangi kerusakan ikan, tetapi kebutuhan energi sangat bergantung pada jenis teknologi pendingin dan skala fasilitas [5], [11].

3.5 Days of Autonomy dan Strategi Load Shedding

Empat baterai menghasilkan energi efektif sekitar 29,49 kWh setelah memperhitungkan depth of discharge 80% dan efisiensi inverter 90%. Kapasitas tersebut setara dengan sekitar 1,77 kali kebutuhan malam, tetapi hanya sekitar 0,70 hari apabila seluruh kebutuhan 42,01 kWh/hari harus dipenuhi tanpa kontribusi fotovoltaik. Karena otonomi belum mencapai satu hari penuh, strategi load shedding diperlukan untuk mempertahankan beban prioritas dan mencegah pengosongan baterai secara berlebihan. Tahapan strategi operasi berdasarkan kondisi sistem dan SoC dirangkum pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4. Strategi load shedding sistem PLTS off-grid

Kondisi sistem	Strategi operasi	Beban prioritas	Beban dikurangi/dihentikan
Kondisi normal	Seluruh beban beroperasi sesuai jadwal	Seluruh beban	Tidak ada
Produksi PV menurun atau SoC 30–50%	RO dijadwalkan pada periode produksi PV tinggi	Mesin pembuat es, agitator, dan lampu seperlunya	RO dijadwalkan ulang dan beban pendukung dibatasi
Kondisi kritis atau SoC 20–30%	Selesaikan siklus es aktif dan tidak memulai siklus baru	Mesin pembuat es, agitator, dan sistem kontrol selama siklus aktif	RO, televisi, kipas, dan beban nonprioritas
SoC mencapai 20%	Pengosongan baterai dihentikan pada batas desain	Sistem kontrol dan beban keselamatan seperlunya	Seluruh beban produksi dan beban pendukung

Berdasarkan Tabel 3.4, mesin pembuat es dan motor agitator diprioritaskan selama siklus pembentukan es berlangsung, sedangkan RO dan beban pendukung menjadi beban yang terlebih dahulu dijadwalkan ulang atau dihentikan ketika SoC menurun. Pada kondisi SoC 20–30%, siklus yang sedang berjalan sebaiknya diselesaikan tanpa memulai siklus baru. Ketika SoC mencapai batas minimum 20%, beban produksi dihentikan agar baterai tidak mengalami pengosongan berlebih. Strategi ini perlu diimplementasikan pada sistem kontrol dan diuji menggunakan profil beban aktual.

4. KESIMPULAN

Sistem penyedia daya PLTS off-grid dirancang untuk kebutuhan energi 42,01 kWh/hari, terdiri atas 25,33 kWh pada siang hari dan 16,68 kWh pada malam hari, dengan daya simultan maksimum 3,51 kW. Konfigurasi akhir menggunakan 24 modul 550 Wp atau 13,20 kWp, tiga string masing-masing delapan modul, empat baterai LFP 51,2 V 200 Ah paralel dengan kapasitas nominal 40,96 kWh, serta inverter hibrida 8 kW. Simulasi PVsyst menghasilkan energi tersuplai 15.213,83 kWh/tahun, missing energy 119,82 kWh/tahun, solar fraction 99,26%, performance ratio 54,67%, dan unused energy 7.456,16 kWh/tahun. Energi efektif baterai 29,49 kWh setara 1,77 kali kebutuhan malam, tetapi days of autonomy terhadap beban harian hanya sekitar 0,70 hari. Rancangan mampu memenuhi sebagian besar kebutuhan energi tahunan, namun implementasi harus disertai penjadwalan RO, strategi load shedding berbasis SoC, serta verifikasi start-up kompresor dan proteksi instalasi.

REFERENSI

- [1] B. Ramadhani, Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya: Dos & Don'ts. Jakarta: GIZ dan Direktorat Jenderal EBTKE, 2018.
- [2] B. N. Cahyadi, Zulfatman, and N. A. Mardiyah, "Studi analisis pembangkit listrik tenaga surya off-grid untuk mengurangi efek pemadaman listrik," JITEL, vol. 5, no. 3, pp. 155-166, 2025, doi: 10.35313/jitel.v5.i3.2025.155-166.
- [3] A. R. Hakim, W. Sarwono, and L. Assadad, "Perancangan Sistem Photovoltaic untuk Mesin Pembuat Es di Pelabuhan Perikanan Sadeng," JNTETI, vol. 7, no. 2, pp. 228-235, 2018, doi: 10.22146/jnteti.v7i2.427.
- [4] E. M. B. Sitanggang, N. Nurhayati, F. Ramadan, L. Lisna, F. Ramdhani, and P. Nur, "Studi Pemanfaatan Fasilitas Rantai Dingin di Pelabuhan Perikanan Samudera Bungus, Sumatera Barat," Torani: Journal of Fisheries and Marine Science, vol. 9, no. 1, pp. 91-107, 2025.

- [5] R. J. Setiawan, K. Ma'ruf, Darmono, I. D. Suryanto, and A. T. Hermawan, "Design system and performance analysis of fish storage box by utilizing solar energy," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 2591-2602, 2024, doi: 10.11591/ijpeds.v15.i4.pp2591-2602.
- [6] L. B. Deelee, S. Ozuomba, and O. S. Essang, "Sizing of an Off-Grid Photovoltaic Power Supply System with Battery Storage," *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, vol. 7, no. 8, pp. 13659-13666, 2020.
- [7] K. R. Cheepati, V. M. K. Reddy, A. Prasad, S. Kamalakkannan, E. Parimalasundar, and R. Dharmaprakash, "Design and Implementation of a Photovoltaic Solar Powered Ice Cube Making Machine for off Grid Applications," *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 12, no. 5, pp. 23-31, 2025, doi: 10.14445/23488379/IJEEE-V12I5P103.
- [8] U. Subramaniam, S. Vavilapalli, S. Padmanaban, F. Blaabjerg, J. B. Holm-Nielsen, and D. Almakhlles, "A Hybrid PV-Battery System for ON-Grid and OFF-Grid Applications - Controller-In-Loop Simulation Validation," *Energies*, vol. 13, art. 755, 2020, doi: 10.3390/en13030755.
- [9] L. H. Meneghetti et al., "Hybrid Inverter and Control Strategy for Enabling the PV Generation Dispatch Using Extra-Low-Voltage Batteries," *Energies*, vol. 15, art. 7539, 2022, doi: 10.3390/en15207539.
- [10] N. Azman and R. Sulistiawan, "Design and performance evaluation of an off-grid hybrid solar system in a remote location: A case study of Legundi Island," *MethodsX*, vol. 12, art. 102716, 2024, doi: 10.1016/j.mex.2024.102716.
- [11] O. Carlsson, M. Johansson, and E. O. Ahlgren, "Utilization of a solar PV mini-grid powered cold storage to reduce fishery spoilage - A Tanzanian case," *Energy for Sustainable Development*, vol. 88, art. 101778, 2025, doi: 10.1016/j.esd.2025.101778.
- [12] A. S. Alsagri, "Photovoltaic and Photovoltaic Thermal Technologies for Refrigeration Purposes: An Overview," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 47, pp. 7911-7944, 2022, doi: 10.1007/s13369-021-06534-2.