

Studi Kelayakan Teknis dan Ekonomi Pemasangan PLTS Atap *On-Grid* pada Sistem Kelistrikan Gedung Perpustakaan ITS

Ferdinand Rico Firaldi, Rony Seto Wibowo, dan Sjamsjul Anam
Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: ronyseto@ee.its.ac.id

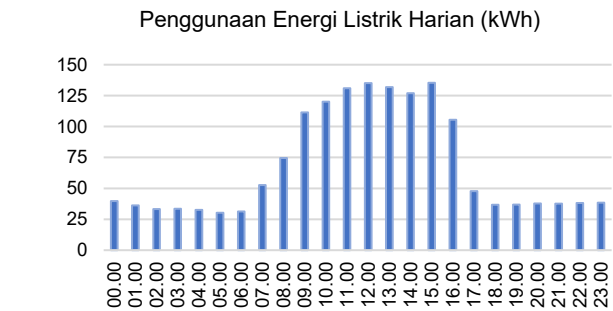
Abstrak—Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan analisis kelayakan teknis dan ekonomi pemasangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) atap *on grid* pada Gedung Perpustakaan Kampus ITS. Pemodelan PLTS dilakukan pada simulasi dengan area atap yang digunakan masing-masing seluas 432 m². Berdasarkan simulasi, kapasitas instalasi maksimal yang direkomendasikan sebesar 66 kWp pada sisi atap timur laut. Energi yang dihasilkan sistem PLTS pada kelistrikan Gedung Perpustakaan Kampus ITS dalam kurun waktu satu tahun sebesar 108.282 kWh. Persentase energi dari sistem PLTS yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban kelistrikan sebesar 18,38% dari total beban perhari. Nilai kelayakan teknis ditinjau dari *performance ratio* (PR) yang didapatkan sebesar 87,2%. Sedangkan untuk hasil analisis ekonomi menunjukkan nilai *cost of energy* (COE) sebesar Rp 706,31/kWh, net present value (NPV) menghasilkan nilai positif sebesar Rp 414.656.910, nilai *interest rate of return* (IRR) sebesar 8,8% dan *benefit cost ratio* (BCR) sebesar 1,44. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa investasi untuk proyek sistem PLTS atap *on grid* pada sisi atap timur laut Gedung Perpustakaan Kampus ITS layak untuk direalisasikan.

Kata Kunci—Energi Terbarukan, *Performance Ratio* (PR), PLTS Atap *On Grid*, Tekno Ekonomi.

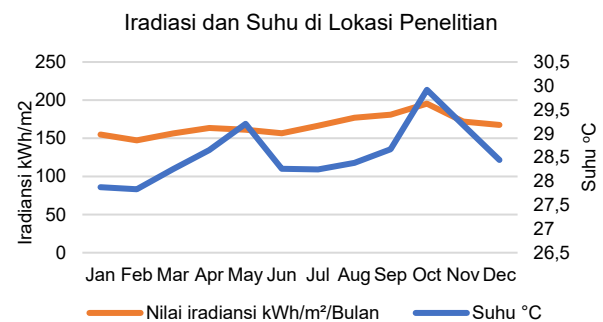
I. PENDAHULUAN

ENERGI terbarukan telah menjadi salah satu topik penelitian populer di banyak negara. Eksistensi energi terbarukan diharapkan dapat mengurangi penggunaan energi fosil yang menghasilkan beberapa kerugian seperti dampak lingkungan, risiko kelangkaan pasokan, dan ketidakstabilan harga pasar bahan bakar fosil [1]. Kondisi tersebut telah mendorong pemerintah Indonesia untuk memanfaatkan segala potensi energi terbarukan yang dimiliki untuk mengurangi dampak buruk penggunaan energi fosil kedepannya [2]. Sebagai negara yang terletak di garis khatulistiwa, Indonesia memiliki potensi sumber energi terbarukan yang melimpah [3]. Hal ini membuat Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menargetkan pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia dapat mencapai 23% pada tahun 2025 [4].

Diantara berbagai sumber yang ada, energi matahari dinilai menjadi alternatif terbaik untuk menghasilkan energi listrik dari sumber energi terbarukan [5]. Konversi energi matahari menjadi energi listrik dapat dilakukan menggunakan modul *photovoltaic* (PV). Dalam konfigurasi yang lebih besar, susunan modul PV dapat menjadi sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) [6]. Sistem PLTS telah banyak diterapkan baik secara komunal maupun terhubung ke sistem jaringan (*on grid*) [7]. Selain Indonesia memiliki potensi yang cukup besar, PLTS merupakan sistem pembangkit yang



Gambar 1. Data penggunaan energi listrik harian.

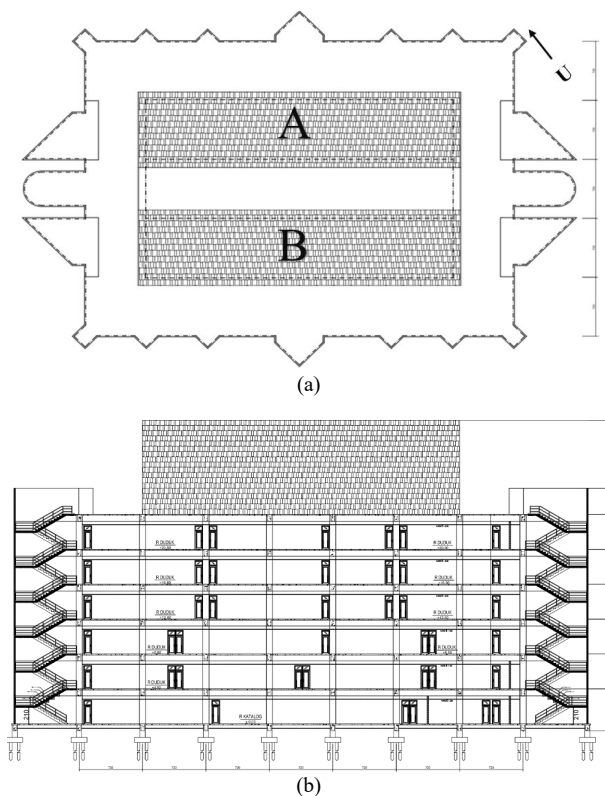


Gambar 2. Data iradiasi dan suhu lingkungan di lokasi penelitian.

cukup mudah dalam proses pembangunannya. Selain itu, upaya lanjutan yang dilakukan oleh pemerintah Indonesia untuk mendorong pengembangan PLTS yaitu dengan menerbitkan Peraturan Menteri No. 49 tahun 2018 tentang penggunaan PLTS atap yang dapat tersambung dengan jaringan PLN [8].

Beberapa penelitian berkaitan dengan studi penerapan PLTS atap juga telah dilakukan. Penelitian yang dilakukan Aprilia dan Rigoursyah menginvestigasi kelayakan sistem PLTS skala atap rumah di wilayah Bandung. Penelitian yang dilakukan menggunakan perangkat lunak HOMER dan Helioscope untuk mencukupi kebutuhan rumah dengan kapasitas listrik 450 VA [9]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan mengimplementasikan sistem PLTS skala atap rumah, maka akan sangat membantu mencukupi kebutuhan listrik yang digunakan sehari-hari. Persentase kebutuhan listrik rumah tangga yang dapat ditangani PLTS tersebut mencapai 42% dari total kebutuhan listrik sehari-hari.

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh Mubarak dan Yoga tentang kelayakan penggunaan diesel, turbin angin, *inverter*, dan baterai untuk desain pembangkit listrik cadangan pada perhotelan [10]. Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi dengan perangkat lunak HOMER untuk memperoleh desain yang optimal dan ekonomis sehingga bisa



Gambar 3. Denah atap gedung perpustakaan kampus ITS (a) tampak atas (b) tampak depan.

untuk direalisasikan. Lokasi hotel yang dipilih berada di Queen of the South Beach Resort, Yogyakarta. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi pembangkit listrik menggunakan diesel dan turbin angin lebih ekonomis dibandingkan hanya menggunakan diesel sebagai cadangan pembangkit listrik pada hotel sebagai langkah antisipasi ketika terjadi pemadaman listrik PLN.

Selain itu, PLTS atap dalam penerapannya dapat dilakukan pada gedung-gedung akademik seperti di dalam lingkungan kampus [11-13]. Hal tersebut sekaligus menjadi strategi yang dapat dilakukan untuk mengurangi biaya pembelian energi listrik dari PLN. Selain itu, menjadi langkah untuk mengurangi emisi karbon sehingga dapat mewujudkan kampus hijau.

Pada penelitian ini, studi tentang kelayakan teknis dan ekonomi pembangunan PLTS *on grid* di Gedung Perpustakaan Kampus Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dilakukan. Penelitian dilaksanakan menggunakan pendekatan simulasi dengan perangkat lunak. Pemodelan gedung dilakukan pada simulasi sesuai dengan denah Gedung Perpustakaan Kampus ITS. Kapasitas PLTS yang dirancang merujuk pada rekomendasi hasil simulasi dengan mempertimbangkan luas ketersediaan area atap gedung dan potensi iradiasi matahari yang dapat dimanfaatkan dengan sistem PLTS. Beberapa parameter yang akan dicari meliputi besar energi yang dihasilkan oleh sistem PLTS atap untuk mencukupi kebutuhan beban kelistrikan gedung, nilai kelayakan teknis yang ditinjau dari *performance ratio* (PR). Sedangkan untuk analisis ekonomi ditinjau dari *cost of energy* (COE), *net present value* (NPV), *interest rate of return* (IRR) dan *benefit cost ratio* (BCR).

II. PROFIL GEDUNG PERPUSTAKAAN KAMPUS ITS

A. Data Penggunaan Energi Listrik

Pengukuran data penggunaan energi listrik harian di Gedung Perpustakaan Kampus ITS menggunakan *data logger*. Pengukuran dilakukan pada hari kerja aktif, yaitu Senin sampai dengan Jumat. Hasil pengukuran selengkapnya ditunjukkan pada Gambar 1. Dapat dilihat bahwa pada jam operasional pukul 08.00 hingga 16.00 WIB, penggunaan energi listrik mengalami peningkatan. Rata-rata energi listrik yang digunakan sebesar 1.634 kWh/hari.

B. Iradiasi Matahari dan Suhu Lingkungan

Gedung Perpustakaan Kampus ITS terletak di Kecamatan Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur dengan koordinat lokasi $7^{\circ} 16' 57.738''$ S $112^{\circ} 47' 44.7433''$ E. Merujuk pada koordinat tersebut, data pendukung seperti global iradiasi matahari dan suhu lingkungan dapat diperoleh melalui *Meteonorm*, yang merupakan *database* pada simulasi yang digunakan. Gambar 2 menunjukkan data iradiasi dan suhu lingkungan di lokasi penelitian.

Berdasarkan profil iradiasi dan suhu lingkungan yang ditunjukkan pada Gambar 2, dapat diketahui bahwa tren iradiasi tertinggi terjadi pada interval bulan Agustus hingga Oktober. Iradiasi tertinggi diperoleh sebesar $195,42 \text{ kWh/m}^2$ pada bulan Oktober. Sedangkan iradiasi terendah terjadi pada bulan Februari sebesar $147,29 \text{ kWh/m}^2$.

C. Ketersediaan Luas Area Atap

Gambar 3 menunjukkan denah lokasi atap Gedung Perpustakaan Kampus ITS. Terdapat dua luasan area atap, sisi A dan B, yang dapat digunakan untuk pembangunan sistem PLTS *on grid*. Kedua luasan area atap tersebut memiliki ukuran yang sama, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

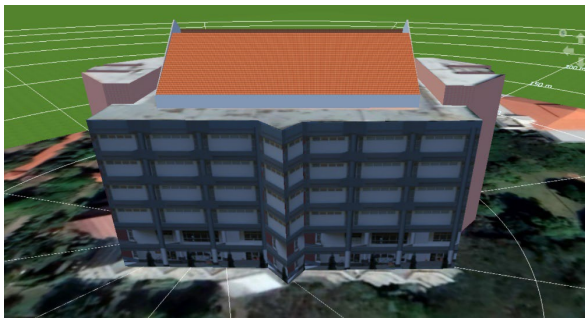
III. PERANCANGAN SISTEM PLTS ATAP *ON GRID*

A. Pemodelan Gedung Perpustakaan Kampus ITS

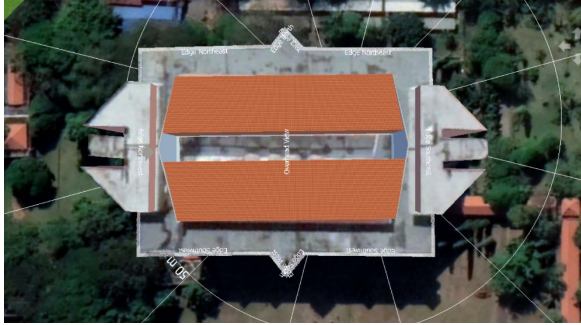
Berdasarkan informasi denah yang telah diperoleh, maka tahap awal perancangan sistem PLTS atap *on grid* adalah memodelkan terlebih dahulu Gedung Perpustakaan Kampus ITS sebagai lokasi yang akan digunakan untuk pemasangan PLTS. Ukuran, tinggi, kemiringan atap, dan sudut *azimuth* gedung dimodelkan dengan simulasi 3D sederhana pada perangkat lunak simulasi. Simulasi ini dilakukan untuk mengestimasi potensi iradiasi di lokasi penelitian yang dapat dimanfaatkan dengan modul PV, energi yang dihasilkan, serta *losses shading* yang diakibatkan adanya bayangan dari struktur bangunan atau utilitas bangunan di atap yang digunakan untuk pemasangan PLTS. Gambar 4 menunjukkan pemodelan Gedung Perpustakaan Kampus ITS.

B. Pemilihan Modul PV

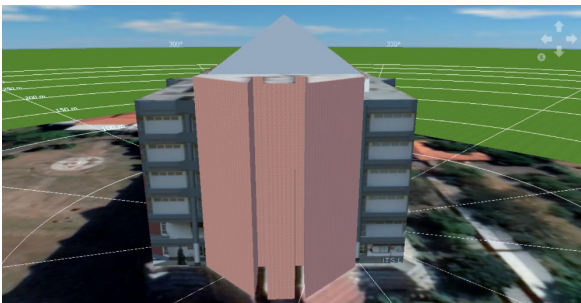
Kapasitas total daya instalasi PLTS akan dihitung berdasarkan simulasi, dengan tipe modul PV yang digunakan dalam penelitian ini yaitu JAM72S30-550/MR. Spesifikasi modul PV ditunjukkan pada Tabel 2. Sedangkan Gambar 5 menunjukkan kurva karakteristik modul PV yang digunakan berdasarkan hasil simulasi.



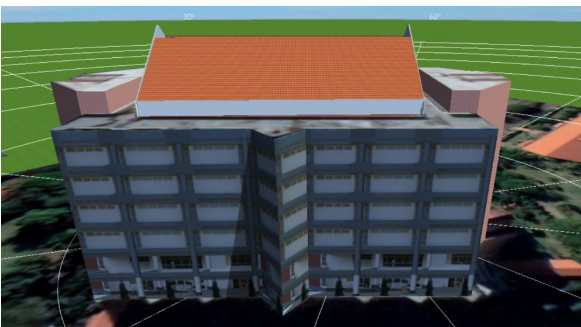
(a)



(b)



(c)



(d)

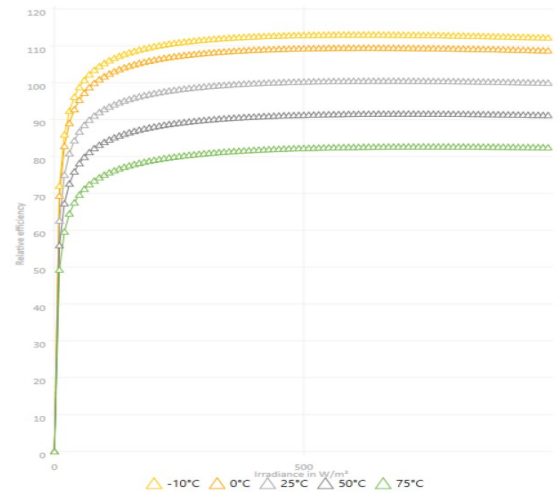
Gambar 4. Pemodelan gedung perpustakaan kampus ITS dengan (a) arah hadap timur laut (b) tampak atas (c) tampak samping (d) arah hadap barat daya.

C. Pemilihan Inverter

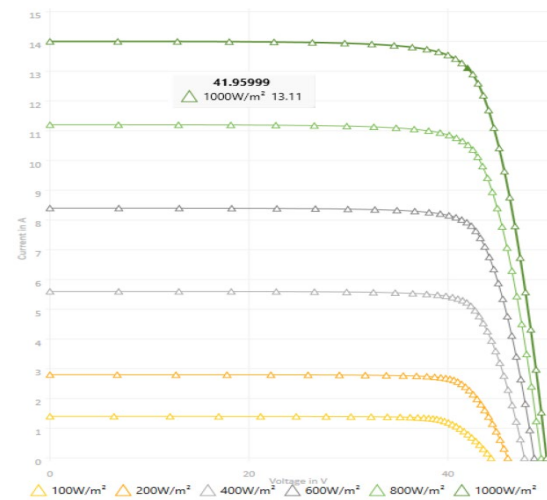
Tipe inverter yang digunakan adalah SMA sunny tripower 25000TL dengan spesifikasi yang ditunjukkan pada Tabel 3.

D. Konfigurasi Sistem PLTS On Grid

Pemasangan modul PV pada sistem PLTS yang dirancang ditentukan berdasarkan konfigurasi seri-paralel. Konfigurasi seri digunakan untuk menentukan besar tegangan luaran yang dihasilkan susunan modul PV, sedangkan konfigurasi paralel digunakan untuk menentukan besar arus luaran yang dihasilkan susunan modul PV. Keduanya akan menjadi *input* bagi perangkat inverter yang digunakan.



(a)



(b)

Gambar 5. Kurva karakteristik modul PV JAM72S30-550/MR (a) efisiensi (b) I-V.

Selain total kapasitas daya terpasang pada konfigurasi keseluruhan sistem PLTS, besar daya yang dihasilkan dipengaruhi juga oleh nilai iradiasi matahari, efisiensi modul PV, dan rugi-rugi atau *losses* dari komponen dan sistem. Energi yang akan dihasilkan sistem PLTS pada Gedung Perpustakaan Kampus ITS dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1).

$$P_{out} = GTI \times PV_{area} \times PV_{eff} - P_{loss} \quad (1)$$

dengan

P_{out} = Daya luaran sistem PLTS

GTI = Iradiasi total pada permukaan modul PV

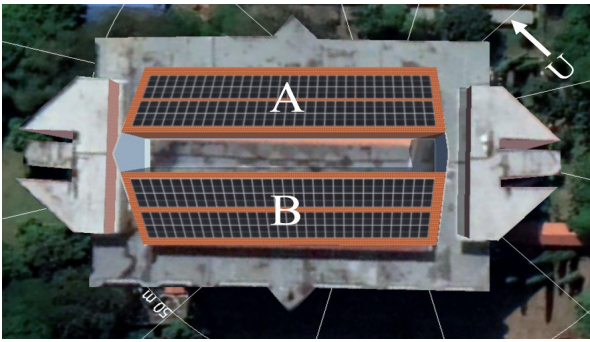
PV_{area} = Luas total area permukaan modul PV

PV_{eff} = Efisiensi modul PV

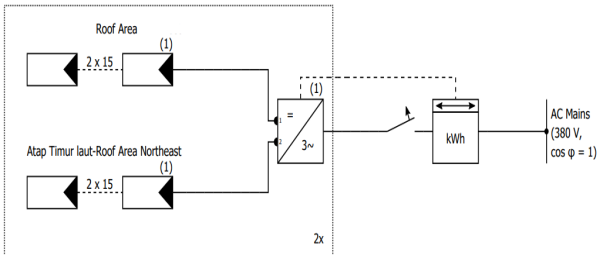
P_{loss} = *Losses* total sistem PLTS (PV dan Inverter)

Dari daya yang dapat dibangkitkan oleh sistem PLTS, maka persentase beban kelistrikan di Gedung Perpustakaan Kampus ITS yang dapat dilayani oleh sistem PLTS dapat dihitung menggunakan persamaan 2.

$$\%EC = \frac{AEP}{Load\ Consumption} \quad (2)$$

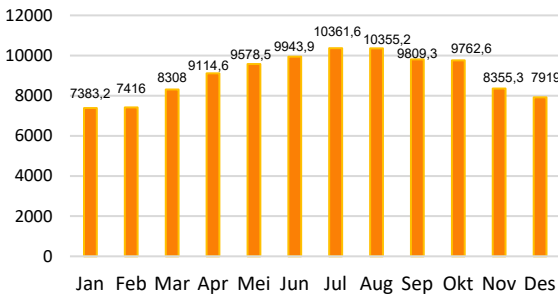


Gambar 6. Hasil pemodelan gedung perpustakaan kampus ITS pada kedua sisi atap.



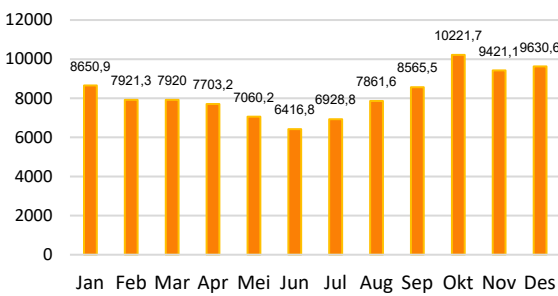
Gambar 7. Konfigurasi modul PV untuk 1 unit inverter.

Hasil Energi Perbulan (kWh)



(a)

Hasil Energi Perbulan (kWh)



(b)

Gambar 8. Distribusi output energi sistem PLTS on grid per bulan (a) sistem PLTS arah hadap timur laut (b) sistem PLTS arah hadap barat daya.

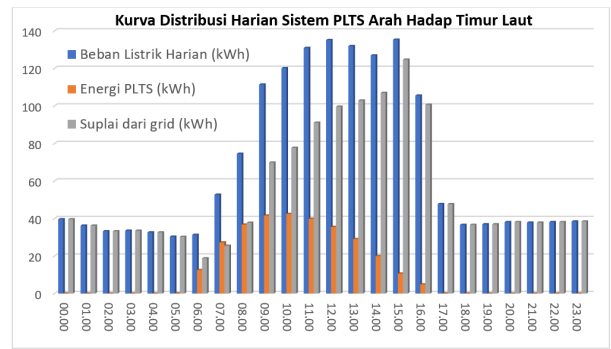
dengan

- $%EC$ = Persentase *energy coverage* / cakupan energi
- AEP = *Actual Energy Production* / produksi energi PLTS
- LC = *Load Consumption* / beban kelistrikan gedung

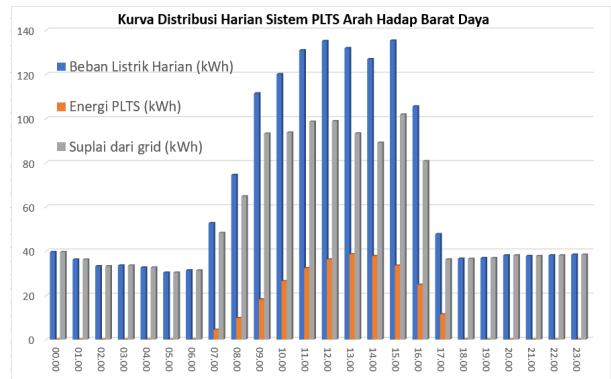
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Rekomendasi Kapasitas PLTS Atap On grid

Simulasi yang dilakukan pada perangkat lunak dengan luasan area atap 439 m², merekomendasikan sisi atap gedung



(a)



(b)

Gambar 9. Distribusi output energi sistem PLTS on grid per hari (a) arah hadap timur laut (b) arah hadap barat daya.

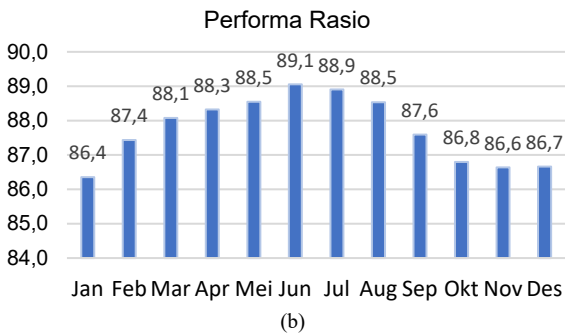
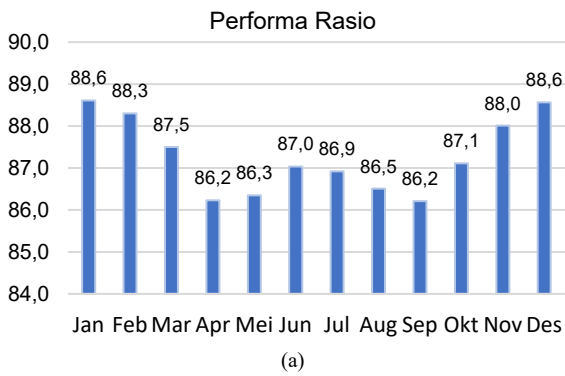
yang digunakan yang mengarah ke sisi timur laut dengan *azimuth* 45°. Iradiasi matahari pada atap arah timur laut memiliki potensi nilai iradiasi lebih tinggi dibandingkan dengan arah barat daya dengan penurunan nilai iradiasi pada arah barat daya sebesar 9,6 persen. Hal ini dikarenakan posisi Kota Surabaya yang terletak di selatan garis khatulistiwa sehingga atap pada arah timur laut mendapat intensitas iradiasi yang lebih tinggi. Hasil pemodelan gedung menghadap arah timur laut dengan PLTS *on grid* ditunjukkan pada Gambar 6.

Pemasangan modul PV secara vertikal, dengan jarak antar modul sebesar 0,02 meter untuk pemasangan *mid clamp* dan batas tepi atap sejauh 1 meter untuk memudahkan proses *maintenance* di kemudian hari. Berdasarkan penempatan modul PV pada luasan area atap gedung, simulasi perangkat lunak merekomendasikan kapasitas PLTS yang diinstalasi sebesar 66 kWp per satu sisi atap. Merujuk pada rekomendasi kapasitas dan spesifikasi modul per unit, maka jumlah modul PV yang dibutuhkan sebanyak 120 unit untuk satu sisi atap.

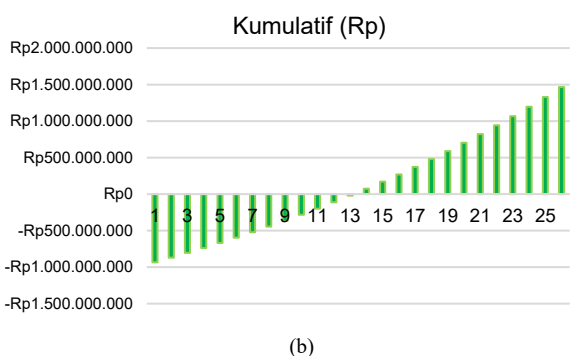
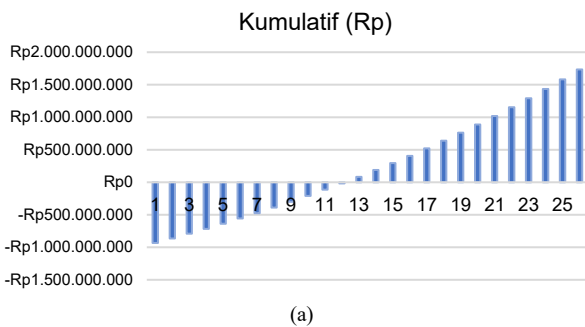
Selanjutnya, berdasarkan tipe inverter yang digunakan, maka jumlah inverter yang dibutuhkan sebanyak 2 unit sehingga besaran DC/AC ratio yang digunakan adalah 1,32. Mempertimbangkan jumlah MPPT pada 2 inverter yang digunakan, maka terdapat 4 MPPT dengan 2 input string per MPPT yang dapat dimanfaatkan untuk memperoleh ekstraksi daya pada 120 modul PV. Konfigurasi modul PV dan inverter yang diusulkan yaitu setiap 15 modul PV disusun menjadi satu string, sehingga diperoleh total string untuk kedua inverter adalah 8 string. Gambar 7 menunjukkan konfigurasi PLTS yang diusulkan.

B. Hasil Pembangkitan Energi dan Reduksi Karbon

Hasil energi yang dibangkitkan oleh sistem PLTS pertahun ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5.



Gambar 10. Nilai performance rasio (PR) sistem PLTS atap on grid pada gedung perpustakaan kampus ITS (a) arah hadap timur laut (b) arah hadap barat daya.



Gambar 11. Arus kas kumulatif 25 tahun masa proyek (a) sistem PLTS arah hadap timur laut (b) sistem PLTS arah hadap barat daya.

Hasil energi yang dibangkitkan dari sistem PLTS atap on grid tidak sepenuhnya mampu menyuplai kebutuhan beban kelistrikan Gedung Perpustakaan Kampus ITS. Hal ini dikarenakan terdapat rugi-rugi sistem yang mempengaruhi energi yang dihasilkan. Parameter-parameter yang mempengaruhi hasil pembangkitan energi meliputi kenaikan suhu dari kondisi *standard test condition* (STC) sehingga berdampak pada penurunan *output* daya, dan *losses mismatch* yang diakibatkan karena ketidaksesuaian dari manufaktur [14-15]. Selain itu, jam operasional PLTS yang hanya

Tabel 1.

Ukuran luas area atap 1 sisi (A/B)	
Parameter	Spesifikasi
Panjang Atap	36 m
Tinggi	7 m
Lebar Alas	10 m
Sudut Kemiringan	35°
Luas	439 m ²

Tabel 2.

Spesifikasi modul PV JAM72S30-55-MR	
Parameter Elektrik	
Nominal power	550 Wp
Nominal power voltage (Vmpp)	41,96 V
Nominal power current (Impp)	13,11 A
Open circuit voltage (Voc)	49,9 V
Short circuit current (Isc)	14 A
Parameter Mekanik	
Dimensi	2.279 mm × 1.134 mm
Luas	2,58 m ²
Berat	28,6 Kg

Tabel 3.

Spesifikasi inverter SMA sunny tripower 25000TL	
DC Input	
Max input voltage	1000 V
Operating voltage range	390 – 800 V
Rated input voltage	600 V
Maximum input current per MPPT	33 A
Number of MPP tracker	3
String per MPPT input	2
AC Output	
Grid Connection	3φ
Rated power output	25 kW
Maximum apparent power	25 kVA
Rated output voltage	220 Vac / 380 Vac
Rated AC grid frequency	50 Hz, 60 Hz
Maximum output current	36,2 A
Maximum total harmonic distortion	<3%
Efficiency	
Maximum Efficiency	98,3%

berfungsi pada siang hari menyesuaikan dengan ketersediaan energi matahari.

Berdasarkan Tabel 4 dan 5, dapat diketahui bahwa sistem PLTS on grid pada Gedung Perpustakaan Kampus ITS dengan kapasitas 66 kWp per satu sisi atap mampu menghasilkan energi sebesar 108,282 kWh/tahun pada sistem PLTS arah hadap timur laut, sedangkan pada sistem PLTS arah hadap Barat Daya mampu menghasilkan energi sebesar 98.227 kWh/tahun. Distribusi *output* energi dari sistem PLTS on grid setiap bulannya ditunjukkan pada Gambar 8.

Dari energi yang dihasilkan tersebut, kebutuhan beban kelistrikan pada Gedung Perpustakaan Kampus ITS yang dapat disuplai oleh sistem PLTS atap on grid dapat dilihat pada Gambar 9.

Total penggunaan beban perhari 1634,4 kWh pada hari aktif dan hasil rata-rata energi harian PLTS sebesar 300,47 kWh, maka diperoleh persentase cakupan energi sebesar 18,38% perharinya pada sistem PLTS arah hadap timur laut, sedangkan pada sistem PLTS arah hadap barat daya hasil rata-rata energi harian PLTS sebesar 273,43 kWh, maka diperoleh persentase cakupan energi sebesar 16,72%. Sistem PLTS bekerja efektif pada pukul 07.00 hingga pukul 17.00 WIB, Sedangkan pada malam hingga pagi hari, beban kelistrikan akan disuplai penuh dari *grid*. Hal ini sekaligus menunjukkan bahwa pemilihan sistem PLTS atap on grid sudah tepat untuk direncanakan pada Gedung Perpustakaan Kampus ITS karena profil kebutuhan beban kelistrikan meningkat pada siang hari. Selain itu, energi yang dihasilkan

Tabel 4.
Hasil pembangkitan energi per tahun sistem PLTS arah hadap timur laut

Parameter	Nilai	Satuan	Losses (%)
Iradiasi Global	1881,9	kWh/m ²	
Radiasi Pada PLTS	583.613	kWh	
Konversi Energi Pada Modul PV			
Efisiensi Modul PV (21,29 %)	459.389	kWh	-78,71 %
Hasil Energi Modul PV	124.224	kWh	
<i>Partial shading</i>	-0	kWh	-0%
<i>Low light performance</i>	-463,41	kWh	-0,37%
<i>temperature</i>	-9734,6	kWh	-7,87%
<i>Manufacturing Mismatch</i>	-2508,6	kWh	-2%
Konversi Energi Pada Inverter			
Energi pada inverter	111.517	kWh	
<i>Mpp matching</i>	-89,02	kWh	-0,08%
<i>Clipping losses</i>	-746,48	kWh	-0,67%
Konversi DC/AC	2.359,8	kWh	-2,13%
Konsumsi daya inverter	-24,20	kWh	-0,02%
Total Perolehan Energi			
Hasil Total Energi	108.307	kWh	
Hasil Energi minus	108.282	kWh	
Konsumsi Energi Inverter			

Tabel 5.
Hasil pembangkitan energi per tahun sistem PLTS arah hadap barat daya

Parameter	Nilai	Satuan	Losses(%)
Iradiasi Global	1.699,49	kWh/m ²	
Radiasi Pada PLTS	527.056	kWh	
Konversi Energi Pada Modul PV			
Efisiensi Modul PV (21,29 %)	-414.870	kWh	-78,71 %
Hasil Energi Modul PV	112.185	kWh	
<i>Partial shading</i>	-0	kWh	-0%
<i>Low light performance</i>	-570,33	kWh	-0,51%
<i>temperature</i>	-8.478,95	kWh	-7,6%
<i>Manufacturing Mismatch</i>	-2.269	kWh	-2%
Konversi Energi Pada Inverter			
Energi pada inverter	100.867,5	kWh	
<i>Mpp matching</i>	-104,99	kWh	-0,1%
<i>Clipping losses</i>	-348,05	kWh	-0,35%
Konversi DC/AC	-2.097,69	kWh	-2,09%
Konsumsi daya inverter	-24,18	kWh	-0,02%
Total Perolehan Energi			
Hasil Total Energi	98.301	kWh	
Hasil Energi minus	98.277	kWh	
Konsumsi Energi Inverter			

oleh PLTS bisa langsung digunakan pada beban tanpa harus didistribusikan ke *grid* dan tidak ada energi sisa yang dapat disimpan menggunakan perangkat penyimpan energi seperti baterai.

Selain penghematan dari segi pembelian energi listrik, pembangunan sistem PLTS atap *on grid* pada Gedung Perpustakaan Kampus ITS juga memberikan dampak positif berupa pengurangan emisi CO₂ secara global. Besar emisi gas rumah kaca di region Jawa, Madura, Bali tahun 2021 sebesar 0,894 kg CO₂/kWh jika mengacu pada RUPTL PT PLN tahun 2021-2030. Sedangkan dari pemasangan PLTS 66 kWp pada Gedung Perpustakaan Kampus ITS yang diusulkan dalam penelitian ini berkontribusi mereduksi karbon sebesar 96,82 ton CO₂/tahun pada sistem PLTS arah hadap timur laut dan sebesar 87,87 ton CO₂/tahun pada sistem PLTS arah hadap barat daya. Distribusi reduksi CO₂ setiap bulannya secara lengkap ditunjukkan pada Tabel 6.

C. Analisis Teknis

Analisis teknis ditinjau berdasarkan hasil performance ratio (PR) dari sistem PLTS *atap on grid* pada Gedung Perpustakaan Kampus ITS. Nilai PR didapatkan dari

Tabel 6.
Kontribusi hasil reduksi CO₂

Bulan	Reduksi CO ₂ (Ton) PLTS timur laut	Reduksi CO ₂ (Ton) PLTS barat daya
Januari	6,6	7,7
Februari	6,6	7,0
Maret	7,4	7,0
April	8,1	6,8
Mei	8,5	6,3
Juni	8,8	5,7
Juli	9,2	6,1
Agustus	9,2	7,0
September	8,7	7,6
Oktober	8,7	9,1
November	7,4	8,4
Desember	7,0	8,6
Total Per tahun	96,82	87,87

Tabel 7.
Aspek biaya pelaksanaan

Parameter	Biaya (Rp)
<i>Capital Cost</i>	933.670.000
<i>Operation and Maintenance Cost</i>	9.336.720
<i>Life Cycle Cost</i>	1.062.441.766

Tabel 8.
Parameter kelayakan ekonomi sistem PLTS arah hadap timur laut

Parameter	Hasil
<i>Cost of Energy (COE)</i>	Rp 706,31 / kWh
<i>Net Present Value (NPV)</i>	Rp 414.656.910
<i>Interest Rate of Return (IRR)</i>	8,8%
<i>Benefit Cost Ratio (BCR)</i>	1,44

Tabel 9.
Parameter kelayakan ekonomi sistem PLTS arah hadap barat daya

Parameter	Hasil
<i>Cost of Energy (COE)</i>	Rp 778,21 / kWh
<i>Net Present Value (NPV)</i>	Rp 278.214.097
<i>Interest Rate of Return (IRR)</i>	7,7%
<i>Benefit Cost Ratio (BCR)</i>	1,29

perbandingan energi ideal (E_{ideal}) terhadap hasil energi sistem PLTS (E_{yield}). Besaran nilai PR sangat bergantung pada nilai keseluruhan *losses* yang terjadi pada sistem PLTS. Semakin tinggi nilai *losses*, maka akan semakin rendah nilai PR yang dihasilkan sistem PLTS.

Dari perbandingan energi ideal (E_{ideal}) terhadap hasil energi sistem PLTS (E_{yield}), maka didapatkan besaran nilai PR perbulannya yang ditunjukkan pada Gambar 10. Nilai PR tertinggi terjadi pada bulan Januari dengan nilai performa 88,6% dan terendah terjadi pada bulan September dengan nilai performa sebesar 86,2%. Nilai rata-rata performa dalam satu tahun adalah 87,2% pada sistem PLTS arah hadap timur laut, sedangkan pada sistem PLTS arah hadap Barat Daya Nilai PR tertinggi terjadi pada bulan Juni dengan nilai performa 89,1% dan terendah terjadi pada bulan Januari dengan nilai performa sebesar 86,4% dengan rata-rata performa dalam satu tahun adalah 87,7%. maka secara teknis sistem PLTS *atap on grid* yang direncanakan pada Gedung Perpustakaan Kampus ITS dapat dikatakan layak pada kedua sisi arah hadap untuk direalisasikan karena memiliki nilai performa melebihi 0,6 atau 60%.

D. Kelayakan Ekonomis

Aspek biaya yang dibutuhkan dalam realiasi proyek, meliputi biaya investasi awal (*capital cost*), *operation and maintenance* (O&M) *cost*, dan *life cycle cost* (LCC) dari 25 tahun masa operasi proyek sistem PLTS *atap on grid* pada

Gedung Perpustakaan Kampus ITS, selengkapnya ditunjukkan Tabel 7.

Dari data yang ditampilkan di Tabel 7, maka kelayakan ekonomis dari sistem PLTS atap *on grid* yang direncanakan pada Gedung Perpustakaan Kampus ITS dapat diperoleh berdasarkan beberapa parameter penentu yang ditampilkan pada Tabel 8 dan Tabel 9.

Sistem PLTS arah hadap timur laut memiliki Nilai COE diperoleh sebesar Rp 706,72/kWh, yang mana nilai ini lebih murah jika dibandingkan dengan tarif energi yang dibayarkan pihak ITS ke PLN, yaitu sebesar Rp 735 /kWh (Tarif Golongan S3). Sedangkan pada sistem PLTS arah hadap barat daya Nilai COE nya diperoleh sebesar 778,21/kWh, yang mana nilai tersebut lebih tinggi dari tarif energi yang dibayarkan pihak ITS ke PLN. NPV menghasilkan nilai positif sebesar Rp 414.656.910, Nilai IRR sebesar 8,8% dan BCR diperoleh sebesar 1,44 pada sistem PLTS sisi timur laut. Pada sistem PLTS sisi barat daya didapatkan nilai NPV sebesar Rp 278.214.097, Nilai IRR sebesar 7,7% dan BCR diperoleh sebesar 1,29. Dari seluruh parameter ekonomi menunjukkan bahwa investasi untuk proyek sistem PLTS atap *on grid* pada sisi atap timur laut Gedung Perpustakaan Kampus ITS layak untuk direalisasikan, sedangkan sistem PLTS arah hadap barat laut didapatkan nilai COE yang lebih tinggi dari tarif energi yang dibayarkan pihak ITS ke PLN. Merujuk pada hasil periode balik modal (*payback period*), diperoleh durasi selama 12 tahun pada sistem PLTS arah hadap timur laut dan selama 13 tahun pada sistem PLTS arah hadap barat daya dari 25 tahun masa operasi proyek dengan arus kas kumulatif seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.

V. KESIMPULAN

Analisis implementasi PLTS atap *on grid* pada sisi atap timur laut Gedung Perpustakaan Kampus ITS menunjukkan hasil layak secara teknis maupun ekonomi. Ketersediaan area atap gedung seluas 432 m² yang menghadap sisi timur laut, menghasilkan rekomendasi dari simulasi untuk instalasi kapasitas sebesar 66 kWp. Besar energi yang dihasilkan dari total kapasitas terinstal sebesar 108.282 kWh/tahun. Dari total energi tersebut, dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban kelistrikan gedung sebesar 18,38% dari total beban perhari. Nilai kelayakan teknis dari PR didapatkan sebesar 87,2%. Sedangkan untuk COE sebesar Rp 706,31/kWh, NPV menghasilkan nilai positif sebesar Rp 414.656.910, nilai IRR sebesar 8,8% dan nilai BCR sebesar 1,44. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa investasi untuk proyek sistem PLTS atap *on grid* pada sisi atap timur laut

Gedung Perpustakaan Kampus ITS layak untuk direalisasikan dengan estimasi *payback period* 12 tahun dari 25 tahun masa operasi proyek.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. M. Khan *et al.*, "Triangular relationship among energy consumption, air pollution and water resources in Pakistan," *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 1375–1385, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.01.094.
- [2] R. A. Aprilianto and R. M. Ariefianto, "Peluang dan tantangan menuju net zero emission (NZE) menggunakan variable renewable energy (VRE) pada sistem ketenagalistrikan di Indonesia," *J. Paradig.*, vol. 2, no. 2, pp. 1–13, 2021.
- [3] S. M. Ho, A. Lomi, E. C. Okoroigwe, and L. R. Urrego, "Investigation of solar energy: The case study in Malaysia, Indonesia, Colombia and Nigeria," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 9, no. 1, 2019.
- [4] R. A. Aprilianto and R. M. Ariefianto, "Assessment of Renewable Energy Power Generation in Tegal Regency, Indonesia Using HOMER Simulation," in *Mastering Energy Supply for Isolated Areas (MESfIA) 2021 International Conference*, 2021, pp. 225–230.
- [5] T. Sutikno, H. Satrian Purnama, R. A. Aprilianto, A. Jusoh, N. Satya Widodo, and B. Santosa, "Modernisation of DC-DC converter topologies for solar energy harvesting applications: A review," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 28, no. 3, p. 1845, Dec. 2022, doi: 10.11591/ijeecs.v28.i3.pp1845-1872.
- [6] L. El Iysaouy, M. Lahbabi, and A. Oumnad, "A novel magic square view topology of a PV system under partial shading condition," *Energy Procedia*, vol. 157, pp. 1182–1190, 2019.
- [7] A. Mansur, "Analisa kinerja PLTS on grid 50 kw p akibat efek bayangan menggunakan software pvsyst," *Transm. J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 23, no. 1, pp. 28–33, 2021.
- [8] M. Nazar, T. Zulfadli, and M. Abd, "Kajian unjuk kerja plts atap on grid di Dayah Ulee Titi sebagai upaya penghematan biaya operasional dayah," *J. Ilm. Tek. Unida*, vol. 2, no. 2, pp. 20–27, 2021.
- [9] B. S. Aprillia and M. A. Foury Rigoursyah, "Design On-Grid Solar Power System for 450 VA Conventional Housing using HOMER Software," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 771, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/771/1/012011.
- [10] H. Mubarak and T. K. Yoga, "Economic Studies of the Wind Turbin-Diesel Hybrid Power Generation System (Case Study at: Queen of the South Beach Resort Hotel, Yogyakarta, Indonesia)," in *2018 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication*, 2018, pp. 591–596.
- [11] S. Barua, R. A. Prasath, and D. Boruah, "Rooftop solar photovoltaic system design and assessment for the academic campus using PVsyst software," *Int. J. Electron. Electr. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 76–83, 2017.
- [12] A. S. Baitule and K. Sudhakar, "Solar powered green campus: a simulation study," *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 12, no. 4, pp. 400–410, 2017.
- [13] M. A. Hapsari and S. Subiyanto, "Fuzzy AHP based optimal design building-attached photovoltaic system for academic campus," *Int. J. Photoenergy*, vol. 2020, 2020.
- [14] N. H. Zaini, M. Z. Ab Kadir, M. Izadi, N. I. Ahmad, M. A. M. Radzi, and N. Azis, "The Effect of Temperature on A Mono-Crystalline Solar PV Panel," in *2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, 2015, pp. 249–253.
- [15] R. M. Smith, M. Matam, and H. Seigneur, "Mismatch losses in a PV system due to shortened strings," *Energy Convers. Manag.*, vol. 250, p. 114891, 2021.