

Perancangan Sistem *Photovoltaic* untuk Mesin Pembuat Es di Pelabuhan Perikanan Sadeng

Arif Rahman Hakim¹, Widiarto Sarwono², Luthfi Assadad³

Abstract--Currently, requirement of ice as medium fish cooling in PP Sadeng has not been fulfilled. This causes deterioration of fish quality when received by the consumers. The self production of ice blocks using ice maker machine has not solved this problem due to the highly operating costs, especially fuel. Photovoltaic (PV) systems are expected to overcome this problem. PV systems have high potential, since it is clean, environment-friendly, secure, and renewable. This paper explains the stages of PV system design, including PV module size, battery, solar charge controller, inverter, and also economic feasibility analysis. The results show that energy requirement of ice maker machines is 19,383.60 watts. The PV system consists of 40 units of 260 wp PV module, 82 units of battery 12V 100AH, 11 units of solar charge controller 40 A type MPPT, and 20 units of inverter DC-AC pure sine wave 1,200 W. Economic analysis shows that the life cycle cost (LCC) PV system designed is Rp513,704,165 for 25 years and levelized cost of energy (LCOE) of PV system is Rp1,401 per kWh.

Intisari--Saat ini kebutuhan es sebagai media pendinginan ikan di PP Sadeng belum terpenuhi. Hal ini mengakibatkan turunnya mutu ikan pada saat sampai di tangan konsumen. Produksi es balok mandiri menggunakan mesin pembuat es belum menyelesaikan masalah karena terkendala mahal biaya operasional terutama bahan bakar. Sistem *photovoltaic* (PV) diharapkan dapat mengatasi hal ini. Sistem PV memiliki potensi yang besar, karena bersih, ramah lingkungan dan termasuk sumber energi yang aman serta terbarukan. Makalah ini menjelaskan tahapan-tahapan perancangan sistem PV meliputi ukuran modul PV, baterai, *solar charge controller*, dan *inverter*, serta analisis kelayakan ekonomi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kebutuhan energi mesin pembuat es adalah sebesar 19.383,60 watt. Komponen sistem PV untuk menghasilkan kebutuhan energi tersebut terdiri atas modul PV 260 wp sebanyak 40 unit, baterai 12V 100AH sebanyak 82 unit, *solar charge controller* 40 A jenis MPPT sebanyak 11 unit, dan *inverter* DC-AC *pure sine wave* 1.200 W sebanyak 20 unit. Hasil analisis ekonomi menunjukkan bahwa *life cycle cost* (LCC) sistem PV yang dirancang ialah Rp513.704.165 selama umur proyek 25 tahun sedangkan *levelized cost of energy* (LCOE) dari sistem PV sebesar Rp 1.401 per kWh.

Kata kunci--Sistem *photovoltaic*, mesin pembuat es, perancangan.

I. PENDAHULUAN

Pelabuhan terbesar di Kabupaten Gunungkidul adalah Pelabuhan Perikanan (PP) Sadeng yang terletak di teluk Sadeng, Desa Pucung, Kecamatan Girisubo, Kabupaten Gunungkidul, Provinsi DIY. Letak geografis Pelabuhan

Perikanan Pantai (PPP) Sadeng terletak pada koordinat 110°52'32"BT dan 8°12'30"LS. PP Sadeng merupakan salah satu unit kerja dari Unit Pelaksana Teknis Dinas (UPTD) PPP dan sebagai kantor pusat UPTD PPP yang memiliki wilayah kerja sepanjang pantai DIY, termasuk PPP Glagah, Karangwuni, Wates, Kulon Progo [1].

Peningkatan produksi ikan hasil tangkapan di PP Sadeng terus meningkat. Hasil tangkapan ikan yang didaratkan selama tahun 2017 adalah sebesar 1.791.093 kg dengan rata-rata 149.258 kg per bulan atau 4.975 kg per hari. Sedangkan hasil tangkapan terbanyak terjadi pada bulan Mei sebesar 279.677 kg.

Mutu ikan hasil tangkapan tetap terjaga dengan baik jika suhu ikan dapat dipertahankan tetap rendah (0-5 °C). Teknologi paling efektif untuk menurunkan suhu ialah dengan pemberian es pada ikan. Kebutuhan es minimal per kg ikan untuk menurunkan hingga suhu 0 °C ialah 0,25 kg es.

Pasokan es di PP Sadeng saat ini belum dapat mencukupi kebutuhan es para nelayan untuk penanganan ikan. Salah satu penyebabnya ialah jauhnya lokasi pabrik penyedia es. Selain itu, harga es yang terus naik menyebabkan sebagian nelayan enggan menggunakan es. Untuk mengatasi hal tersebut, Dinas terkait telah menyediakan sarana mesin pembuat es di PP Sadeng dengan kapasitas terpasang 1,5 ton per hari. Namun, mesin pembuat es tersebut saat ini tidak lagi beroperasi. Besarnya biaya operasional, terutama biaya pengadaan bahan bakar, menjadi penyebabnya.

Pemanfaatan sumber energi terbarukan dapat menjadi alternatif untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar konvensional sebagai sumber energi pembangkit mesin pembuat es. Energi terbarukan yang melimpah di Indonesia adalah energi matahari, dengan potensinya sebesar 4,8 kWh/m²/hari. Radiasi sinar matahari diubah menjadi listrik melalui sistem *photovoltaic* (PV) [2].

Sistem PV telah menjadi sumber energi alternatif utama, karena tingkat pertumbuhannya lebih dari 40% per tahun sejak dekade terakhir dan penurunan biaya teknologi PV yang cepat [3]. Sistem pembangkitan menggunakan PV hampir tidak memerlukan perawatan, sumber energinya bebas dan lestari, serta modul PV juga sangat kuat dan memiliki umur yang panjang [4].

Energi yang dihasilkan dalam sistem PV sangat bergantung pada energi matahari yang tersedia di lokasi terpilih. Lokasi geografis, suhu lingkungan, indeks kecerahan, sudut kemiringan, dan orientasi modul PV merupakan faktor utama yang memengaruhi produksi energinya [5]. Di antara alternatif energi lainnya yang ada, sistem PV merupakan energi terbarukan yang paling menjanjikan di Indonesia.

Namun, energi matahari tidak dapat diprediksi, karena radiasi matahari bervariasi dan sering berubah, tergantung

^{1,2,3} Peneliti, Loka Riset Mekanisasi Pengolahan Hasil Perikanan, Jl Imogiri Barat km 11.5 Jetis Bantul Yogyakarta 55781 (telp: 0274-2810500; email: arifrahmanh11@gmail.com; widiarto06@gmail.com; luthfiassadad@gmail.com)

pada cuaca dan perubahan iklim. Karena itu, energi yang dihasilkan biasanya tidak sesuai dengan permintaan beban. Karenanya, dibutuhkan baterai sebagai penyimpan daya cadangan. Sebelum dilakukan instalasi, penting untuk dipastikan bahwa sistem tidak akan terlalu besar atau terlalu kecil. Oleh karena itu, perancang harus membuat beberapa studi prakelayakan terhadap sebuah sistem [6].

Agar pemanfaatan energi matahari efisien dan ekonomis, diperlukan perancangan sistem dan analisis ekonomi [7]. Perhitungan konsumsi energi listrik sangat penting dalam perancangan sistem PV. Demikian juga dengan analisis ekonomi, karena kelebihan produksi energi akan mengurangi kelayakan ekonomisnya. Yang diharapkan ialah kesesuaian antara produksi dengan konsumsi energi, sehingga didapatkan investasi murah dengan keluaran optimal.

Dalam perancangan, pertama harus dihitung konsumsi beban dan kecukupan radiasi matahari di suatu lokasi. Beban harus diperkirakan secara cermat dan realistis. Kelebihan estimasi beban akan meningkatkan biaya sistem secara signifikan, dan estimasi yang terlalu rendah akan menyebabkan masalah pada komponen sistem, terutama baterai [8].

Penelitian sebelumnya telah merancang sistem PV pada atap gedung perkuliahan [9]. Penelitian ini tidak memperhitungkan beban yang akan digunakan, tetapi untuk memanfaatkan atap gedung sebagai tempat modul PV. Penelitian lain melakukan analisis terhadap kapasitas terpasang dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Komunal, tetapi analisis ekonomi belum menunjukkan harga listrik per kWh [10]. Sebuah penelitian lain memberikan kesimpulan tentang potensi pemanfaatan sistem PV di daerah *remote area*, tetapi belum menghitung beban sebenarnya yang digunakan serta analisis ekonominya [11].

Makalah ini menyajikan analisis desain dan ekonomi untuk penggunaan beban mesin pembuat es balok di PP Sadeng Kabupaten Gunungkidul. Sistematika penelitian meliputi perhitungan kapasitas komponen sistem PV, konfigurasi, dan pengaturan sistem. Selanjutnya kelayakan ekonomi dianalisis dengan pendekatan *life cycle cost* (LCC) dan *levelized cost of energy* (LCOE) berdasarkan konfigurasi sistem PV yang telah diidentifikasi.

II. METODOLOGI

A. Data Intensitas Radiasi Matahari

Perancangan sistem PV dimulai dengan analisis data intensitas radiasi sinar matahari. Untuk memprediksi keluaran energi dari sistem PV, harus dilakukan pengambilan data mengenai kondisi meteorologi di lokasi sistem PV dibangun, karena kinerja PV sangat bergantung pada kondisi sinar matahari dan suhu sel [12].

Data intensitas matahari dalam makalah ini diperoleh dari *surface meteorology and solar energy – National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Perolehan data dilakukan dengan memasukkan titik koordinat PP Sadeng yaitu 110°52'32"BT dan 8°12'30"LS. Data intensitas radiasi sinar matahari yang ditampilkan merupakan rata-rata selama 22 tahun (1983-2005), dengan klasifikasi bulanan dalam satuan kW/m²/hari. Data intensitas sinar matahari tersebut tersaji pada Tabel I.

TABEL I
INTENSITAS RADIASI MATAHARI DI KABUPATEN GUNUNGKIDUL

Bulan	Rata-rata Intensitas Sinar (kWh/m ² /hari)
Januari	4,28
Februari	4,47
Maret	4,59
April	4,72
Mei	4,73
Juni	4,55
Juli	4,80
Agustus	5,25
September	5,54
Oktober	5,39
November	4,71
Desember	4,57
Rerata	4,80

B. Kebutuhan Energi Mesin Pembuat Es

Kebutuhan beban dalam makalah ini adalah kebutuhan beban energi untuk menggerakkan mesin pembuat es dalam memproduksi es balok (dalam ton). Kebutuhan es balok per hari di PP Sadeng didasarkan pada besarnya jumlah es balok yang digunakan untuk mendinginkan ikan yang didaratkan (suhu 0 °C) selama tahun 2017.

Proses pendinginan terjadi saat es bersinggungan dengan ikan (27 °C). Ikan memindahkan panas kepada es dan es menerima atau menyerap panas tersebut untuk digunakan dalam proses pencairannya. Proses pemindahan panas berhenti apabila ikan telah mencapai suhu es yaitu 0 °C, jika es telah habis, dan air lelehan es itu telah sama suhunya dengan ikan. Jika es yang diberikan untuk mendinginkan cukup banyak, maka sisa es yang belum meleleh dapat membantu memelihara suhu campuran es dan ikan pada 0 °C.

Hukum kekekalan energi berlaku dalam menghitung jumlah es yang dibutuhkan untuk mendinginkan ikan. Apabila tidak ada faktor-faktor lain yang memengaruhi, maka panas yang perlu diambil dari ikan setara dengan panas yang diserap oleh es untuk meleleh. Jumlah panas yang terlibat di dalam proses pemanasan atau pendinginan dihitung dengan rumus sebagai berikut.

1) *Kebutuhan Es sebagai Media Pendingin*: Dihitung menggunakan (1) dan (2).

$$Q_{ikan} = m_{ikan} \times Cp_{ikan} \times \Delta T \quad (1)$$

dengan

$$Q_{ikan} = \text{kalor pendinginan ikan (kcal)}$$

$$m_{ikan} = \text{berat ikan (kg)}$$

$$Cp_{ikan} = \text{panas jenis ikan (kcal/kg/°C)}$$

$$\Delta T = \text{selisih suhu awal ikan dengan suhu ikan dingin (°C)}$$

$$B_{es} = \frac{Q}{L} \quad (2)$$

dengan

Q = kalor pendinginan ikan (kkal)

B_{es} = jumlah Es (kg)

L = panas laten (kkal/kg).

2) *Beban Panas untuk Menurunkan Suhu Air dari 30 °C ke 0 °C*: Beban ini dihitung menggunakan (3).

$$Q_{air} = m_{air} \times Cp_{air} \times \Delta T_{air} \quad (3)$$

dengan

Q_{air} = kalor pendinginan air (kkal)

m_{air} = massa air (kg)

Cp_{air} = masa jenis air (J/ kg.C).

3) *Beban Panas untuk Mengubah Fase Cair ke Padat*: Beban ini dihitung menggunakan (4).

$$Q_{laten} = m_{air} \times hi_{es} \quad (4)$$

dengan

Q_{laten} = panas laten

Hi_{es} = panas laten (kkal/kg).

4) *Beban Panas untuk Menurunkan Es dari Suhu 0 °C ke -10 °C*: Dihitung menggunakan (5).

$$Q_{es} = m_{es} \times Cp_{es} \times \Delta T_{es}. \quad (5)$$

5) *Total Beban Panas Pembekuan Air*: Beban ini dihitung menggunakan (6).

$$Q_{pembekuan} = Q_{air} + Q_{laten} + Q_{es}. \quad (6)$$

6) *Beban Panas Cetakan*: Beban panas cetakan dihitung menggunakan (7) sampai (9).

$$m_{cetakan} = V_{cet} \times \rho_{cet} \quad (7)$$

dengan

$m_{cetakan}$ = berat cetakan (kg)

V_{cet} = volume cetakan (cm³)

ρ_{cet} = density bahan cetakan (g/cm³).

$$Q_{cetakan} = m_{cet} \times Cp_{bahan\ cet} \times \Delta T_{cet} \quad (8)$$

dengan

$Q_{cetakan}$ = kalor cetakan (kkal)

$m_{cetakan}$ = berat cetakan (kg)

$Cp_{bahan\ cet}$ = panas jenis cetakan (kkal/kg/°C).

$$Q_{Total\ Cetakan} = n_{cet} \times Q_{cet} \quad (9)$$

dengan

n_{cet} = jumlah cetakan (unit) .

7) *Beban Panas Rambatan Dinding Tangki*: Beban ini dihitung menggunakan (10).

$$Q_{dinding} = U \times A \times \Delta T \quad (10)$$

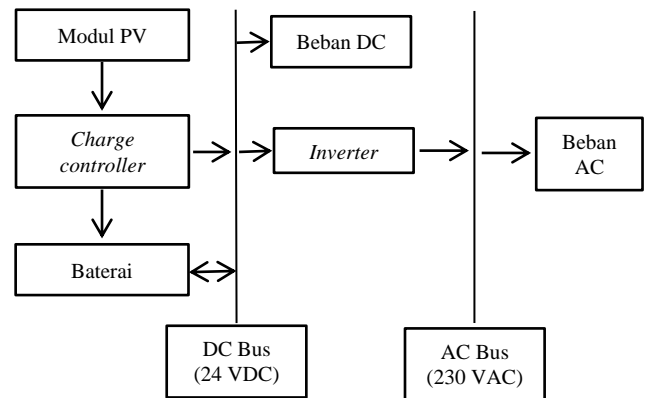
dengan

U = koefisien perpindahan panas keseluruhan (J/ jam.m².°C)

A = luasan perpindahan panas (m²).

C. Desain dan Spesifikasi Komponen Sistem

Sistem PV, seperti diperlihatkan pada Gbr. 1, terdiri atas beberapa komponen, meliputi modul PV, solar charge controller, baterai, inverter, DC bus voltage 24 VDC, dan AC bus voltage 230 VAC.



Gbr. 1 Konfigurasi sistem.

Komponen yang direncanakan ialah komponen PV yang ketersediaannya di pasar lokal cukup banyak. Spesifikasi komponen yang digunakan adalah sebagai berikut.

1) *Modul Photovoltaic*: Modul yang dipilih memiliki kapasitas 260 Wp, dengan spesifikasi tegangan optimal (V_{mp}) = 30,60 V, arus optimal (I_{mp}) = 8,50 A, *open-circuit voltage* (V_{oc}) = 37,70 V, *short-circuit current* (I_{sc}) = 9,15 A, daya maksimal (P_{max}) = 260 W, efisiensi modul = 16 %, tegangan maksimal sistem = 1.000 VDC, dan dimensi = 1.636 X 992 X 45 mm.

2) *Solar Charge Controller (SCC)*: *Controller* adalah alat atau bagian sebuah sistem tenaga surya yang berfungsi sebagai pengatur arus listrik yang masuk dari modul PV terhadap baterai atau akumulator agar tidak terjadi *overcharging* dan *overvoltage* serta berfungsi untuk mengatur arus yang diambil dari baterai agar tidak terjadi *full discharge* dan *overloading*. SCC yang dipilih ialah jenis *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). SCC jenis ini dapat beroperasi di atas tegangan baterai, sehingga dapat mendorong pengisian lebih cepat pada kondisi temperatur dingin dan kapasitas baterai rendah. Spesifikasi SCC yang digunakan adalah sebagai berikut: tegangan sistem = 12/24 VDC *auto*, arus = 40A, daya = 520W/12V; 1040 W/24V, daya maksimal = 1.560W/12V; 3.120 W/24V, dan dimensi = 25,2cm x 18cm x 6,3cm.

3) *Inverter*: *Inverter* yang digunakan adalah jenis *pure sine wave* 1.200 w. *Inverter* jenis ini mampu mengonversi tegangan DC 12V menjadi AC 220V. Spesifikasi *inverter* adalah sebagai berikut. Tegangan masukan = 9v~16V, tegangan keluaran = 220V/230V, jenis: DC/AC, frekuensi keluaran *inverter* = 50 Hz, arus keluaran = 120A.

4) *Baterai*: Baterai yang dipilih adalah baterai dengan tegangan 12 volt, kapasitas 100Ah, dan *maximum discharge current* 1.200A. Baterai ini berjenis *Absorbed Glass Mat*

(AGM). Pemisah/*separator* baterai jenis AGM terdiri atas *fiberglass* yang terletak di antara pelat-pelat selnya. AGM lebih sesuai untuk suplai arus listrik yang tinggi dibandingkan jenis *gell cells*.

Desain sistem dirancang berdasarkan kebutuhan energi dan kapasitas masing-masing komponen. Perancangan tersebut adalah sebagai berikut.

1) *Beban Sistem*: Beban sistem merupakan energi yang dibutuhkan oleh mesin pembuat es yang harus dipenuhi oleh sistem PV. Karena mesin pembuat es menggunakan arus AC, maka yang dihitung ialah permintaan energi AC (E_{AC}). Karena adanya inefisiensi pada kabel, modul, baterai, *charge controller*, dan *inverter*, maka diperlukan energi tambahan untuk menutupi kehilangan energi tersebut. Perhitungan kehilangan energi AC dan kebutuhan energi total harian (E_{req}) adalah seperti yang ditunjukkan pada (11) sampai (13), dengan kehilangan energi AC ($\eta_{AClosses}$) yang diperoleh adalah 0,35 [6].

$$AC_{losses} = E_{AC} \times \eta_{AClosses} \quad (11)$$

$$E_{req} = AC_{losses} + E_{AC} \quad (12)$$

$$I_{req} = \frac{E_{req}}{V_{DCbus}} \quad (13)$$

dengan

$$I_{req} = \text{kebutuhan arus sistem harian (Ah)}$$

$$V_{DCbus} = \text{tegangan DC bus.}$$

2) *Penentuan Modul PV*: Ukuran keluaran PV harus dapat memenuhi total kebutuhan beban harian ditambah energi ekstra untuk menutupi kerugian sistem. Sebelum menentukan modul PV, perlu diperkirakan energi matahari yang tersedia di lokasi PP Sadeng (*peak sun hour/PSH* per bulan). Kemudian, bulan dengan PSH terendah (PSH_{lowest}) dipilih sebagai dasar perancangan. Ukuran modul harus sesuai dengan kebutuhan total energi harian. Oleh karena itu, berdasarkan I_{req} (Ah) yang diperoleh, sistem pengisian arus (I_{charge}) (A) dari modul PV, dihitung menggunakan (14).

$$I_{charge} = \frac{I_{req}}{PSH_{lowest}} \quad (14)$$

Kemudian, jumlah *string* paralel (N_p) dihitung sebagai (15), dengan I_{SCT} adalah keluaran modul pada kondisi standar pabrik (STC). Selanjutnya, modul terhubung seri dalam *string* paralel ($N_{mod/string}$) dapat dihitung, dengan nilai $V_{mod, rated}$ adalah modul tegangan, menggunakan (16). Terakhir, modul PV total (N_{PV}) dihitung menggunakan (17) [13].

$$N_p = \text{roundup} \left(\frac{I_{charge}}{I_{SCT}} \right) \quad (15)$$

$$N_{mod/string} = \frac{V_{mod, rated}}{V_{DCbus}} \quad (16)$$

$$N_{PV} = N_p \times N_{mod/string} \quad (17)$$

3) *Penentuan Baterai*: Kapasitas baterai yang dibutuhkan (I_{batreq}) dihitung berdasarkan (18) [13], [14], dengan N_c adalah cadangan hari dengan baterai dan DOD adalah *depth of*

discharge. N_c umumnya antara 1--4 hari dan disarankan agar DOD tidak lebih dari 60%. Jumlah baterai secara koneksi seri untuk *string* paralel ($N_{bat, series}$) dihitung menggunakan (19), dengan V_{bat} adalah tegangan baterai individual. Jumlah dari koneksi paralel ($N_{bat, parallel}$) dihitung sebagai (20), dengan I_{bat} adalah kapasitas masing-masing baterai [13].

$$I_{batreq} = \frac{I_{req} \times N_c}{DOD} \quad (18)$$

$$N_{bat, series} = \frac{V_{DCbus}}{V_{bat}} \quad (19)$$

$$N_{bat, parallel} = \text{roundup} \left(\frac{I_{batreq}}{I_{bat}} \right) \quad (20)$$

4) *Penentuan Charge Controller*: Bagian ini menunjukkan cara menentukan tegangan dan nilai arus *charge controller*, berdasarkan perhitungan masukan modul PV dan kebutuhan beban DC (keluaran). Nilai tegangan harus sesuai kapasitasnya dengan tegangan DC_{bus} . Sebagian besar *controller* sama kapasitasnya dengan daya *charge* baterai $I_{cc, charge}$ (A) dan nilai arus beban $I_{cc, output}$ (A). $I_{cc, charge}$ dan $I_{cc, output}$ dihitung sebagai (21) dan (22), dengan P_{DCload} adalah total daya beban DC dan 1,25 ditetapkan sebagai faktor kelebihan untuk memberikan keamanan pada modul PV dan arus beban [15]. Kemudian, nilai yang lebih besar dari kedua persamaan tersebut yang dipilih sebagai nilai *charge controller* [6].

$$I_{cc, charge} = N_p \times I_{sc} \times 1,25 \quad (21)$$

$$I_{cc, output} = \left(\frac{P_{DCload}}{V_{DC}} \right) \times 1,25 \quad (22)$$

5) *Penentuan Inverter*: *Inverter* diharapkan dapat mengalirkan beban AC secara maksimum ke mesin pembuat es. Oleh karena itu, nilai daya *inverter* (P_{inv}) dipilih menggunakan (23), dengan P_{ACload} adalah daya total dari permintaan beban AC dan 1,25 ditetapkan sebagai faktor keamanan [15].

$$P_{inv} = P_{ACload} \times 1,25 \quad (23)$$

D. Kelayakan Ekonomi

Kelayakan ekonomi digunakan untuk mengetahui konfigurasi optimal yang sesuai dalam pemenuhan kebutuhan energi tertentu dengan investasi serendah mungkin, sehingga diketahui, investasi dapat diterima atau tidak. Dalam makalah ini, digunakan parameter LCC dan LCOE untuk menganalisis sistem. LCC adalah jumlah biaya instalasi, operasi, dan pemeliharaan dalam jangka waktu tertentu serta biaya penggantian komponen dalam saat ini [16]. Perhitungan untuk LCC adalah sebagai berikut.

$$LCC = C_{pv} + C_{controller} + C_{bat} + C_{inv} + C_{install} + C_{batrep} + C_{invrep} + C_{O\&M, 25years} - C_{salvage} \quad (24)$$

dengan C_{pv} adalah biaya modul PV, C_{bat} adalah biaya baterai, $C_{controller}$ adalah biaya *controller*, C_{inv} adalah biaya *inverter*, $C_{install}$ adalah biaya pemasangan, C_{batrep} adalah biaya penggantian baterai, C_{invrep} ialah biaya penggantian *inverter*,

$C_{O\&M\ 25years}$ adalah nilai biaya operasional dan pemeliharaan selama 25 tahun, dan $C_{salvage}$ adalah nilai *salvage* sistem, yaitu perkiraan nilai jual atau nilai pasar pada akhir masa pakai aset.

Selain baterai dan *inverter*, semua komponen lainnya dianggap memiliki umur 25 tahun. Baterai diganti setelah 7 tahun dan *inverter* diganti setelah 10 tahun. Oleh karena itu, C_{batrep} dan C_{invrep} dihitung dengan (25) dan (26). $C_{O\&M\ 22years}$ dihitung menggunakan (27) [17].

$$C_{batrep} = C_{bat} \left(\frac{1}{1+i} \right)^N \tag{25}$$

$$C_{invrep} = C_{inv} \left(\frac{1}{1+i} \right)^N \tag{26}$$

$$C_{O\&M\ 25years} = (C_{O\&M}) \times \left[\frac{(1+i)^N - 1}{i(1+i)^N} \right] \tag{27}$$

dengan N adalah umur komponen sistem, $C_{O\&M}$ adalah biaya operasional dan biaya pemeliharaan per tahun (1% dari total biaya awal), dan i adalah suku bunga bank, dalam hal ini mengacu pada bunga Kredit Usaha Rakyat (KUR) tahun 2018, yaitu 7%.

LCOE (Rp/kWh) didefinisikan sebagai biaya rata-rata per kWh energi listrik yang dihasilkan oleh sistem selama *lifetime*, dengan memperhatikan biaya investasi, penggantian, operasi dan pemeliharaan, serta biaya modal [18]. LCOE dihitung dengan membagi biaya produksi listrik setiap tahun, LCC_{1year} dengan total energi listrik yang dihasilkan, E_{pv} [18]. Dalam analisis ekonomi, perhitungan harga pasar untuk komponen PV dirangkum seperti dalam Tabel II.

$$LCOE = \frac{LCC_{1year}}{E_{pv}} \tag{28}$$

$$E_{pv} = N_{pv} \times P_{mp_STC} \times PSH_{year} \tag{29}$$

$$LCC_{1year} = \frac{LCC}{\left[\frac{(1+i)^N}{i(1+i)^N} \right]} \tag{30}$$

TABEL II
KOMPONEN UTAMA SISTEM PV

Jenis Komponen	Model	Harga (Rp)
Modul PV	260 Wp <i>monocrystalline</i>	3.513.600
Baterai	VRLA 12V 100Ah	2.200.000
<i>Solar charge controller</i>	MPPT 40 A	3.500.000
<i>Inverter</i>	<i>Pure Sine Wave</i> 1.200W	3.515.000

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. *Data Intensitas Radiasi Matahari*

Data yang diperoleh dari NASA merupakan nilai rata-rata harian selama 22 tahun (1983–2005). Berdasarkan data tersebut, potensi energi yang dapat dihasilkan adalah sebesar 1.728 kWh/tahun. Intensitas tertinggi terjadi pada bulan September (5,54 kWh/m²/hari) dan Oktober (5,39 kWh/m²/hari), sedangkan intensitas terendah terjadi pada bulan Januari (4,28 kWh/m²/hari). Rata-rata intensitas per tahun ialah 4,80 kWh/m²/hari.

Lama penyinaran matahari di Indonesia rata-rata ialah 6-9 jam per hari [19]. Lama penyinaran matahari dihitung dalam

satuan jam/hari, yaitu lamanya matahari menyinari bumi dalam periode satu hari yang disebut juga sebagai panjang siang, yaitu lamanya matahari berada pada horizon. Semakin jauh letak suatu tempat dari garis ekuator, maka fluktuasi lama penyinaran matahari akan semakin besar.

B. *Kebutuhan Energi Mesin Pembuat Es*

Ikan hasil tangkapan di PP Sadeng Kabupaten Gunungkidul sepanjang tahun 2017 terangkum pada Tabel III.

TABEL III
JUMLAH IKAN HASIL TANGKAPAN

No	Bulan	Jumlah Produksi (kg)
1	Januari	175.747
2	Februari	114.874
3	Maret	223.014
4	April	185.994
5	Mei	279.677
6	Juni	103.982
7	Juli	113.960
8	Agustus	117.251
9	September	178.821
10	Oktober	38.963
11	November	150.000
12	Desember	108.810

Dari data tersebut dapat diketahui bahwa hasil tangkapan tertinggi adalah pada bulan Mei, yaitu sebesar 279.677 kg dan terendah pada bulan Oktober, sebesar 38.963 kg.

Berdasarkan (1) dan (2), jumlah energi dan es yang diperlukan untuk menurunkan suhu ikan dari 27 °C menjadi 0 °C diperlihatkan pada Tabel IV, dengan pertimbangan panas jenis ikan (C_p ikan) sebesar 0,88 kkal/kg/°C dan panas laten 80 kkal/kg.

TABEL IV
DATA KEBUTUHAN ES

No.	Bulan	Produksi		Q Ikan (kkal)	Kebutuhan Es (kg)
		Bulan (kg)	Hari (kg)		
1	Januari	175.747	5.858	126.538	1.582
2	Februari	114.874	4.103	88.617	1.108
3	Maret	223.014	7.434	160.570	2.007
4	April	185.994	6.200	133.916	1.674
5	Mei	279.677	9.323	201.367	2.517
6	Juni	103.982	3.466	74.867	936
7	Juli	113.960	3.799	82.051	1.026
8	Agustus	117.251	3.908	84.421	1.055
9	September	178.821	5.961	128.751	1.609
10	Oktober	38.963	1.299	28.053	351
11	November	150.000	5.000	108.000	1.350
12	Desember	108.810	3.627	78.343	979

Kebutuhan es tertinggi adalah pada bulan Mei, yaitu sebesar 2.517 kg atau 2,52 ton per hari.

Sedangkan kebutuhan energi untuk proses pembuatan es balok terangkum pada Tabel V.

TABEL V
KEBUTUHAN ENERGI BEBAN PENDINGINAN

No	Jenis Beban	Energi (watt)
1	Beban panas untuk menurunkan suhu air dari 30 °C ke 0 °C	3.670,76
2	Beban panas untuk mengubah fase cair ke padat	9.750,82
3	Beban panas untuk menurunkan es dari suhu 0 °C ke -10 °C	608,88
4	Beban panas cetakan	4.959,82
5	Beban panas rambatan dinding tangki	393,32
Total beban panas		19383,60

Kebutuhan terbesar ialah pada tahap mengubah air menjadi padat yaitu sebesar 9.750,82 watt, sehingga total kebutuhan energi untuk membentuk air menjadi es sebanyak 2,52 ton adalah 19,38 kW.

C. Desain dan Spesifikasi Komponen Sistem

Hasil perhitungan kapasitas komponen sistem PV tersaji pada Tabel VI. Kebutuhan energi pada mesin pembuat es adalah sebesar 19.383,60 Wh. Bila diperkirakan terjadi kehilangan energi dalam sistem sebesar 35%, maka diperoleh nilai kebutuhan energi 26.167,86 Wh. Dalam perancangan ini, digunakan *DC bus* 24 VDC, sehingga kebutuhan arus masukan adalah 1.090,33 Ah.

Persamaan (14) sampai (17) digunakan untuk menghitung kebutuhan modul PV. Dengan mengetahui kebutuhan arus sebesar 1.090,33 Ah dan PSH terendah adalah 6 jam, maka I_{charge} yang diperoleh adalah sebesar 181,72 A. Jenis modul PV yang dipilih mempunyai karakteristik $I_{STC} = 9,15$ A dan $WP = 260$. Dengan demikian, jumlah modul PV yang dibutuhkan adalah sebanyak 40 unit.

Peran baterai dalam sistem PV adalah untuk menyimpan energi listrik dan digunakan sebagai suplai ketika malam hari atau saat siang hari ketika tidak ada sinar matahari. Kapasitas penyimpanan baterai penyimpanan dapat dihitung menggunakan (18) sampai (20), dengan nilai DoD 40%, dan jumlah hari mendung/hujan selama 3 hari, maka diperoleh nilai kapasitas baterai yang harus tersedia sebesar 8.177,46 Ah. Dengan menggunakan baterai 100 Ah 12 V, maka dibutuhkan 82 unit baterai.

SCC dalam sistem PV digunakan untuk melindungi baterai dari *overcharge* yang dapat merusak baterai dan melakukan otomatisasi pada pengisian baterai. Tujuannya adalah memaksimalkan masa pakai baterai. Kebutuhan SCC berdasarkan (21) dan (22) adalah 11 unit jika masukan dari modul PV sebesar 422,03 A.

Inverter DC-AC digunakan untuk mengalirkan energi listrik ke mesin pembuat es sesuai kebutuhan. Namun, untuk keamanan, diatur hingga 10-25% lebih tinggi dari daya maksimum beban [20], [21]. Selain itu, *inverter* juga melindungi motor listrik mesin dari lonjakan arus. Kebutuhan daya *inverter* dari beban mesin pembuat es adalah 24.229,5 watt, sesuai (23). Dengan memilih daya *inverter* 1.200 watt, maka kebutuhan *inverter* ialah 20 unit. Dipilih *inverter* jenis *pure sine wave* karena menghasilkan keluaran gelombang

sinus murni setara atau mendekati listrik PLN. *Inverter* jenis ini diperlukan terutama untuk beban-beban yang menggunakan kumparan induksi agar bekerja lebih mudah, lancar, dan tidak cepat panas.

TABEL VI
HASIL PERHITUNGAN SISTEM PV

Kebutuhan Energi Harian Mesin Pembuat Es	Nilai	Satuan
Kebutuhan energi (E_{AC})	19.383,6	Wh
Kehilangan energi (AC_{losses})	6.784,26	Wh
Total Kebutuhan energi harian (E_{req})	26.167,8	Wh
Tegangan sistem (V_{DCbus})	24	VDC
Kebutuhan arus harian sistem (I_{req})	1.090,33	Ah
Modul PV		
Kebutuhan arus harian sistem (I_{req})	1.090,33	Ah
Lama penyinaran matahari (PSH) _{lowest}	6	Jam
Masukan arus sistem (I_{charge})	181,72	A
Detail Modul		
Watts Peak	260	Wp
Tegangan	30,6	VDC
Arus	8,5	A
Short Current (I_{SCr})	9,15	A
Jumlah String Paralel (N_p)	20	
Jumlah modul/String	2	
Jumlah modul	40	unit
Kapasitas Baterai		
Kebutuhan arus harian sistem (I_{req})	1.090,33	Ah
Hari mendung/hujan (N_c)	3	day
DoD maksimal	40	%
Kebutuhan kapasitas baterai (I_{batreq})	8.177,46	Ah
Detail Baterai		
Kapasitas	100	Ah
Tegangan baterai	12	VDC
Jumlah baterai	82	unit
Total kapasitas baterai	8.177,46	Ah
Kapasitas Solar Charge controller		
Short Circuit Current modul maksimal	337,62	A
Masukan dari modul	422,03	A
Detail Solar Charge Controller		
Jenis	MPPT	
Tegangan	12	VDC
Arus	40	A
Jumlah SCC	11	unit
Kapasitas Inverter		
Beban mesin pembuat es	19.383,6	Watt
Kebutuhan daya <i>inverter</i>	24.229,5	Watt
Daya <i>inverter</i>	1.200	watt
Jumlah <i>inverter</i>	20	unit

D. Kelayakan Ekonomi

Metode evaluasi statistik yang paling sesuai untuk keekonomian sistem energi terbarukan ialah analisis LCC. Metode ini mencakup semua tahapan proyek, mulai biaya modal, biaya instalasi, biaya operasional dan pemeliharaan, serta biaya penggantian komponen [17].

Modal awal pada sistem PV adalah biaya untuk pembelian semua komponen sistem, antara lain modul PV, baterai, *solar*

charge controller, inverter, dan instalasi (termasuk wiring dan peralatan pendukung lainnya).

TABEL VII
ANALISIS EKONOMI

Parameter	Nilai	Satuan
Suku bunga (i')	7	%
Umur proyek (N)	25	Tahun
Biaya tidak terduga	1	%
Komponen Utama		
Modul PV	139.561.934	Rp
Baterai	179.904.056	Rp
Charge controller	36.927.648	Rp
Inverter	70.972.251	Rp
Peralatan Pendukung		
Kerangka dan instalasi	10.684.147	Rp
Lain-lain		
Biaya tidak terduga	4.273.659	Rp
Total <i>initial cost</i>	442.323.695	Rp
Biaya Operasional dan Pemeliharaan		
LCC _{O&M}	4.423.237	Rp
Operasional & pemeliharaan	51.546.560	Rp
Biaya Penggantian Komponen		
Inverter	13.076.579	Rp
Baterai	33.147.174	Rp
Salvage		
Nilai <i>Salvage</i>	22.116.185	Rp
Hasil		
Produksi energi (E_{pv})	25.663	kWh
LCC _{25 tahun}	513.704.165	Rp
LCC _{per tahun}	35.959.292	Rp
LCOE	1.401	Rp/kWh

Biaya operasional dan pemeliharaan meliputi pengeluaran berkala tahunan, yaitu pembersihan modul PV, biaya pemeliharaan, dan pemeriksaan peralatan. Biaya ini ditetapkan sebesar 1% dari biaya modal [6], [9].

Untuk keberlanjutan operasi sistem dan memastikan efisiensi kinerja sistem, beberapa komponen harus diganti secara berkala. Baterai harus diganti 5-7 tahun sekali, demikian juga inverter sekitar 10-20 tahun sekali, tergantung model dan tipe.

Pada analisis LCC, perhitungan umur sistem/proyek didasarkan pada umur komponen terlama sistem. Umur pakai modul PV adalah yang terlama, kurang lebih 20-25 tahun, sedangkan baterai mampu bekerja optimal hingga 7 tahun. Oleh karena itu, *life cycle* maksimal adalah 25 tahun dan baterai harus diganti setiap 7 tahun. Untuk proyeksi masa depan sistem, parameter lain yang penting ialah nilai inflasi dan suku bunga bank.

Tabel VII menunjukkan hasil analisis ekonomi perancangan sistem PV. Berdasarkan analisis tersebut, biaya awal investasi untuk pembelian komponen adalah Rp442.323.695, instalasi Rp10.684.147, biaya operasional dan

pemeliharaan Rp4.423.237 per tahun, dan nilai akhir sistem/*salvage* Rp22.116.185, sehingga LCC untuk 25 tahun adalah Rp513.704.165 dan LCC setiap tahun Rp35.959.292. E_{pv} sistem ialah sebesar 25.663 kWh, sehingga nilai LCOE ialah Rp 1.401 per kWh.

IV. KESIMPULAN

Kebutuhan es balok harian untuk mencukupi kebutuhan pendinginan ikan di PP Sadeng ialah 2,52 ton dan kebutuhan total energi mesin pembuat es yang diperlukan minimal sebesar 19.383,60 watt.

Komponen sistem PV untuk menghasilkan kebutuhan energi tersebut terdiri atas modul PV 260 wp sebanyak 40 unit, baterai 12V 100Ah sebanyak 82 unit, *solar charge controller* 40 A jenis MPPT sebanyak 11 unit, dan *inverter* DC-AC *pure sine wave* 1.200 W sebanyak 20 unit.

Perhitungan kelayakan ekonomi dilakukan berdasarkan pendekatan LCC dan LCOE. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa LCC sistem PV yang dirancang ialah Rp513.704.165 selama umur proyek 25 tahun dan LCOE dari sistem PV sebesar Rp 1.401 per kWh. Ini menunjukkan biaya produksi listrik dari sistem PV hampir sama bila dibandingkan listrik PLN (Rp1.467 per kWh).

REFERENSI

- [1] "Gunungkidul dalam Angka 2015", Badan Perencanaan Pembangunan Daerah dan Badan Pusat Statistik Kabupaten Gunungkidul, 2015.
- [2] "Potensi dan Peluang Investasi", Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi, 2014.
- [3] D. Näsval, "Development of a Model for Physical and Economical Optimization of Distributed PV Systems," Master Thesis, Uppsala University, Sweden, 2013.
- [4] J. Perez-Gallardo, C. Azzaro-Pantel, S. Astier, S. Domenech, and A. Aguilar-Lasserre, "Ecodesign of Photovoltaic Grid-Connected Systems," *Renewable Energy*, Vol. 64, hal. 82-97, 2014.
- [5] J.F. Armendariz-Lopez, A. Luna-Leon, M.E. Gonzalez-Trevizo, A.P. Arena-Granados, G. Bojorquez-Morales, "Life Cycle Cost of Photovoltaic Technologies in Commercial Buildings in Baja California, Mexico", *Renewable Energy*, Vol. 87, part 1, hal. 564-571, 2016.
- [6] N.D. Nordin, H.A.Rahman, "Design and Economic Analysis in Stand Alone Photovoltaic System", *2014 IEEE Conference on Energy Conversion*, 2014, hal. 152-157.
- [7] W. Zhou, C. Lou, Z. Li, L. Lu, and H. Yang, "Current Status of Research on Optimum Sizing of Stand-Alone Hybrid Solar-Wind Power Generation Systems," *Applied Energy*, Vol. 87, Issue 2, hal. 380-389, 2010.
- [8] M.Chandel, G.D.Agrawal, S.Mathur, A.Mathur, "Techno-Economic Analysis of Solar Photovoltaic Power Plant for Garment Zone of Jaipur City", *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 2, hal. 1-7, 2014.
- [9] S.G. Ramadhan dan C.h. Rangkuti, "Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Atap Gedung Harry Tartanto Universitas Trisakti", *Prosiding Seminar Nasional Cendekiawan*, 2016, hal. 22.1-22.11.
- [10] W.D, Ariani, Karnoto, dan B.Winardi, "Analisis Kapasitas dan Biaya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Komunal Desa Kaliwungu Kabupaten Banjarnegara", *Transient*, Vol. 3, No. 2, hal. 158-165, 2014.
- [11] H. Hasan, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Pulau Saugi", *Jurnal Riset dan Teknologi Kelautan*, Vol. 10, No. 2, hal. 169-180, 2012.
- [12] F. Bayrak, N.A. Hamdeh, A.Khaled, Alnefaie, F. Hakan, Öztöp, "A Review on Exergy Analysis of Solar Electricity Production", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 74, hal. 755-770, 2017.

- [13] M. Hankins, *Stand-alone Solar Electric Systems: The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation*, Earthscan, 2010.
- [14] A. Nafeh, "Design and Economic Analysis of a Stand-alone PV System to Electrify a Remote Area Household in Egypt," *Open Renewable Energy Journal*, Vol. 2, hal. 33-37, 2009.
- [15] S. I. Sulaiman, T. K. A. Rahman, I. Musirin, and S. Shaari, "Sizing Grid Connected Photovoltaic System Using Genetic Algorithm," *2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA)*, 2011, pp. 505-509.
- [16] A.K. Shukla, K. Sudhakar, P. Baredar, "Design, Simulation and Economic Analysis of Standalone Roof Top Solar PV System in India", *Solar Energy*, Vol. 136, hal. 437-449, 2016.
- [17] E.T. El Shenawy, A. H. Hegazy and M. Abdellatif, "Design and Optimization of Stand-Alone PV System for Egyptian Rural Communities", *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 12, No. 20, hal. 10433-10446, 2017.
- [18] C.S.Lai, and M.D. McCulloch, "Levelized Cost of Electricity for Solar Photovoltaic and Electrical Energy Storage", *Applied Energy*, Vol. 190, hal. 191-203, 2017
- [19] S. Hamdi dan Sumaryati, "Distribusi Lama Penyinaran Matahari di LPD Sumedang (6,91 °LS dan 107,840 BT) LAPAN", *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVIII HFI Jateng & DIY*, 2014, hal. 153-157.
- [20] A. Ghafoor and A. Munir, "Design and Economics Analysis of an Off-Grid PV System for Household Electrification", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 42, hal. 496-502, 2015.
- [21] N. Agarwal and A. Kumar, "Optimization of Grid Independent Hybrid PV–Diesel–Battery System for Power Generation in Remote Villages of Uttar Pradesh, India", *Energy for Sustainable Development*, Vol 17, Issue 3, hal. 210-219, 2013.