

Evaluasi Hasil Kinerja Tekno-Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Pada Bangunan Perguruan Tinggi di Indonesia

Luthfansyah Mohammad⁽¹⁾, Aulia Istiqomah⁽²⁾, Ahmad R. H. Tahier⁽³⁾, Dhani N.I Syamputra⁽⁴⁾, Lisa Yihaa Roodhiyah⁽⁵⁾

Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi, Sekolah Vokasi
Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudarto No.13, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah,
Indonesia

Email: ¹Luthfan48@lecturer.undip.ac.id, ²auliaistiqomah@lecturer.undip.ac.id,
³ridlohanifudin@lecturer.undip.ac.id, ⁴dhnsyamputra@lecturer.undip.ac.id,
⁵lisayihaa@lecturer.undip.ac.id

Tersedia Online di

<http://www.jurnal.unublitar.ac.id/index.php/briliant>

Sejarah Artikel

Diterima pada 20 Maret 2023
Disetujui pada 27 Mei 2023
Dipublikasikan pada 30 Mei 2023
Hal. 496-510

Kata Kunci:

Asesmen Energi; Ekonomi Energi;
Simulasi Pvsyst; Sistem Tenaga; Tenaga Surya

DOI:

<http://dx.doi.org/10.28926/briliant.v8i2.1360>

Abstrak: Dimulainya kegiatan sekolah normal dan universitas membuat sektor pendidikan mengalami peningkatan konsumsi listrik dibandingkan tahun-tahun sebelumnya sebelum merebaknya pandemi. Sayangnya, peningkatan konsumsi listrik berbanding lurus dengan peningkatan emisi yang besar. Oleh karena itu, diperlukan penggunaan teknologi energi terbarukan yang ramah lingkungan yang dapat langsung diterapkan di bidang pendidikan. Studi ini berfokus pada evaluasi kinerja sistem panel surya yang telah terpasang di Gedung Dekanat Universitas Diponegoro, Indonesia. Dua metode digabungkan dalam melakukan analisis; Simulasi perangkat lunak PVsyst Versi 7.0, dan penilaian langsung. Hasil asesmen lapangan menunjukkan bahwa sistem yang terpasang mampu menghasilkan energi sebesar 37.068 MWh per tahun dan hanya memiliki selisih sebesar 3.372 MWh saat disimulasikan. Terdapat kerugian sebesar 2,02% dari nilai produksi ideal yang disebabkan oleh beberapa faktor klimatologis dan teknis. Secara umum dengan target penghematan

energi sebesar 16,6%, sistem yang dibangun berhasil mencapai 16,51%. Analisis kelayakan ekonomi menunjukkan bahwa nilai *Levelized Cost of Electricity* adalah Rp. 1.153,93 per kWh, nilai *Payback Period* 9,4 tahun, *Net Present Value* sekitar Rp. 364.331.588,4, dan *Return of Investment* sebesar 102,1%. Akhirnya, berdasarkan penilaian evaluasi, dapat diputuskan bahwa secara teknis sistem dapat bekerja dengan lancar sesuai target yang ditentukan, memiliki proyeksi ekonomi yang menguntungkan, dan memiliki potensi nilai investasi yang positif.

PENDAHULUAN

Sektor pendidikan yang terdiri dari sekolah dan universitas merupakan salah satu kelompok pelanggan tetap PLN yang diprediksi akan mengalami peningkatan konsumsi listrik dibandingkan beberapa tahun terakhir. Hal ini disebabkan dimulainya kembali kegiatan pembelajaran tatap muka yang selama 2 tahun terakhir dilakukan secara daring. Pada saat yang sama, peningkatan konsumsi

energi listrik juga meningkatkan emisi Gas Rumah Kaca (GRK). Oleh karena itu, peningkatan penggunaan energi terbarukan diperlukan untuk mengurangi ketergantungan listrik dari energi fosil, sekaligus memenuhi kebutuhan energi listrik sektor pendidikan.

Dalam satu dekade terakhir, pengembangan teknologi energi terbarukan, khususnya energi surya, telah dilakukan secara masif. Besarnya potensi energi surya menjadi salah satu alasannya. Letak geografisnya yang berada di garis khatulistiwa membuat Indonesia memiliki rata-rata intensitas radiasi matahari harian sekitar 4,8 kWh/m² atau setara dengan 112.000 GWp (Fuera & Red, 2021; IRENA, 2018). Namun hingga September 2021 baru sekitar 150 MWp energi matahari yang telah dimanfaatkan atau 0,08% dari potensi yang ada (IRENA, 2018, 2019; Renewable & Agency, 2022). Pemerintah Indonesia menargetkan peningkatan kapasitas instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) mencapai 3,6 GWp pada tahun 2025 (Dc, 2022; Pathway, 2022). Artinya, peluang untuk mengembangkan dan memanfaatkan potensi energi surya melalui instalasi PLTS di Indonesia masih sangat besar. Untuk mendukung hal tersebut, diperlukan kajian yang terdiri dari analisis ekonomi teknik dan evaluasi instalasi PLTS *mini-grid*, baik dalam perangkat lunak maupun simulasi lapangan/teknis. Ada beberapa software yang bisa digunakan, salah satunya adalah Pvsyst (Belmahdi & Bouardi, 2020; Paudel et al., 2021).

Universitas Diponegoro (UNDIP) sebagai salah satu kampus terbesar di Indonesia terletak diketinggian 212 mdpl dengan radiasi matahari rata-rata 3.601 kWh/m²/hari atau keluaran daya *photovoltaic* spesifik 4.176 kWh/kWh/hari (Pathway, 2022; Renewable et al., n.d.). Melihat potensi energi tersebut, UNDIP memasang PLTS *on-grid* yang terpasang di Gedung Dekanat Sekolah Vokasi untuk menyuplai 16,6% dari total kebutuhan energi gedung. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kinerja sistem dan mengevaluasi pencapaian target yang telah ditentukan. Penelitian dilakukan dengan bantuan simulator PVsyst Ver 7.0 dan pengukuran langsung di pembangkit listrik. Hasil penelitian yang terdiri dari evaluasi teknis baik simulasi perangkat lunak maupun pengukuran langsung menunjukkan bahwa sistem telah memenuhi produksi energi listrik sebesar 37.068 MWh per tahun sesuai target. Namun terdapat selisih nilai produksi energi sebesar 3.372 MWh per tahun yang masih dalam taraf toleransi karena faktor peralatan dan data referensi klimatologi. Selain itu, kajian ekonomi yang dilakukan juga menunjukkan bahwa sistem tersebut berhasil menghemat biaya tagihan listrik sebesar 16,51% atau Rp. 53.756,709 per tahun dengan nilai investasi ekonomi yang positif. Nilai *Levelized Cost of Electricity* adalah Rp. 1.153,93 per kWh, nilai *Payback Period* 9,4 tahun, *Net Present Value* sekitar Rp. 364.331.588,4 dan *Return of Investment* sebesar 102,1%. Penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan energi terbarukan merupakan salah satu pemanfaatan teknologi tepat guna yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, khususnya dalam pemanfaatan energi di bidang pendidikan.

METODE

Pembangkit Listrik Tenaga Surya

PLTS memanfaatkan modul *photovoltaic* (PV) yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik (Luthfansyah et al., 2020; Magribi et al., n.d.;

Mohammad et al., 2020). Sistem PLTS membutuhkan sebuah inverter untuk mengubah arus DC yang keluar dari sel surya menjadi arus AC sehingga dapat membantu memenuhi suplai energi dalam sebuah gedung (Hankins, 2010; Hart, 2011; RASHID, 2001). Jenis PLTS yang digunakan dalam penelitian ini adalah *on-grid*, dimana sistemnya terhubung langsung dengan jaringan PLN dan tidak menggunakan sistem penyimpanan energi (baterai) (IRENA, 2018; Renewable & Agency, n.d.). PLTS ini diibaratkan sebuah panel distribusi yang disertai dengan sistem proteksi sehingga jika ada modul yang rusak, sistem kelistrikan pada beban tetap aman. Sistem ini dilengkapi dengan proteksi penangkal petir untuk melindunginya dari serangan petir.

Potensi Energi di Kota Semarang Indonesia

Indonesia merupakan negara tropis yang dilintasi garis khatulistiwa. Hal ini menyebabkan sebagian wilayah Indonesia mendapat sinar matahari selama ± 12 jam sepanjang tahun. Kota Semarang yang berada di antara garis $6^{\circ} 50' - 7^{\circ} 10'$ Lintang Selatan dan $109^{\circ} 35' - 110^{\circ} 50'$ Bujur Timur mendapatkan Iradiasi Normal Langsung (INL) sebesar $1300 \text{ kWh/m}^2/\text{tahun}$ (IRENA, 2019), yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Potensi energi berdasarkan INL di Kota Semarang

Secara spesifik, kapasitas panel surya dapat dihitung dengan persamaan (1),

$$P_{wp} = \frac{P_{load-hours}}{T_{sun}} \quad (1)$$

Dimana P_{wp} adalah kapasitas panel surya yang harus dihasilkan dalam *Watt-peak*, $P_{load-hours}$ adalah target kebutuhan energi yang harus diproduksi dalam *Watt-hours*, dan T_{sun} adalah durasi penyinaran matahari dalam jam.

Beban Listrik

Profil beban penggunaan energi listrik merupakan faktor yang paling penting untuk ditentukan sebelum merancang dan merencanakan sistem pembangkit listrik (Istiqomah et al., 2022; Mohammad et al., 2020; Prasetyono et al., 2020). Untuk mendefinisikan kebutuhan tersebut, persamaan (2) dapat digunakan;

$$P_{\text{load-hours}} = P_{\text{load}} \times T_{\text{load}} \quad (2)$$

Dimana P_{load} adalah besarnya beban listrik dalam watt, dan T_{load} adalah durasi waktu operasional penggunaan beban dalam jam.

Evaluasi Tekno-Ekonomi

1. Net Present Value

Net Present Value (NPV) adalah ukuran profitabilitas PLTS berdasarkan nilai arus kas saat ini yang didiskontokan dengan nilai diskonto rata-rata (d) pada nilai yang melebihi nilai investasi saat ini (Pathway, 2022; Paudel et al., 2021). Persamaan (3) dapat digunakan untuk menentukan nilai NPV suatu proyek;

$$NPV = \sum_{i=0}^n \frac{CF_i}{(1+d)^i} - I_0 \quad (3)$$

dimana CF_i adalah tingkat kas bersih pada tahun i , dan I_0 adalah total biaya investasi awal. Secara umum, jika nilai NPV positif menunjukkan kelayakan ekonomi proyek, dan sebaliknya, NPV negatif menunjukkan kelayakan ekonomi proyek.

2. Return of Investment

Return of Investment (ROI) merupakan indikator yang menunjukkan kinerja dari investasi yang dilakukan. ROI menunjukkan keuntungan atau kerugian yang didefinisikan sebagai rasio keuntungan yang diperoleh setelah investasi terhadap total biaya investasi yang dikeluarkan. Secara matematis besarnya ROI dituliskan pada persamaan (4) (Abbas & Merzouk, 2012; International Renewable Energy Agency (IRENA), 2018):

$$ROI(\%) = \frac{NP}{Inv} \times 100\% \quad (4)$$

dimana NP adalah keuntungan bersih dari investasi, sedangkan Inv adalah nilai investasi yang dilakukan.

3. Levelized Cost of Electricity

Dasar untuk menentukan dan membandingkan kelayakan ekonomi antara pembangkit listrik yang berbeda umumnya menggunakan *Levelized Cost of Electricity* (LCOE). LCOE didefinisikan sebagai perbandingan antara total biaya produksi listrik selama pengoperasian pembangkit terhadap total energi listrik yang dihasilkan selama periode tersebut. Secara matematis, LCOE dapat dituliskan dalam persamaan (5) (Alramlawi & Li, 2020; Renewable & Agency, n.d.):

$$LCOE = \frac{\sum_t^n \frac{C_t + O_t}{(1+d)^t}}{\sum_t^n E_t} \quad (5)$$

dimana n adalah masa pakai generator, C_t dan O_t adalah biaya modal dan operasional pada tahun t , d adalah nilai diskonto, dan E_t adalah jumlah listrik yang dihasilkan pada tahun t (MWh).

4. Payback Period

Payback Period (PP) adalah jangka waktu untuk kembalinya nilai modal investasi berupa tabungan atau keuntungan. Parameter PP dapat dituliskan pada persamaan (6) (Belmahdi & Bouardi, 2020; Study, 2015):

$$PP = \frac{TIC}{ANS} \quad (6)$$

dimana TIC adalah total biaya investasi dan ANS adalah setoran bersih tahunan.

Aplikasi Perangkat Lunak PVsyst

PVsyst adalah perangkat lunak yang dapat digunakan untuk mempelajari, merancang, dan menganalisis data dari sistem PLTS *mini-grid*. Simulasi PVsyst menghitung distribusi energi tahunan, yang menghasilkan produksi energi total (MWh/tahun), rasio kinerja, dan energi spesifik (kWh/kWp) yang penting dalam proses desain PLTS *mini-grid*, untuk mendapatkan perbaikan desain. Selain itu, PVsyst dapat digunakan untuk menghitung evaluasi ekonomi suatu sistem, seperti NPV dan LCOE.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Beban Listrik dan Target Penghematan Energi

Karakteristik beban termasuk waktu operasional dan penggunaan energi total perlu didefinisikan. Gedung Vokasi Universitas Diponegoro tergolong kelas konsumen B2/TR dengan pemakaian listrik sebagian besar beroperasi pada jam kerja normal (pagi sampai sore) dalam satuan waktu Indonesia bagian barat (WIB). Dengan menggunakan perhitungan energi pada persamaan (2), dalam sehari diperoleh nilai total beban sekitar 850,055 kWh. Ada 22 hari operasional aktif dalam sebulan, sehingga total beban listrik sekitar 18.701,21 kWh, dan beban listrik 224.414,52 kWh dalam setahun. Jika harga tarif listrik dari PLN adalah Rp. 1.447-per kWh, maka perhitungan tarif listrik per bulan adalah Rp. 27.060.694,28, dan dalam setahun menjadi Rp. 324.728.331,36.

Jika profil beban diketahui, target penghematan 16,6% dapat ditetapkan. Beberapa pertimbangan dilakukan untuk menentukan target penghematan energi, antara lain biaya infrastruktur, pemeliharaan operasional, nilai dan karakteristik beban berbasis listrik per hari, serta ketersediaan material dan peralatan di pasar. Target penghematan sebesar 16,6% setara dengan pengurangan energi sebesar 2.652,96 kWh atau biaya sebesar Rp. 4.479.726 per bulan. Karakteristik beban profil harian diilustrasikan pada Tabel 1. Setelah menentukan target penghematan energi dan biaya, langkah selanjutnya adalah merancang sistem.

Tabel 1. Profil Beban Listrik

Waktu (WIB)	Beban (kWh)	Waktu (WIB)	Beban (kWh)
00.00	9.43	12.00	75.4
01.00	9.43	13.00	75.4

02.00	9.43	14.00	75.4
03.00	9.43	15.00	75.4
04.00	9.43	16.00	75.4
05.00	9.43	17.00	75.4
06.00	9.43	18.00	9.43
07.00	9.43	19.00	9.43
08.00	9.43	20.00	9.43
09.00	75.4	21.00	9.43
10.00	75.4	22.00	9.43
11.00	75.4	23.00	9.43

Desain Sistem

Dengan target penghematan sebesar 2.652,96 kWh per bulan, ekspektasi energi produksi harian PLTS sebesar 103,36 kWh. Seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, asumsi idealnya adalah penyinaran matahari rata-rata adalah 4 jam dalam satu hari. Oleh karena itu, dengan menggunakan persamaan (1), penentuan kapasitas instalasi panel surya adalah 25,84 kWp. Untuk mendapatkan kinerja PLTS yang ideal, diperlukan sebuah inverter yang dapat mengubah listrik DC menjadi AC 3 fasa.

Berdasarkan kapasitas 25,84 kWp, ditentukan kapasitas masing-masing modul panel surya dan spesifikasi inverter yang tersedia di pasaran. Konfigurasi sambungan panel surya juga dipilih dengan mempertimbangkan tegangan, arus dan daya maksimum yang dapat diterima oleh inverter. Dengan kapasitas panel surya 340 Wp terdapat 4 rangkaian yang masing-masing terdiri dari 19 modul panel surya yang dihubungkan secara seri sesuai Tabel 2. Visualisasi rancangan sistem dapat dilihat pada Gambar 2. Dengan rating panel surya yang telah ditentukan, inverter kemudian dipilih. PLTS dari Sunny Tripower (STP2000TL-30) dengan spesifikasi teknis terlampir pada tabel 3. Selain itu, spesifikasi detail solar panel dari pabrikan Trina Solar (TSM340PE15H) dapat dilihat pada tabel 3.



Gambar 2. Visualisasi perangkat keras sistem

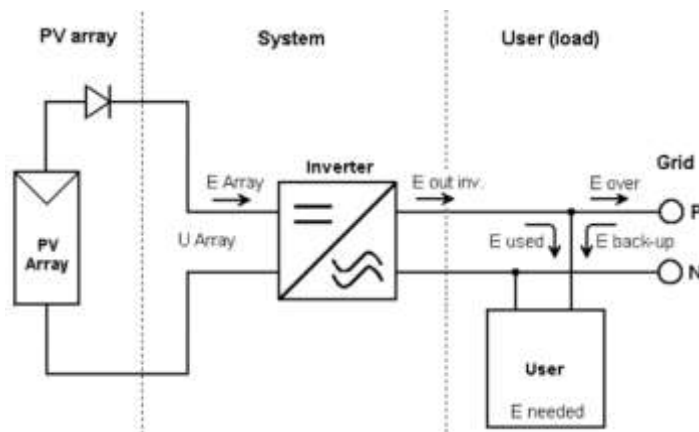
Tabel 2. Parameter Desain Sistem

Variabel PV	Nilai	Dimensi
Daya Maks	25.84	kWp
Jumlah Modul	76	-
Tegangan MPP	712.5	Volts
Arus MPP	36.24	Ampere
Lama Penyinaran	4	Hours

Tabel 3. Spesifikasi Inverter STP2000TL-30 dan Solar Panel Modul TSM340PE15H

Inverter STP2000TL-30			TSM340PE15H		
Variabel	Nilai	Dimensi	Variabel	Nilai	Dimensi
Daya Maks. AC	36	kWp	Daya Maks. Per-modul	340	Wp
Daya Maks. DC	20.44	kW	Tegangan Maks. Per-modul	37.5	Volts
Tegangan MPP	320 – 800	Volts	Arus Maks, Per-modul	9.06	Ampere
Arus Maks, MPP	33	Ampere	Tegangan Open Circuit	46.2	Volts
Daya Rerata AC	20	kW	Arus Pendek	9.53	Ampere
Efisiensi	98	%	Efisiensi	95	%

Selain modul panel surya dan inverter, sistem ini juga menggunakan penyangga mekanis, kabel saluran, dan kotak panel yang memuat beberapa sistem pengamanan kelistrikan AC-DC seperti sekering, pemutus sirkuit mini, dan pemutus sirkuit cetakan. Diagram blok sistem kelistrikan dapat dilihat pada Gambar 3.



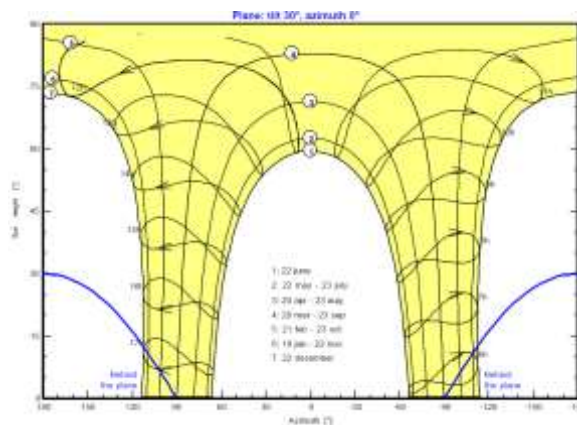
Gambar 3. Diagram blok kelistrikan sistem

Asesmen Sistem Melalui Perangkat Lunak

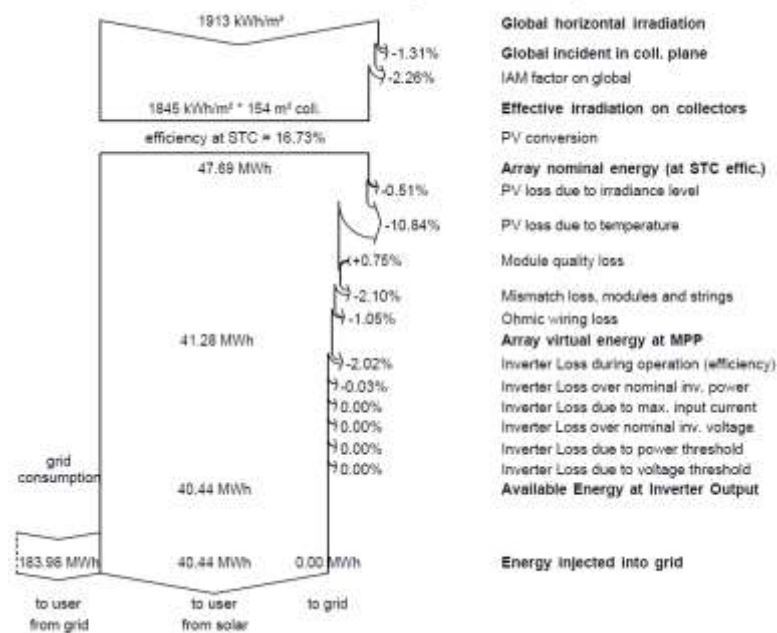
Setelah menentukan konfigurasi sistem sesuai dengan rancangan, langkah selanjutnya adalah menganalisis kinerja produksi energi PLTS setiap tahunnya. Menurut persamaan model matematis (2), keluaran daya panel surya sangat bergantung pada jumlah iradiasi dan suhu sekitar di lokasi pemasangan. Karakteristik visualisasi garis horizon pada lokasi tertentu dapat dilihat pada Gambar 4. Tabel 4 menunjukkan perubahan nilai penyinaran matahari dan suhu lingkungan setiap bulan berdasarkan musim dan kondisi cuaca yang berlaku. Perubahan tersebut tentunya mengakibatkan produksi energi listrik dari panel surya menjadi tidak konsisten. Secara tetap, berdasarkan estimasi PVsyst, sistem yang dirancang akan mengalami fluktuasi produksi energi listrik yang berubah dengan nilai yang besar seperti terlihat pada tabel 4, dengan *Global Horizontal Irradiation* (GHI) yang berarti total iradiasi matahari sinar horizontal.

Tabel 4. Karakteristik Iklim Berdasarkan Basis Data PVSyst

Bulan	GHI (kWh/m ²)	INL (kWh/m ²)	Suhu °C
Januari	124	88.1	26.2
Februari	123.3	77.2	26
Maret	139.8	86	26.5
April	148.2	79.5	26.8
Mei	165.7	67.9	27.4
Juni	159	59.9	26.7
Juli	169.5	60.2	26.6
Agustus	182.9	69.3	26.9
September	184.1	75.9	27.2
Oktober	182.8	93.9	27.7
November	194.1	83	26.9
Desember	139.6	86.8	26.5
Tahun	1913	927.7	26.8



Gambar 4. Karakteristik visualisasi garis horizon



Gambar 5. Kerugian awal dan aliran energi akhir

Di lokasi ini, potensi energi matahari yang diperoleh mencapai 1913 kWh/m² setiap tahunnya. Namun, hanya 1845 kWh/m² radiasi matahari yang dapat diserap oleh sistem panel surya dengan efisiensi kerja pada Kondisi Uji Standar (KUS) sebesar 16,73%. Radiasi matahari tersebut selanjutnya akan dikonversikan menjadi energi listrik ideal sebesar 47,69 MWh. Namun, energi listrik tidak dapat sepenuhnya dikonsumsi oleh beban karena beberapa faktor. Faktor-faktor seperti kehilangan tingkat radiasi PV 0,51%, kehilangan PV karena suhu 10,84%, kualitas modul PV 2,1%, resistansi internal kabel 2,02%, dan kehilangan inverter sekitar 2%. Setelah semua kerugian dari sistem ini, hanya 40,44 MWh yang dapat disalurkan ke jaringan. Rugi-rugi awal dan aliran energi akhir dapat dilihat pada Gambar 5.

Untuk bangunan dengan beban listrik tahunan sebesar 224.414 MWh, hasil simulasi menunjukkan sistem panel surya akan memasok sekitar 40.44 MWh atau 18.04% dari total kebutuhan, sisa kebutuhan akan diambil dari jaringan listrik PLN. Dengan demikian, dengan simulasi berbasis komputer, terlihat bahwa kinerja sistem telah melampaui target penghematan yang diharapkan dan validitas sistem dapat terwujud.

Asesmen Sistem Melalui Perangkat Lunak

Tujuan penentuan kinerja sistem, diperlukan analisis energi yang terdiri dari perbandingan hasil kinerja simulasi PVsyst dengan hasil kinerja output *real-time* dari sistem yang terpasang. Variabel kritis yang menjadi obyek analisis adalah produksi energi terhadap waktu. Berdasarkan desain sistem yang disimulasikan menggunakan PVsyst, terlihat bahwa terdapat beberapa nilai produksi energi sistem PV *mini-grid* sesuai Tabel 5.

Tabel 5. Estimasi Produksi Listrik Berdasarkan PVsyst

Variabel	Nilai	Dimensi
Modul PV	0.850	MW
Produksi Daya Rerata Bulanan	18.7	MW
Produksi Daya Rerata Tahunan	224.4	MW
Produksi Energi Ideal Tahunan	47.69	MWh
Produksi Energi Maksimum Tahunan	41.28	MWh
Konsumsi Energi dari Panel Surya Tahunan	40.44	MWh
Konsumsi Energi dari Jaringan Tahunan	183.98	MWh

Selanjutnya, setelah memastikan simulasi sistem yang dirancang mencapai target, selanjutnya adalah realisasi sistem PLTS di gedung sesuai kebutuhan. Pembangunan sistem didasarkan pada rancangan yang telah dibahas pada bagian perancangan sistem. Hasil konstruksi sistem panel surya, kelistrikan, dan penyangga diilustrasikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Konstruksi terpasang sistem panel surya

Selanjutnya dilakukan pengukuran dan pemantauan langsung terhadap variabel energi listrik yang digunakan sebagai data uji lapangan. Hasil pengukuran tersebut dapat dilihat pada Tabel 6, dengan total produksi energi yang berhasil diinjeksikan ke beban melalui jaringan listrik sebesar 3089 kWh per bulan atau 37.068 MWh per tahun. Nilai produksi listrik tersebut hampir menyamai target produksi energi sebesar 16,6% atau 37.068 MWh per tahun.

Tabel 6. Estimasi Produksi Listrik Berdasarkan PVSyst

Variabel (Dalam 1 Tahun)	Satuan	Dimensi
Total Kebutuhan Energi	224.414	MWh
Target Persentase Penghematan	16.6	%
Target Nyata Produksi Energi	37.21	MWh
Target Ideal Produksi Energi	40.44	MWh
Realisasi Nyata Produksi Energi	37.068	MWh

Selanjutnya dilakukan perbandingan kinerja sistem berdasarkan hasil simulasi PVsyst dengan data hasil pengukuran lapangan. Seperti yang telah disampaikan pada bagian sebelumnya, hasil kinerja sistem telah berhasil mencapai target yang telah ditentukan. Selain itu, terdapat realisasi produksi energi sebesar 3.372 MWh per tahun antara hasil simulasi PVsyst dengan data terukur. Berbeda dengan penelitian sebelumnya (Prasetyono et al., 2020), perbedaan produksi energi dapat muncul karena beberapa faktor, seperti data iklim yang menjadi referensi untuk PVsyst, yang bervariasi dengan kondisi iklim di wilayah tersebut. Selain itu, nilai efisiensi perangkat keras panel surya dan modul inverter tidak sesuai dengan perkiraan perangkat lunak, rugi-rugi energi pada kabel transmisi panel surya ke sistem, serta perbedaan pembacaan alat ukur atau pemantauan yang digunakan. Perbandingan produksi energi dari simulasi PVsyst, pengukuran langsung, dan ukuran target dapat dilihat pada Tabel 6.

Analisis Ekonomi Energi

Sebagai hasil, ekonomi adalah ukuran utama penilaian proyek apa pun. Dengan demikian, analisis ini dilakukan seluruhnya dengan menggunakan perangkat lunak PVsyst berdasarkan hasil kinerja produksi energi ideal dari sistem yang sudah ada. Hasil analisis ekonomi yang dibuat akan digunakan untuk beberapa parameter acuan sebagai standar penilaian. Referensi ini adalah LCOE, payback period, NPV, dan ROI. Untuk mendapatkan parameter tersebut diperlukan perhitungan berdasarkan ketentuan yang ditetapkan oleh Bank Indonesia, biaya pemasangan awal, dan biaya operasional-pemeliharaan selama 20 tahun.

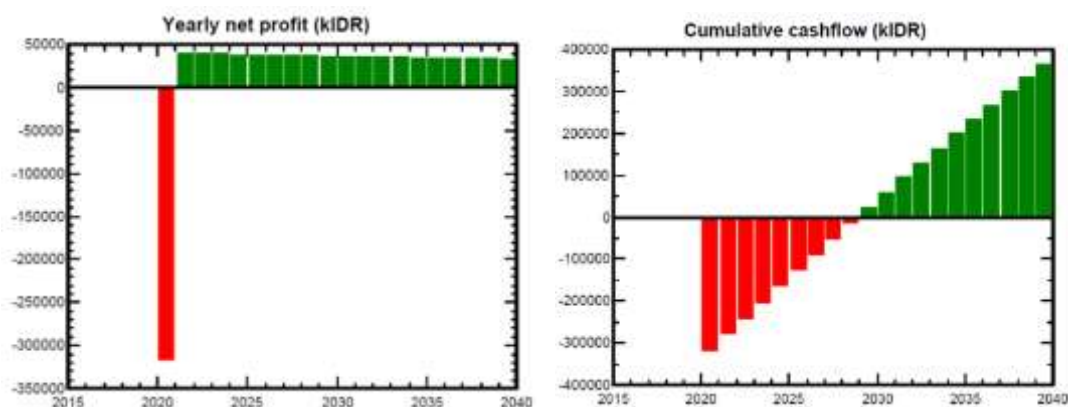
Dari analisis ekonomi tersebut, terdapat beberapa acuan regulasi dari Bank Indonesia yang sangat berpengaruh, antara lain rata-rata tingkat inflasi tahunan, dan tingkat diskonto dengan masing-masing nilai seperti yang terlihat pada Tabel 7. Karena semua pembiayaan akan dilakukan secara mandiri atau tanpa pinjaman, suku bunga acuan dari Bank Indonesia tidak diperlukan. Rincian nilai investasi untuk modal infrastruktur dan pemeliharaan operasional setiap tahunnya dapat dilihat pada Tabel 8. Berdasarkan penetapan nilai tersebut, dapat diketahui biaya investasi modal infrastruktur sebesar Rp. 356.814.000, dengan biaya operasional dan pemeliharaan mencapai Rp. 19.000.000 setiap tahun. Seperti yang ditunjukkan pada persamaan (5), hasil total produksi energi dapat dilihat jika nilai LCOE sistem adalah Rp. 1.153,93 per kWh. Hal ini menunjukkan bahwa LCOE yang diperoleh dari sistem panel surya yang dibangun memiliki nilai yang lebih rendah dari LCOE yang ditetapkan oleh PLN yaitu sebesar Rp. 1.444,7 per kWh.

Dari perspektif investasi, persamaan (6) dapat digunakan dalam penelitian ini untuk realisasi payback period 9,4 tahun. Untuk menghitung NPV, persamaan (3) dapat digunakan untuk mencari NPV sebesar Rp 364.331.588, dan menggunakan persamaan (4), ROI dapat ditemukan sekitar 102%. Nilai NPV positif menggambarkan investasi yang layak, yang memiliki tingkat keuntungan yang tinggi. Oleh karena itu berdasarkan perkiraan harga dapat diketahui bahwa biaya awal pembangunan sistem PLTS di Gedung Dekanat Universitas Diponegoro merupakan investasi yang positif dan berpotensi memberikan keuntungan yang cukup besar. Hasil akhir dari analisis tekno-ekonomi dapat dilihat pada Tabel 8. Grafik laba dan arus kas kumulatif dapat dilihat pada Gambar 7. Tabel 9 menggambarkan data hasil ekonomi tahunan secara rinci. Hasil tersebut menunjukkan adanya penghematan pengeluaran keuangan langsung sebesar Rp. 53.756.709 dari total tagihan PLN tahunan sebesar Rp 324.211.483.

Tabel 7. Economy References Value, Capital, Cost, and Operational-Maintenance Cost

Economical Value References			Infrastructure Capital Cost		
Variabel	Satuan	Dimensi	Variabel	Satuan	Nilai
Inflation	1.68	%	Modul Panel Surya	76 modules	Rp. 174,800,000
Discount Rate	3.75	%	Mekanik Pendukung	76 Modules	Rp. 14,440,000
Duration tariff warranty	20	Years	Inverter STP 20000TL-30	1 Unit	Rp. 800,000,000
Feed-in tariff decrease after warranty	50	%	Jasa Instalasi	1 Lump sum	Rp. 49,500,000

Consumption tariff	1,444.7	Rp	Total Infrastructure Capital Cost	-	Rp 356,814,000
-	-	-	Aset Depresiasi	-	Rp. 272,240,000
Operational and Maintenance Cost (O&M) yearly					
Variabel	Satuan		Nilai		
Reparation	1 Lump sum		Rp. 3,000,000		
Inverter Replacement	1 Lump sum		Rp. 16,000,000		
Total O&M	-		Rp. 19,000,000		
Including Inflation	-		Rp. 22,361,114		



Gambar 7. Laba bersih tahunan, dan arus kas kumulatif.

Tabel 9. Detail Hasil Simulasi Ekonomi Tahunan untuk Jangka Waktu 20 Tahun

Tahun	Biaya Operasional (Rp)	Keuntungan Setelah Pajak (Rp)	Penghematan Kebutuhan Internal (Rp)	Keuntungan Kumulatif (Rp)	Amortisasi (%)
2020	19,000,000	-19,000,000	58,418,394	-317,395,606	11.00%
2021	19,319,200	-19,319,200	58,418,394	-278,296,412	22.00%
2022	19,643,763	-19,643,763	58,418,394	-239,521,780	32.90%
2023	19,973,778	-19,973,778	58,418,394	-201,077,164	43.60%
2024	20,309,337	-20,309,337	58,418,394	-162,968,107	54.16%
2025	20,650,534	-20,650,534	58,418,394	-125,200,247	64.90%
2026	20,997,463	-20,997,463	58,418,394	-87,779,316	75.40%
2027	21,350,220	-21,350,220	58,418,394	-50,711,142	85.80%
2028	21,708,904	-21,708,904	58,418,394	-14,001,652	96.10%
2029	22,073,614	-22,073,614	58,418,394	22,343,128	106.16%
2030	22,444,450	-22,444,450	58,418,394	58,317,072	116.16%
2031	22,821,517	-22,821,517	58,418,394	93,913,949	126.16%
2032	23,204,919	-23,204,919	58,418,394	129,127,424	136.20%
2033	23,594,761	-23,594,761	58,418,394	163,951,057	145.90%
2034	23,991,153	-23,991,153	58,418,394	198,378,298	155.60%
2035	24,394,205	-24,394,205	58,418,394	232,402,488	165.10%
2036	24,804,027	-24,804,027	58,418,394	266,016,854	174.60%

2037	25,220,735	-25,220,735	58,418,394	299,214,513	183.90%
2038	25,644,443	-25,644,443	58,418,394	331,988,464	193.00%
2039	26,075,270	-26,075,270	58,418,394	364,331,588	202.10%
Total	447,222,295	-447,222,295	1,168,367,880	364,331,588	202.10%

KESIMPULAN

Penelitian saat ini berfokus pada analisis hasil kinerja tekno-ekonomi PLTS yang dipasang di Gedung Dekanat Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro. Dilakukan pendekatan perhitungan manual, simulasi berbasis komputer dengan software Pvsyst, dan pengukuran variabel pengamatan dengan alat ukur langsung. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menentukan evaluasi pencapaian target penghematan 16,6% dari kebutuhan energi dan finansial.

Berdasarkan kajian dan evaluasi terhadap sistem yang dirancang, terlihat bahwa nilai produksi energi di lapangan sesuai dengan estimasi nilai produksi energi dari simulasi PVsyst. Terlihat bahwa terdapat perbedaan sebesar 3,372 MWh antara hasil simulasi dan pengukuran langsung yang disebabkan oleh beberapa faktor namun masih memiliki nilai yang dapat ditoleransi. Selain itu evaluasi teknis sistem yang dirancang dapat berjalan dengan baik sesuai target yang telah ditentukan. Proporsi langsung dengan hasil kinerja teknis, studi ekonomi menunjukkan bahwa sistem yang terpasang diperkirakan akan beroperasi selama sekitar 20 tahun yang memiliki nilai NPV, ROI, dan LCOE positif. Semua indikator penilaian investasi tersebut menunjukkan bahwa PV *mini-grid* dari sistem yang dirancang sangat menguntungkan, terutama dari segi ekonomi.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pemasangan sistem PLTS di Gedung Dekanat Vokasi Universitas Diponegoro merupakan proyek yang efektif dan menguntungkan. Evaluasi ini juga menegaskan bahwa penggunaan PLTS merupakan salah satu alternatif terbaik dalam penggunaan *green power plant* yang hemat biaya untuk investasi infrastruktur bangunan perguruan tinggi di masa mendatang.

SARAN

Melalui hasil kajian dan evaluasi analisis variabel yang telah dilakukan, didapat beberapa saran yang dijadikan rekomendasi untuk pengembangan sistem ke depannya. Penggunaan data klimatologi yang aktual dan akurat merupakan salah satu kunci penting dalam analisis produksi daya listrik PLTS. Semakin rendah tingkat akurasi dan validitas data, dapat memperbesar timbulnya nilai eror secara iteratif pada analisis finansial. Untuk itu diperlukan metode validasi lain yang dapat dilakukan dengan cara mengukur secara langsung kondisi klimatologi secara periodik di area atau situs PLTS.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada Universitas Diponegoro, Dekan Sekolah Vokasi, dan Ketua Program Studi Rekayasa Teknologi Otomasi atas izin dan dukungan finansial sehingga penelitian ini berhasil diselesaikan.

DAFTAR RUJUKAN

- Abbas, M., & Merzouk, N. K. (2012). *Techno economic study of solar thermal power plants for centralized electricity generation in Algeria*. 179–183.
- Alramlawi, M., & Li, P. (2020). Design optimization of a residential pv-battery microgrid with a detailed battery lifetime estimation model. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(2), 2020–2030. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2965894>
- Belmahdi, B., & Bouardi, A. El. (2020). ScienceDirect Available ScienceDirect ScienceDirect Solar Potential Assessment using PVsyst Software in the Northern Solar Potential Assessment using PVsyst Software in the Northern Zone of Morocco. *Procedia Manufacturing*, 46(2019), 738–745. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.104>
- Dc, W. (2022). *Tracking SDG7 progress across targets: Indicators and data*.
- Fuera, R., & Red, D. E. L. A. (2021). *OFF-GRID RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2021 STATISTIQUES D ' ÉNERGIE RENOUVELABLE HORS RÉSEAU 2021 ESTADÍSTICAS DE ENERGÍA*.
- Hankins, M. (2010). *STAND-ALONE SOLAR ELECTRIC*.
- Hart, D. W. (2011). *Power Electronic* (1st ed.). McGraw-Hill.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2018). *Renewable Energy Market Analysis: Southeast Asia*. In *Irena*.
- IRENA. (2018). *Measurement and estimation of off-grid solar , hydro and biogas energy*.
- IRENA. (2019). *Renewable Energy Statistics 2019*. In *International Renewable Energy Agency* (Vol. 1, Issue 1).
- Istiqomah, A., Mohammad, L., Tahier, A. R. H., Syamputra, D. N. I., & Roodhiyah, L. Y. (2022). Prediction and Gaussian Distribution Analysis of Power Consuming in University Building Using Bidirectional Long Short-Term Memory Deep Learning. *ICEECIT 2022 - Proceedings: 2022 International Conference on Electrical Engineering, Computer and Information Technology*, 167–173. <https://doi.org/10.1109/ICEECIT55908.2022.10030182>
- Luthfansyah, M., Suyanto, S., Bakarr, A., & Bangura, M. (2020). *Evaluation and Comparison of DC-DC Power Converter Variations in Solar Panel Systems Using Maximum Power Point Tracking (MPPT) Flower Pollination Algorithm (FPA) Control*. 00026, 1–9.
- Magribi, H., Sultan, N., Riau, S. K., Soebrantas, J. H., 155, N., & Baru, S. (n.d.). *Merancang Pompa Air Tenaga Surya pada Perkebunan Semangka*. <https://doi.org/10.28926/briliant.v7i3>
- Mohammad, L., Asy, M. K., & Izdiharrudin, M. F. (2020). *Performance Enhancement of Solar Panels Using Adaptive Velocity-Particle Swarm Optimization (AVPSO) Algorithm for Charging Station as an Effort for Energy Security*. 3(2), 107–116.
- Pathway, C. (2022). *WORLD ENERGY TRANSITIONS OUTLOOK 2022*.
- Paudel, B., Regmi, N., Phuyal, P., Neupane, D., Hussain, M. I., Kim, D. H., & Kafle, S. (2021). Techno-economic and environmental assessment of utilizing campus building rooftops for solar PV power generation Techno-economic and environmental assessment of utilizing campus building

- rooftops for solar PV power generation. *International Journal of Green Energy*, 00(00), 1–13. <https://doi.org/10.1080/15435075.2021.1904946>
- Prasetyono, E., Mohammad, L., & Murdianto, F. D. (2020). *Performance of ACO-MPPT and Constant Voltage Method for Street Lighting Charging System*. 15(June), 235–244.
- RASHID, M. H. (2001). *POWER ELECTRONICS HANDBOOK* (J. D. Irwin, Ed.; 1st ed.). Academic Press.
- Renewable, I., & Agency, E. (n.d.). *Renewable Technology Innovation Indicators : Mapping progress in costs , patents and standards*.
- Renewable, I., & Agency, E. (2022). *RENEWABLE CAPACITY STATISTICS 2022 STATISTIQUES DE CAPACITÉ RENOUVELABLE 2022 ESTADÍSTICAS DE CAPACIDAD RENOVABLE 2022*.
- Renewable, I., Agency, E., & Fao, A. O. (n.d.). *Renewable energy for agri-food systems*.
- Study, A. C. (2015). Advantages and Challenges of DC Microgrid for Commercial Building. *1st IEEE International Conference on DC Microgrids*, 355–358.