

PERANCANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA HYBRID PHOTOVOLTAIC DAN ANGIN DITINJAU DARI SEGI TEKNIS DAN EKONOMI TEKNIK DI MSTP UNDIP JEPARA

Ahmad Arif Razaqi^{1*)}, Richad Yuven Hariara¹,Jaka Windarta¹ dan Ajub Ajulian Zahra Macrina¹

¹ Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedharto, S.H., Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)} Email: ahmadarifr@students.undip.ac.id

Abstrak

Konsumsi energi di Indonesia masih didominasi oleh energi fosil, yang berpotensi habis dimasa depan. Untuk mendukung program *Net Zero Emission* 2060, diperlukan peningkatan bauran energi primer melalui pemanfaatan pembangkit listrik energi baru terbarukan, seperti tenaga surya dan bayu. Penelitian ini bertujuan untuk merancang PLTH pada gedung MSTP Jepara dengan kajian teknis dan ekonomis. Secara teknis, PLTH dirancang untuk memenuhi 10% kebutuhan listrik tahunan MSTP Jepara dengan konfigurasi optimal. Analisis kelayakan investasi dilakukan berdasarkan *Net Present Cost* (NPC), *Levelized Cost of Electricity* (LCOE), *Return on Investment* (ROI), *Internal Rate of Return* (IRR), *Simple Payback*, dan *Discounted Payback* dalam jangka waktu 20 tahun. Simulasi menggunakan perangkat lunak HOMER menghasilkan konfigurasi optimal dengan 54 modul surya 400 W (8 seri, 7 string), 1 turbin angin 1 kW, dan inverter 25 kW. PLTS menghasilkan 35.595 kWh/tahun dan PLTB 2.275 kWh/tahun, menutupi 10,097% kebutuhan listrik tahunan MSTP Jepara. Hasil analisis ekonomi menunjukkan NPC sebesar Rp 457.709.327,5,-, LCOE sebesar Rp 1.648/kWh, ROI sebesar 9%, IRR 13,1%, *Simple Payback* 6,97 tahun, dan *Discounted Payback* 9,24 tahun. Nilai LCOE yang menurun, nilai investasi EBT yang umumnya memiliki ROI dan IRR 8–25% serta *Simple Payback* dan *Discounted Payback* di bawah 20 tahun, PLTH ini dinyatakan layak untuk diinvestasikan.

Kata Kunci: Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid, energi baru terbarukan, analisis teknis, analisis ekonomi, HOMER.

Abstract

Indonesia's energy consumption is still dominated by fossil fuels, which are depletable in the future. To support the *Net Zero Emission* 2060 program, increasing the renewable energy mix is essential, including solar and wind power plants. This study aims to design a hybrid solar and wind power plant (PLTH) for the MSTP Jepara building with technical and economic feasibility analyses. Technically, the PLTH is designed to meet 10% of MSTP Jepara's annual electricity demand with an optimal configuration. Investment feasibility is assessed using *Net Present Cost* (NPC), *Levelized Cost of Electricity* (LCOE), *Return on Investment* (ROI), *Internal Rate of Return* (IRR), *Simple Payback*, and *Discounted Payback* over 20 years. A simulation using HOMER software results in an optimal configuration of 54 solar modules (400 W each, 8 series, 7 strings), 1 wind turbine (1 kW), and a 25 kW inverter. The solar PV generates 35,595 kWh/year, and the wind turbine 2,275 kWh/year, covering 10.097% of MSTP Jepara's electricity demand. Economic analysis results show NPC of Rp 457,709,327.5, LCOE of Rp 1,648/kWh, ROI of 9%, IRR of 13.1%, *Simple Payback* of 6.97 years, and *Discounted Payback* of 9.24 years. These indicators confirm the investment feasibility of this PLTH system.

Keywords: Hybrid Power Plant, renewable energy, technical analysis, economic analysis, HOMER..

1. Pendahuluan

Energi listrik berperan vital dalam perkembangan teknologi. Pada 2023, konsumsi listrik per kapita Indonesia mencapai 1.337 kWh, meningkat 13,98% dari 2022 [1]. Namun, sebagian besar listrik masih berasal dari sumber tak terbarukan, yaitu 40,46% batu bara, 30,18% minyak bumi, 16,28% gas bumi, dan hanya 13,09% dari energi terbarukan [2]. Penggunaan bahan bakar fosil melepaskan

emisi karbon yang merusak lingkungan dan persediaannya semakin menipis.

Marine Science Techno Park (MSTP) Universitas Diponegoro Jepara merupakan pusat inovasi IPTEK di bidang kelautan yang berfokus pada riset, bisnis maritim, dan produksi udang. Terletak di Teluk Awur, Jepara, MSTP Undip menempati lahan 52 Ha dengan fasilitas

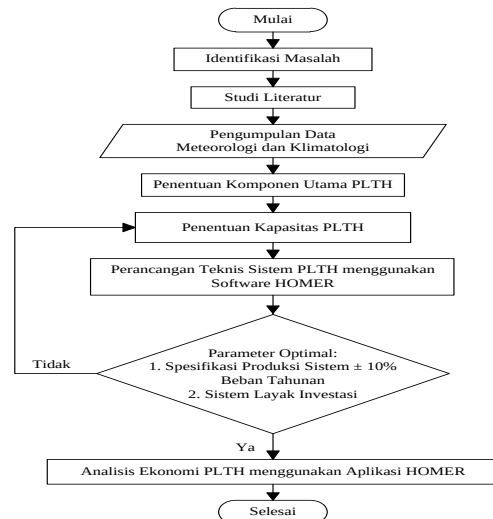
seperti laboratorium, *hatchery*, tambak, pusat konservasi mangrove, dan *student dormitory*. MSTP berlangganan listrik golongan P-1/TR (197 kVA) dengan biaya listrik mencapai Rp 45–50 juta/bulan [3]. Kenaikan tarif listrik dan ketergantungan pada bahan bakar fosil menuntut optimalisasi Energi Baru dan Terbarukan (EBT) sebagai sumber energi berkelanjutan di kawasan ini. Indonesia berkomitmen mengurangi emisi karbon melalui ratifikasi Paris *Agreement* dalam UU No. 16 Tahun 2016. Target penurunan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dalam *Nationally Determined Contribution* (NDC) 2030 ditetapkan sebesar 29% tanpa syarat dan 41% bersyarat. Pada 2022, target ini direvisi dalam *Enhanced Nationally Determined Contribution* (ENDC) menjadi 31,89% tanpa syarat dan 43,20% bersyarat. Indonesia menargetkan *net zero emission* pada 2060 atau lebih cepat [4].

Pemanfaatan sumber daya alternatif diperlukan untuk menggantikan BBM, gas, dan batu bara dengan energi surya, angin, air, dan panas bumi. Indonesia memiliki potensi energi surya dengan radiasi rata-rata 4,8 kWh/m²/hari dan variasi bulanan 9%, memastikan ketersediaan sepanjang tahun. Energi angin layak dikembangkan pada wilayah dengan kecepatan minimal 4 m/detik [5], seperti NTT, NTB, Sulawesi Selatan dan Tenggara, serta Pantai Utara dan Selatan Jawa. Teluk Awur, Jepara dipilih sebagai objek penelitian potensi energi alternatif di Pantai Utara Jawa. MSTP Jepara, sebagai kawasan pesisir, memiliki potensi energi surya dengan *Global Horizontal Irradiance* (GHI) sebesar 5.480 kWh/m²/hari berdasarkan data NASA POWER [6]. Survei pada 29 Oktober 2022 menunjukkan kecepatan angin maksimum 4,4 m/s pada ketinggian 2 meter, sementara data NASA mencatat kecepatan rata-rata 4,4 m/s pada 10 meter [7]. MSTP Jepara turut berpartisipasi dalam upaya percepatan tujuan pembangunan berkelanjutan atau SDGs (*Sustainable Development Goals*) [8]. Salah satu aspek dalam pengembangan tersebut ada di bidang energi. Manajemen Energi di MSTP Jepara yang baik harus sesuai dan berdasar dengan prinsip ketahanan energi. Ketahanan energi berperan penting dalam mendukung pembangunan nasional yang berkelanjutan. Ketahanan energi memiliki 3 aspek utama yaitu: Ketersediaan sumber energi, Keterjangkauan pasokan energi, dan Pengembangan energi baru terbarukan [9]. Pengembangan Energi Baru Terbarukan di MSTP Jepara perlu dilakukan dalam rangka optimasi pasokan penyediaan sumber energi. Berdasarkan potensi energi surya dan angin, perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH) dapat membantu kemandirian energi MSTP Jepara. Selain itu, PLTH dapat mendukung kawasan ini sebagai wisata edukasi, meningkatkan kesadaran akan energi terbarukan, serta menjadi model bagi instansi lain.

2. Metode

2.1. Perancangan dan Simulasi

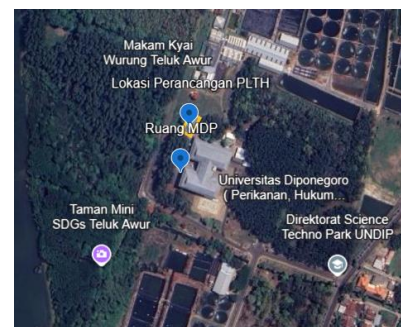
Diagram alir Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid *Photovoltaic* Dan Angin Ditinjau Dari Segi Teknis Dan Ekonomi di MSTP Park Undip Jepara dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir perancangan

2.2. Lokasi Penelitian

Lokasi yang dipilih untuk perencanaan PLTH adalah MSTP Jepara yang terletak di wilayah Teluk Awur, Kecamatan Tahunan, Kabupaten Jepara, Jawa Tengah. Titik koordinat lokasi tersebut adalah 6°37'12" LS 110°38'24" BT, lokasi perancangan PLTH ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Lokasi penelitian

2.3. Data Meteorologi

2.3.1. Intensitas Iradiasi Matahari

Iradiasi matahari merupakan salah satu parameter utama untuk perencanaan perancangan PLTS [10]. Data iradiasi matahari di lokasi penelitian diperoleh melalui penyedia

data meteorologi NASA POWER. Iradiasi tiap bulan di MSTP Jepara ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Iradiasi matahari di MSTP Jepara

Bulan	Iradiasi Matahari (kWh/m ² /hari)
Januari	4,22
Februari	4,53
Maret	5,43
April	5,52
Mei	5,5
Juni	5,27
Juli	5,73
Agustus	6,41
September	6,8
Oktober	6,4
November	5,33
Desember	4,61
Rata-rata	5,48

NASA POWER Renewable Energy Data

2.3.2. Kecepatan dan Arah Angin

Kecepatan dan arah angin sangat berpengaruh dalam perencanaan PLTB untuk memilih kapasitas turbin angin dan tipe turbin angin yang akan dipakai dalam perancangan. Kesalahan pemilihan kapasitas dan tipe turbin angin sangat mempengaruhi daya keluaran yang dihasilkan oleh turbin angin tersebut [11]. Data kecepatan dan arah angin di lokasi penelitian diperoleh dari penyedia data *agrocimatology* NASA POWER. Kecepatan dan arah angin di MSTP Jepara ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kecepatan dan arah angin di MSTP Jepara

Bulan	Arah Angin	Kecepatan Angin (m/s)
Januari	288,56° (↻)	4,98
Februari	296,62° (↻)	5,17
Maret	293,56° (↻)	3,27
April	60,06° (↗)	3,45
Mei	75,75° (↗)	3,91
Juni	103,96° (↘)	4,84
Juli	112,75° (↘)	4,95
Agustus	114° (↘)	5,2
September	109,19° (↘)	4,37
Oktober	231,12° (↙)	3,9
November	309,38° (↻)	3,03
Desember	296,88° (↻)	5,68
Rata-rata		4.40

NASA POWER Renewable Energy Data

2.3.3. Penggunaan Listrik Tahunan

Penggunaan listrik tahunan gedung MSTP Jepara ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Penggunaan listrik tahunan gedung MSTP Jepara

Bulan	kWh/Bulan	kW/Bulan
Januari	30.910	41,546
Februari	32.625	46,875
Maret	27.678	37,202
April	30.627	42,538
Mei	24.724	33,231
Juni	36.332	50,461
Juli	37.923	50,972
Agustus	15.727	21,138
September	19.944	27,700
Oktober	32.868	44,177
November	42.761	59,390
Desember	40.981	55,082
Rata – rata	31.091,67	42,526

2.4. Penentuan Komponen Utama

2.4.1. Komponen Utama PLTS

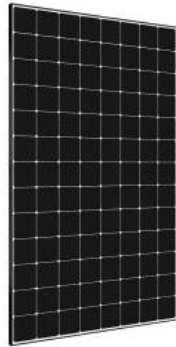
Menentukan kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah langkah penting dalam perencanaan sistem untuk memastikan bahwa instalasi dapat memenuhi kebutuhan energi secara efisien. Penentuan kapasitas PLTS melibatkan analisis kebutuhan energi, potensi sumber daya surya, dan faktor teknis lainnya [12]. Dalam perancangan ini, dipilih Modul Surya dari Pabrikan Sun Power jenis SPR-400-WHT-D yang memiliki kapasitas 400Wp. Spesifikasi modul surya didefinisikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Spesifikasi modul surya SPR-400-WHT-D

<i>Electrical</i>	
Rated Maximum Power (P _{max})	400Wp
Open Circuit Voltage (V _{oc})	85.3 V
Short Circuit Current (I _{sc})	5.87 A
Maximum Power Voltage (V _{mp})	72.9 V
Maximum Power Current (I _{mp})	5.49 A
Power Density (W/mm ²)	185,18
Nominal Operating Cell Temperature (°C)	45,8
Temperature Coefficient of P _{max} (%/°C)	-0,353/ °C
Temperature Coefficient of V _{OC} (%/°C)	-0,229 / °C
Temperature Coefficient of I _{SC} (%/°C)	0,031 / °C

Solar Design Tool

Tampilan modul surya Trina Solar SPR-400-WHT-D ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Modul surya Trina Solar SPR-400-WHT-D

Rata-rata beban bulanan MSTP Jepara adalah 42,526 kW, diperoleh dari total konsumsi tahunan dibagi 12 bulan. Setelah pembulatan, rata-rata beban bulanan gedung adalah 42.526 W. Perhitungan jumlah panel surya yang dibutuhkan ditunjukkan pada persamaan 1.

$$\text{Jumlah Modul} = \frac{\text{Daya rata – rata array surya (Wp)}}{\text{Kapasitas Modul (Wp)}} \quad (1)$$

Dalam Perancangan ini, Modul surya yang digunakan memiliki daya *output* 400Wp. Maka, jumlah modul yang diperlukan adalah:

$$\text{Jumlah Modul} = \frac{42.526 \text{ WP}}{400 \text{ WP}}$$

$$\text{Jumlah Modul} = 106,315$$

$$\text{Jumlah Modul} \approx 107 \text{ buah modul}$$

Diperlukan 107 modul surya, dengan kapasitas inverter ditentukan berdasarkan DC/AC ratio ideal (~1,25) [13]. Perhitungan kapasitas inverter ditunjukkan pada Persamaan 2 sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{DC/AC Ratio} &= \frac{\text{Kapasitas puncak array surya (kWDC)}}{\text{Kapasitas Inverter (kWAC)}} \quad (2) \\ 1.25 &= \frac{42,526}{\text{Kapasitas Inverter (kWAC)}} \\ \text{Kapasitas Inverter} &= \frac{42,526}{1.25} \\ \text{Kapasitas Inverter} &= 34,02 \text{ kW AC} \end{aligned}$$

Perhitungan menunjukkan kebutuhan inverter minimal 33,6 kW, sehingga digunakan dua inverter 25 kW. Dipilih Huawei SUN2000-25KTL-M5 dengan kapasitas 25.000 W

untuk PLTS. Spesifikasi inverter ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Spesifikasi inverter SUN2000-25KTL-M5

Input	
Max DC input power	37.500 W
Max DC input voltage	1100 V
Max input current per MPPT	20 A
Max short-circuit current per MPPT	40 A
Min startup voltage	200 V
MPPT voltage range	200 – 1000 V
Full-load MPPT voltage range	530 – 800 V
Rated input voltage	600 V
Output	
Rated output power	25.000 W
Rated output voltage	380 V, 3W/N+PE
Rated output current	38 A
Max outpur current	42 A
Frekuensi	50/60 Hz
Faktor daya	0.8
Efisiensi maksimum	98,4%

Dalam penentuan jumlah modul surya dalam *string*, diperlukan perhitungan $V_{oc,max}$ dan $I_{sc,max}$ menyesuaikan kondisi lingkungan lokasi perancangan secara aktual [14], dengan menggunakan persamaan 3, 4, dan 5 sebagai berikut.

$$T_{\text{module,max}} = T_{\text{air,max}} + \frac{\text{NOCT} - 20}{80} \times 100 \quad (3)$$

$$T_{\text{module,max}} = 38,4 + \frac{45 - 20}{80} \times 100$$

$$T_{\text{module,max}} = 38,4 + \frac{45 - 20}{80} \times 100$$

$$T_{\text{module,max}} = 69.65 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$V_{oc,max} = V_{oc} + \left(T_{\text{coef},V_{oc}} \times V_{oc} \times (T_{\text{module,min}} - 25^{\circ}\text{C}) \right) \quad (4)$$

$$V_{oc,max} = 85,3 + (-0.00229 \times 85,3 \times (20,1 - 25))$$

$$V_{oc,max} = 86,26 \text{ V}$$

$$I_{sc,max} = I_{sc} + \left(T_{\text{coef},I_{sc}} \times I_{sc} \times (T_{\text{module,max}} - 25^{\circ}\text{C}) \right) \quad (5)$$

$$I_{sc,max} = 5,74 + (0,00031 \times 5,74 \times (69,65 - 25))$$

$$I_{sc,max} = 5,82 \text{ A}$$

Perhitungan di atas menggunakan parameter pada Tabel 3 menggunakan persamaan 3, 4, dan 5, didapatkan bahwa nilai $V_{oc,max}$ adalah 86,26 V dan $I_{sc,max}$ adalah 5,82 A. Untuk menghitung banyak modul per *string* dan jumlah *string* digunakan persamaan 6 dan 7.

$$\text{Modul per string} = \frac{V_{MPPT,max}}{V_{oc,max}} \quad (6)$$

$$\text{Modul per string} = \frac{820}{86,26}$$

$$\text{Modul per string} = 9,50$$

$$\text{Modul per string} \approx 9$$

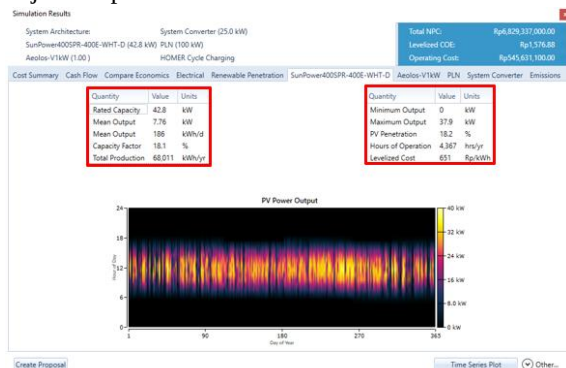
$$\text{Modul per string} = \frac{V_{MPPT,max}}{V_{oc,max}} \quad (7)$$

$$\text{Jumlah string} = \frac{107}{9}$$

$$\text{Jumlah string} = 11,88$$

$$\text{Jumlah string} \approx 12$$

Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan bahwa maksimal modul setiap *string*-nya adalah 9 modul dan untuk jumlah *string* juga sebanyak 9 *string*. Berdasarkan simulasi pada aplikasi HOMER dengan menggunakan persamaan 1 – 7 didapatkan hasil produksi listrik yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil simulasi berdasarkan hasil perhitungan

Gambar 4 menunjukkan produksi listrik *array* surya sebesar 7,76 kW/tahun atau 68.011 kWh/tahun, memenuhi 18,2% kebutuhan listrik MSTP Jepara (373.100 kWh/tahun), melebihi target EBT 10%. Untuk mengurangi biaya investasi, optimasi dengan HOMER menentukan kebutuhan 56 panel surya 400Wp. Konfigurasi optimal menggunakan 7 *string*, masing-masing 8 modul surya, agar distribusi panel merata tanpa melebihi batas maksimum per *string*.

2.4.2. Komponen Utama PLTB

Pemilihan turbin angin bergantung pada arah angin di lokasi. HAWT cocok untuk angin konstan, sedangkan VAWT lebih sesuai untuk angin berubah-ubah, meskipun efisiensinya lebih rendah. Dipilih turbin AeolosV-1kW (1000 W), dengan spesifikasinya ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Spesifikasi turbin angin AeolosV-1kW

Parameter	Nilai
Started wind speed (m/s)	1.5 (m/s)
Cut-in wind speed (m/s)	2.5 (m/s)
Rated Wind speed (m/s)	10 (m/s)
Tegangan nominal (DC)	110/220 V
Daya nominal (W)	1000 W
Daya maksimal (W)	1500 W
Berat kotor (kg)	78 kg
Tinggi bilah (m)	1 m
Safe wind speed (m/s)	50 (m/s)
Jumlah bilah	3
Bahan bilah	Alluminium alloy
Generator	Magnet permanen tiga fase
Sistem kendali	Rem Hidrolik
Mount Height (m)	2 ~ 12 m (9 m)
Tingkat perlindungan generator	IP54

Tampilan turbin angin sumbu vertikal AeolosV-1kW ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Turbin angin AeolosV-1kW

Grid tie inverter merupakan pabrikan SMA tipe SMA Windy Boy 1200 dengan kapasitas 1200 W untuk PLTB, spesifikasi inverter SMA Windy Boy 1200 ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Spesifikasi inverter SMA Windy Boy 1200

Input	
Max DC input power	1320 W
Max DC input voltage	400 V
DC Nominal Voltage	120 V
Max DC Input current	12,6 A
Operating Range	100-400 V
Power ON / OFF Voltage	200V / 300V
Output	
AC Nominal Power	1200 W
Max Output Current	6,1 A
Nominal AC Voltage	220V, 230V, 240V
AC Operating Range	180 – 260 V
Frekuensi	50/60 Hz
Fasa	1 fasa
Power factor	1
Arus maksimum	38 A
Efisiensi maksimum	92.1%

Kapasitas turbin angin diminimalkan karena biaya investasi tinggi dan efisiensi rendah di kondisi angin Indonesia. Digunakan 1 turbin AeolosV-1kW dengan generator AC dan sistem pengereman bawaan. Keluaran turbin disalurkan ke inverter SMA Windy Boy 1200 W.

2.5. Penentuan Komponen Pendukung

2.5.1 Komponen Pendukung PLTS

a. Kabel DC dan Konektor

Arus keluaran tiap *string* sama dengan *maximum power current* (I_{mp}) karena penyambungan seri tidak mengubah arus [15]. Luas penampang kabel dihitung menggunakan persamaan 8

$$A = \frac{I_{mp}}{J} \quad (8)$$

Dimana J merupakan arus aman untuk kabel tembaga (sekitar 4 – 6 A/mm²), maka:

$$A = \frac{5,49 \text{ A}}{5 \text{ A/mm}^2}$$

$$A = 1,098 \text{ mm}^2$$

Berdasarkan perhitungan, luas penampang minimal kabel yang dibutuhkan adalah 1,098 mm², sehingga dipilih kabel LEONI 4 mm². Panjang kabel yang dibutuhkan meliputi:

- Kabel antar panel: 12 meter per *string*, dengan 7 *string*, total 84 meter.
- Kabel dari *string* ke combiner box: 40 meter per *string*, total 280 meter.
- Kabel dari combiner box ke inverter: 10 meter.

Sehingga total kabel DC yang dibutuhkan adalah 374 meter. Tampilan kabel LEONI 4 mm² ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Kabel DC merek Leoni

Konektor dibutuhkan untuk menyambungkan panel surya, pada sistem ini digunakan konektor MC4, jumlah konektor MC4 yang dibutuhkan adalah sebanyak 56 pasang (*male* dan *female*) ditambah 7 pasang konektor dari tiap *string* untuk disambungkan ke *combiner box*, sehingga total konektor MC4 yang dibutuhkan adalah sebanyak 63 pasang atau sebanyak 126 konektor. Konektor yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Konektor MC4

b. Combiner Box

Sistem yang dirancang menggunakan konfigurasi 8 seri untuk meningkatkan tegangan total, yang dihitung menggunakan persamaan 9 sebagai berikut.

$$V_{Total} = V_{mp} \times \text{Jumlah seri} \quad (9)$$

$$V_{Total} = 72,9 \text{ V} \times 8$$

$$V_{Total} = 583,2 \text{ V}$$

Dengan arus tiap *string* 5,49 A, digunakan *combiner box* SANDI PVB-12 yang dapat menggabungkan hingga 12 *string*. *Combiner box* ini dilengkapi dengan SPD DC 1000V-40KA/2P, *circuit breaker* PV DC 1000V/4P dari Schneider, dan sekering DC 1000V *withstand voltage fuse*. Spesifikasi *combiner box* SANDI PVB-12 ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Spesifikasi *combiner box* Sandi PVB-12

Input	
Max. PV Array Input String	12
Max. PV Array Voltage	1000 VDC
Each String Input Rated Current	10A / 15A
Input Over Current Fuse	Yes
Anti-Reverse Module Protection	Yes
Input Connector	PG9 Cable Grand
Output	
Output String	1 (Costumized)
Rated Output Current	120A / 180A
Output DC Circuit Breaker	Yes
Surge Protection Device	Yes
Output Connector	PG21 Cable Grand

Tampilan *Combiner Box* Sandi tipe Sandi PVB-12 ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. *Combiner Box* Sandi PVB-12

c. Kabel AC

Keluaran inverter berupa arus AC, dan kabel AC yang digunakan dihitung berdasarkan daya total yang dikeluarkan sistem menggunakan persamaan 10.

$$\begin{aligned}
 P_{\text{Total}} &= P_{\text{max panel}} \times \text{jumlah panel seri} \\
 &\quad \times \text{jumlah string} \\
 P_{\text{Total}} &= 400 \text{ W} \times 8 \times 7 \\
 P_{\text{Total}} &= 22.400 \text{ W} = 22,4 \text{ kW}
 \end{aligned} \quad (10)$$

Setelah daya total sistem dihitung, arus keluaran inverter dapat dihitung menggunakan persamaan 11.

$$I = \frac{P}{V \times \sqrt{3} \times \text{Faktor Daya}} \quad (11)$$

Dengan asumsi faktor daya = 1, arus keluaran dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{22.400 \text{ W}}{380 \text{ V} \times \sqrt{3} \times 1} \\
 I &\approx 33,9 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan, kabel AC yang digunakan adalah NYHY 6 mm² dari *First Cable*, mampu menangani arus 33,9 A pada 380 VAC. Jarak antara inverter dan titik penyambungan MDP adalah 10 meter, sehingga total panjang kabel yang dibutuhkan adalah 10 meter. Tampilan kabel *first cable* 6 mm² ditunjukkan pada Gambar 9 sebagai berikut.



Gambar 9. Kabel AC merek First Cable

d. MCB

MCB dipilih dengan arus nominal 125% hingga 150% dari arus beban utama untuk menghindari pemutusan yang tidak perlu, dihitung menggunakan persamaan 12.

$$\begin{aligned}
 I_{\text{nominal}} &= I_{\text{beban}} \times 1,5 \\
 I_{\text{nominal}} &= 33,9 \times 1,5 \\
 I_{\text{nominal}} &= 50,9 \text{ A}
 \end{aligned} \quad (12)$$

Berdasarkan hasil perhitungan di atas MCB yang digunakan adalah MCB 3 fasa 50A dari pabrikan Acti9 dengan model Acti9 IC60.

2.5.2 Komponen Pendukung PLTB

a. Kabel DC dan Konektor

Daya turbin angin 1000 W dengan tegangan *output* 220 VDC menghasilkan arus *output* yang dihitung menggunakan persamaan 13.

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{P}{V} \\
 I &= \frac{1000}{220} \\
 I &= 4,55 \text{ A} \approx 4,6 \text{ A}
 \end{aligned} \quad (13)$$

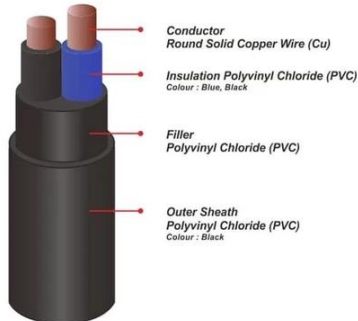
Untuk mengurangi loss tegangan, digunakan kabel DC 4 mm² merek LEONI sepanjang 40 meter (20 meter untuk masing-masing sumbu positif dan negatif).

b. Kabel AC

Daya inverter sebesar 1200 W dengan tegangan *output* 220 VAC, maka dapat dihitung arus *output* menggunakan persamaan 4.13 diatas maka,

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{1200}{220} \\
 I &= 5,45 \text{ A} \approx 5,5 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Untuk menampung arus hingga 4,54 A, digunakan kabel NYY 2 x 4 mm² merek Pulung dengan panjang 20 meter. Kabel AC merek Pulung diperlihatkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Kabel AC merek Pulung

c. MCB dan SPD

MCB dipilih dengan arus nominal 125% hingga 150% dari arus beban utama untuk menghindari pemutusan saat lonjakan kecil, sesuai dengan perhitungan pada persamaan 12.

$$I_{\text{nominal}} = 6 \times 1,5$$

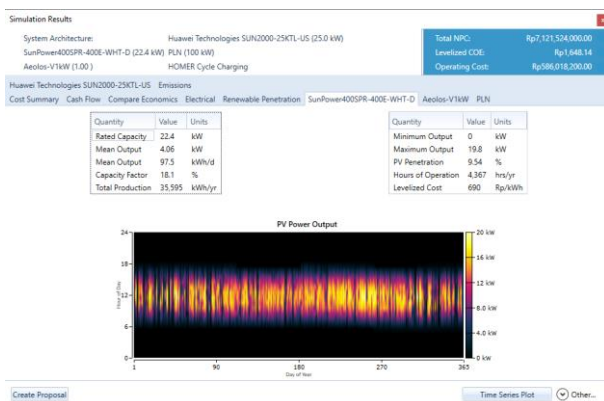
$$I_{\text{nominal}} = 9 \text{ A}$$

Berdasarkan perhitungan, digunakan MCB 1 fasa 20 A dari Schneider (model Easy 9) dan SPD dengan tegangan kerja 250 VDC dari Funelec (model DC SPD 2P 250V 20 kA ~ 40 kA).

3. Hasil dan Analisis

3.1. Hasil Produksi Listrik

Hasil produksi listrik yang dihasilkan oleh modul surya dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Hasil produksi listrik modul surya

Hasil produksi listrik dari sistem modul surya dengan kapasitas terpasang 22,4 kW menghasilkan rata-rata 4,06 kW atau 97,5 kWh per hari, dengan *capacity factor* 18,1%. Total produksi tahunan mencapai 35.595 kWh, dengan

biaya produksi 690 Rp/kWh. Sistem beroperasi selama 4.367 jam per tahun dan menghasilkan keluaran maksimum 19,8 kW pada waktu tertentu. Penetrasi energi surya mencapai 9,54%, mencerminkan kontribusi yang masih dapat ditingkatkan untuk mengurangi ketergantungan pada energi fosil dan mendukung keberlanjutan energi terbarukan. Hasil produksi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Hasil produksi listrik turbin angin

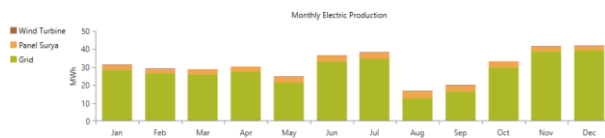
Turbin angin 1 kW menghasilkan rata-rata 0,26 kW (6,24 kWh/hari) dengan *capacity factor* 26%. Selama setahun, turbin menghasilkan 2.275 kWh dan beroperasi 7.918 jam. Biaya produksi listriknya adalah 5.471 Rp/kWh, dengan tingkat penetrasi 0,61% dalam sistem pembangkit. Meskipun kontribusinya kecil, turbin angin penting untuk diversifikasi energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan pada fosil. Peningkatan teknologi diharapkan dapat meningkatkan kontribusinya di masa depan. Total produksi listrik berdasarkan aplikasi HOMER ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil Produksi listrik berdasarkan simulasi

Produksi	kWh/tahun	%
Modul Surya	35.595	9,49
Turbin Angin	2.275	0,607
Pembelian Grid	337.033	89,9
Total	374.902	100

Tabel 9 menunjukkan hasil simulasi produksi listrik dari PLTS dan PLTB. PLTS menghasilkan 35.595 kWh/tahun (9,49% dari beban tahunan), sementara PLTB menghasilkan 2.275 kWh/tahun (0,607%). Total produksi listrik gabungan mencapai 37.870 kWh/tahun, setara dengan 10,097% dari total beban tahunan gedung MSTP Jepara. Ini menunjukkan bahwa 10% kebutuhan energi dapat dipenuhi dengan energi terbarukan, mengurangi ketergantungan pada energi fosil dan mendukung

keberlanjutan. Hasil produksi tiap bulan ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Grafik hasil produksi listrik tiap bulan

3.2. Analisis Ekonomi

3.2.1 Biaya Investasi Awal

Biaya Investasi Awal pada perancangan PLTH *photovoltaic* dan *wind turbine* di MSTP Jepara dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Biaya investasi awal perancangan PLTH

Nama Komponen	Harga	Jumlah	Satuan	Harga
Panel Surya SPR-400-WHT-D	Rp 2.400.000,-	54	Unit	Rp 129.600.000,-
Turbin Angin AeolosV-1kW	Rp 70.624.865,-	1	Unit	Rp 70.624.865,-
Inverter SUN2000-25KTL-M5	Rp 22.645.220,-	1	Unit	Rp 22.645.220,-
Rangka Panel Surya	Rp 27.000.000,-	1	Set	Rp 27.000.000,-
DC Combiner box	Rp 5.712.000,-	1	Unit	Rp 5.712.000,-
Inverter SMA Windy Boy 1200	Rp 14.000.000,-	1	Unit	Rp 14.000.000,-
Kabel DC 1 x 4mm ²	Rp 18.500,-	374	Meter	Rp 6.919.000,-
Kabel AC 5 x 6 mm ²	Rp 145.000,-	10	Meter	Rp 1.450.000,-
Konektor MC4	Rp 6.000,-	63	Pasang	Rp 378.000,-
MCB 3 Fasa 50A	Rp 350.000,-	1	Unit	Rp 350.000,-
Kabel AC 2 x 4 mm ²	Rp 23.250,-	20	Meter	Rp 465.000,-
Kabel DC 1 x 4 mm ²	Rp 18.500,-	40	Meter	Rp 740.000,-
SPD DC 250V	Rp 288.000,-	3	Unit	Rp 288.000,-
MCB 1 Fasa 10A	Rp 50.000,-	2	Unit	Rp 100.000,-
Operasional dan Maintenance	Rp 15.000.000,-	1	Tahun	Rp 15.000.000,-
Instalasi dan Perizinan	Rp 55.000.000,-	1	Unit	Rp 55.000.000,-
Total				Rp 334.647.220,-

Kurs 30 Januari 2025

3.2.2 Analisis Ekonomi PLTH

Hasil analisis ekonomi perancangan pembangkit listrik tenaga *hybrid* berdasarkan simulasi pada aplikasi HOMER dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 11. Analisis ekonomi

Parameter	Nilai
Net Present Cost (Rp)	Rp 457.709.327,5,-
Levelized Cost of Electricity (Rp/kWh)	Rp 1.648,-
Present Worth (Rp)	Rp 221.429.700,-
Annual Worth (Rp/tahun)	Rp 19.121.280,-
Return on Investment (%)	9%

Internal rate of return (%)	13,1%
Simple payback (tahun)	6,97 tahun
Discounted Payback (tahun)	9,24 tahun

Tabel 11 menunjukkan hasil analisis ekonomi sistem pembangkit listrik energi terbarukan. Sistem ini memiliki *net present cost* (NPC) sebesar Rp 457.709.327,5,- dan *levelized cost of electricity* (LCOE) Rp 1.648/kWh, lebih rendah dari harga beli normal Rp 1.699,58/kWh, sehingga proyek layak secara ekonomi. Nilai *present worth* (PW) sebesar Rp 221.429.700,- dan *annual worth* Rp 19.121.280,- per tahun menunjukkan manfaat ekonomi yang positif. *Return on investment* (ROI) tercatat 9%, dan *internal rate of return* (IRR) sebesar 13,1%, yang menunjukkan kelayakan investasi. Periode *simple payback* selama 6,97 tahun, dengan periode *discounted payback* selama 9,24 tahun, menunjukkan keuntungan mulai tahun ke-9.

4. Kesimpulan

Simulasi perancangan PLTH menggunakan HOMER menghasilkan produksi listrik sebesar 35.595 kWh/tahun (9,49%) dari modul surya dan 2.275 kWh/tahun (0,607%) dari turbin angin, dengan total kebutuhan listrik gedung MSTP Jepara sebesar 374.902 kWh/tahun. Secara keseluruhan, kedua sistem ini dapat memenuhi 10,097% dari total kebutuhan listrik tahunan gedung. Analisis ekonomi PLTH menunjukkan kelayakan investasi dengan parameter *Net Present Cost* (NPC) Rp 457.709.327,5,-, *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) Rp 1.648/kWh, *Present Worth* Rp 221.429.700,-, *Annual Worth* Rp 19.121.280,-, *Return on Investment* (ROI) 9%, *Internal Rate of Return* (IRR) 13,1%, *Simple Payback* 6,97 tahun, dan *Discounted Payback* 9,24 tahun.

REFERENSI

- [1] A. C. Adi, "Konferensi Pers Capaian 2023, Konsumsi Listrik Per Kapita Lebih Target," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Diakses: 21 Maret 2024.
- [2] A. C. Adi, "Pemerintah Kejar Target Tingkatkan Bauran EBT," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Diakses: 21 Maret 2024. [Daring].
- [3] D. Denis, J. Windarta, V. Prasetya, G. D. Nathania, R. J. Hariara, dan A. A. Razaqi, "Grand Design and Economic Analysis of Solar-Wind Hybrid Renewable Energy Systems in MSTP Jepara," *Infotekmesin*, vol. 15, no. 1, hal. 91–98, 2024.
- [4] R. Santoso, "Upaya pengurangan emisi dan insentif karbon," Pusat Analisis Keparlemenan Badan Keahlian Setjen DPR RI.
- [5] S. A. Prahastono, A. A. Setiawan, dan W. Wilopo, "Perancangan pemanfaatan energi baru terbarukan berbasis tenaga hibrida untuk meningkatkan rasio elektrifikasi (studi kasus: Kecamatan tulakan, kabupaten pacitan)," *J. Altron; J. Electron. Sci. Energy Syst.*, vol. 2, no. 02, hal. 18–29, 2023.
- [6] "Data Iradiasi Matahari," National Aeronautics and Space Administration. [Daring]. Tersedia pada:
- [7] "Data Kecepatan Angin," National Aeronautics and Space Administration. [Daring]. Tersedia pada:
- [8] "Taman Mini SDGs di MSTP Undip Jepara sebagai Wahana Baru Pembelajaran Green Economy di Indonesia," SDGs CENTER UNDIP.
- [9] S. Herindrasti, B. Angelina, dan P. Putriwinata, "Pengembangan Kebijakan Energi Terbarukan Di Indonesia, Vietnam, Dan Laos," *Sospol*, vol. 10, no. 2, hal. 154–172, 2024.
- [10] M. Paisal, I. N. Setiawan, I. N. S. Kumara, I. A. Dwi, I. Girantari, dan C. G. I. Partha, "PERANCANGAN PLTS TERAPUNG DI BENDUNGAN SIDAN KABUPATEN BADUNG," *J. SPEKTRUM Vol*, vol. 11, no. 1, 2024.
- [11] A. D. Korawan, "Modifikasi Rotor Turbin Angin Savonius Tipe-L," *Pros. Sains Nas. dan Teknol.*, vol. 14, no. 1, hal. 279–282, 2024.
- [12] D. Susanto, T. H. Nufus, dan C. S. Abadi, "Analisis Kebutuhan Energi PLTS Off Grid untuk Pengeringan Biji Kopi Menggunakan Oven pada Industri Rumahan," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin*, 2024, hal. 32–41.
- [13] M. S. N. Rega, N. Sinaga, dan J. Windarta, "Perencanaan PLTS rooftop untuk kawasan pabrik teh PT Pagilaran Batang," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 9, no. 4, hal. 888, 2021.
- [14] Y. VERNANDO, "ANALISIS TEKNIS DAN DAN EKONOMI TEKNOLOGI SEMI TRANSPARENT PHOTOVOLTAIC (STPV) TERINTEGRASI GREENHOUSE DI INDONESIA." UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU, 2021.
- [15] K. N. P. SIBARANI, "ANALISIS EFISIENSI OUTPUT PANEL SURYA TERHADAP PERUBAHAN INTENSITAS RADIASI MATAHARI PADA PANEL SURYA DI PLTS 2 KWP UHN MEDAN," 2023.