

PERANCANGAN DAN SIMULASI SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) ATAP PADA MASJID JAMI' AL-MUHAJIRIN BEKASI

Nike Sartika^{*)}, Anisa Nur Rahmah Fajri dan Lia Kamelia

Jurusan Teknik Elektro, UIN Sunan Gunung Djati, Bandung, Indonesia

^{*)}E-mail: nikesartika@uinsgd.ac.id

Abstrak

Saat ini pemerintah sedang menggencarkan penggunaan energi terbarukan untuk mengurangi penggunaan energi fosil, salah satunya yaitu pemanfaatan energi surya sebagai pemasok listrik cadangan. Perkembangan PLTS di Indonesia kian waktu kian meningkat, hal ini dikarenakan Indonesia merupakan salah satu negara tropis yang memiliki potensi rata-rata energi surya yang cukup tinggi, yaitu sebesar 4,8 kWh/m²/hari. Penelitian ini merancang sebuah sistem PLTS *on-grid* pada atap Masjid Jami' Al-Muhajirin menggunakan perangkat lunak PVSyst untuk mengetahui potensi dan kelayakan dari segi ketenagalistrikan dan kelayakan dari aspek ekonomi. Sistem PLTS dengan kapasitas sebesar 8,2 kWp di atap Masjid Jami' Al-Muhajirin menggunakan 4 variasi rancangan sistem PLTS. Variasi 1 menggunakan panel polikristalin 150 Wp. Variasi 2 menggunakan panel polikristalin 250 Wp. Variasi 3 menggunakan panel surya monokristalin 150 Wp. Variasi 4 menggunakan panel surya monokristalin 250 Wp. Berdasarkan hasil rancangan dan simulasi menggunakan perangkat lunak PVSyst, yang paling layak diimplementasikan adalah sistem PLTS variasi 2 dengan produksi energi sebesar 12.31 MWh/tahun dan *performance ratio* sebesar 81.93%. Hasil analisis kelayakan investasi berdasarkan sudut pandang ekonomi dari keempat variasi menunjukkan bahwa investasi yang paling layak untuk diimplementasikan yaitu sistem PLTS variasi 1 karena memiliki nilai NPV yang paling besar dan waktu pengembalian dana investasi awal yang paling cepat.

Kata kunci: PLTS on-grid, PVSyst, performance ratio, NPV, payback period

Abstract

Currently, the government is intensifying the use of renewable energy to reduce the use of fossil energy, one of which is the use of solar energy as a backup electricity supplier. The development of solar power plant in Indonesia is increasing over time, this is because Indonesia is a tropical country that has a relatively high potential for solar energy, which is 4.8 kWh/m²/day. This study designed an on-grid solar power plant system on the roof of the Jami' Al-Muhajirin Mosque using the PVSyst software to determine the potential and feasibility from an electricity perspective and economic feasibility. The solar power plant system with a capacity of 8.2 kWp on the roof of the Jami' Al-Muhajirin Mosque uses 4 variations of the solar power plant system design. Variation 1 uses a 150 Wp Polycrystalline panel. Variation 2 uses a 250 Wp Polycrystalline panel. Variation 3 uses a 150 Wp Monocrystalline solar panel. Variation 4 uses a 250 Wp Monocrystalline solar panel. Based on the results of the design and simulation using the PVSyst software, the most feasible implementation is the solar power plant variation 2 system with an energy production of 12.31 MWh/year and a performance ratio of 81.93%. The results of the investment feasibility analysis based on the economic point of view of the four variations show that the most feasible investment to implement is the solar power plant system variation 1 because it has the largest NPV value and the fastest initial investment payback time.

Keywords: on-grid solar power plant, PVSyst, performance ratio, NPV, payback period

1. Pendahuluan

Energi surya merupakan salah satu energi baru terbarukan yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber pembangkitan listrik dengan menggunakan teknologi panel surya. Indonesia memiliki potensi radiasi surya yang besar yaitu 4,8 kWh/ m²/hari [1] sehingga sangat memungkinkan untuk mengembangkan penggunaan surya sebagai salah

satu energi alternatif untuk mengurangi penggunaan energi fosil yang terbatas dan memiliki banyak dampak negatif yang dapat merusak bumi. Pemerintah saat ini mengeluarkan beberapa kebijakan terkait penggunaan energi baru terbarukan (EBT) dan mengurangi penggunaan energi fosil dengan menargetkan pemanfaatan energi baru terbarukan paling sedikit 23% pada tahun 2050 [2]. Menurut, RUPTL PT PLN (Persero)

periode 2018 s.d. 2027, pemerintah berencana menambah kapasitas pembangkit sebesar 56.395 GW. Dari jumlah tersebut, EBT akan dibangun sebesar 16 GW atau sekitar 26,7% [3]. Menurut data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, jumlah Pembangkit Listrik Tenaga Surya menurut Permen ESDM Nomor 12 dan Nomor 13 tahun 2019 yang terpasang hingga tahun 2019 di Indonesia hanya 9.761,5 MW [4]. Dimana nilai tersebut masih jauh dari target yang diinginkan oleh pemerintah yang ingin mengembangkan potensi PLTS atap sebesar 3600 MW pada tahun 2025.

Beberapa penelitian terkait perancangan sistem PLTS atap telah dilakukan. Elieser Tarigan [5] merancang sistem PLTS pada gedung kampus Universitas Surabaya yang dimaksudkan untuk mengurangi emisi gas CO₂ dan didapat kesimpulan bahwa PLTS dapat dijadikan pilihan alternatif pembangkit listrik yang lebih efisien, ramah lingkungan dan lebih murah. Penelitian yang dilakukan Surabhi Sharma, dkk. [6] menyajikan studi kasus tentang desain sistem PLTS pada institusi pendidikan yang dibantu oleh perangkat lunak PVSyst. Penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui kinerja sistem PLTS yang tergantung pada lokasi geografis, nilai radiasi matahari, maupun jenis modul PV yang digunakan menggunakan perhitungan teoritis yang akan didukung dengan hasil dari simulasi.

Imad H. Ibrak [7] melakukan asesmen pada sistem PV yang telah terpasang pada gedung kampus kedokteran di An-Najah National University, Nablus, Palestine. Sistem PLTS dilihat selama tiga tahun dari tahun 2016 sampai 2018 yang terdiri dari 128 panel PV, inverter DC/AC, dan meteran yang terhubung grid. Kemudian Brahmantya Aji Pramudita, dkk. [8] meneliti mengenai analisis faktor ekonomi PLTS pada beban perumahan berkapasitas 2200 VA yang menggunakan analisis ekonomi metode *Break Event Point* (BEP) dan *Net Present Cost* (NPC) dengan membandingkan hasil pemakaian daya di rumah sebelum dan sesudah menggunakan PLTS *on-grid*. Hasil dari penelitian yang dilakukan adalah rumah sesudah dipasangkan sistem PLTS *on-grid* mengalami penurunan konsumsi daya sebesar 21,89% dibandingkan rumah yang tidak dipasang sistem PLTS. Dengan demikian, NPC dapat turun sebesar 13,12%-15,31%. Hasil menunjukkan bahwa sistem PLTS *on-grid* rumah percobaan lebih unggul dibandingkan rumah pembanding yang tidak menggunakan sistem PLTS.

Dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dapat disimpulkan bahwa sistem PLTS *on-grid* pada atap memiliki kelayakan yang cukup baik untuk diaplikasikan sebagai pilihan pembangkit listrik yang bersumber dari energi alternatif.

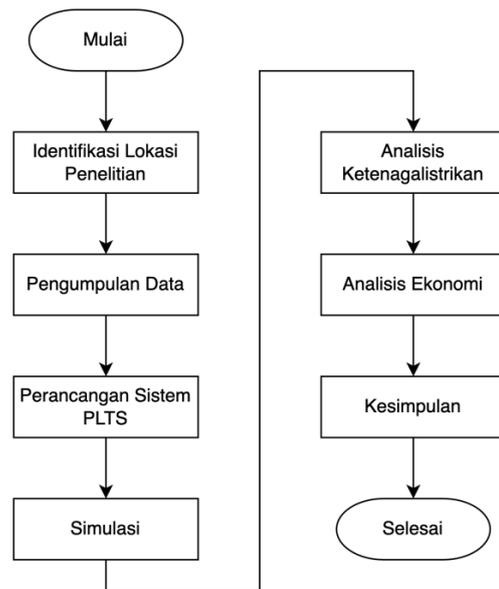
Pada penelitian ini dilakukan perancangan dan simulasi kelayakan sistem PLTS *on-grid* pada atap Masjid Jami' Al-Muhajirin. Simulasi dilakukan dengan menggunakan

perangkat lunak PVSyst. Selanjutnya melakukan analisis kelayakan dari aspek ketenagalistrikan maupun dari aspek ekonomi.

2. Metode

Sistem PLTS *on-grid* merupakan sistem PLTS yang terhubung dengan jaringan PLN [9]. Sistem PLTS *on-grid* ini terdiri dari sejumlah panel surya, *inverter*, unit pengatur, dan peralatan yang terhubung ke jaringan. Sistem ini tidak menggunakan baterai.

Perancangan sistem PLTS *on-grid* pada atap Masjid Jami' Al-muhajirin harus memenuhi beberapa persyaratan untuk dinyatakan sebagai sistem PLTS yang layak untuk diimplementasikan, baik layak menurut aspek ketenagalistrikan ataupun layak menurut aspek ekonomi. Pada perancangan ini pemilihan komponen utama sistem PLTS sangat penting dalam menentukan kualitas sistem PLTS dan biaya investasi. Proses perancangan sistem PLTS disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses Perancangan Sistem PLTS

Panel surya adalah sebuah komponen yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik [10]. Penggabungan sejumlah panel surya menjadi suatu komponen biasa dikenal dengan solar *array* [11]. Panel surya yang digunakan pada perancangan sistem PLTS menggunakan dua jenis panel surya yang paling sering digunakan, yaitu panel surya monokristalin dan panel surya polikristalin. Tipe monokristalin memiliki wujud fisik dengan warna biru polos dan tanpa corak. Tipe monokristalin ini memiliki nilai efisiensi yang tinggi, yaitu 16%-17% bahkan bisa mencapai nilai efisiensi sebesar 20% [12]. Sedangkan wujud fisik tipe polikristalin adalah berwarna kebiruan dan bercak biru tua. Efisiensi dari modul surya

polikristalin lebih rendah dari jenis monokristalin, yaitu sekitar 12%-14 % [13].

2.1. Identifikasi Lokasi

Pada penelitian ini, dirancang sebuah sistem PLTS *on-grid* pada atap Masjid Jami' Al-Muhajirin Bekasi yang berlokasi di Jl. Komodo Raya, Bekasi Selatan dengan titik koordinat (-6.2338302, 106.9814553). Masjid ini memiliki bentuk atap prisma dengan 4 sisi, dimana setiap sisinya memiliki luas 224 m². Bentuk atap Masjid Jami' Al-Muhajirin dari atas terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Tampak Atap Masjid Jami' Al-Muhajirin Bekasi

2.2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan dengan metode observasi atau pengamatan pada Masjid Jami' Al-Muhajirin Bekasi untuk mendapatkan data-data yang diperlukan sebagai dasar perancangan sistem PLTS *on-grid*. Adapun data-data yang dibutuhkan yaitu, intensitas radiasi matahari, beban listrik pada masjid, luas atap dan harga komponen yang akan digunakan pada sistem PLTS.

2.3. Perancangan PLTS

Perancangan manual ini dilakukan untuk mengetahui beberapa nilai yang akan dijadikan parameter pada simulasi. Hasil perhitungan teoritis ini dijadikan pembandingan terhadap nilai yang dihasilkan dari simulasi PVSyst. Adapun tahap-tahap perancangan sistem PLTS, yaitu:

a) Penentuan titik lokasi

Beberapa hal yang harus diperhatikan saat menentukan titik lokasi penempatan sistem PLTS yaitu kondisi fisik dari lokasi PLTS, menentukan titik koordinat lintang, bujur, ketinggian, menghitung total luas wilayah yang akan digunakan sebagai tempat peletakan panel, kemiringan serta sistem pemasangan PLTS dan beban daya yang terpasang pada lokasi tersebut [14]. Untuk menentukan kapasitas sistem PLTS yang dirancang dapat menggunakan persamaan berikut:

$$P_{peak} = \frac{\text{Energi per hari}}{\text{Radiasi matahari rata-rata}} \quad (1)$$

Nilai P_{peak} perlu ditambahkan 15-25% karena sistem PLTS mengalami rugi-rugi.

b) Nilai radiasi matahari

Radiasi matahari adalah jumlah keseluruhan dari energi matahari yang diterima pada titik lokasi tertentu dalam satuan kWh/m²/hari [15]. Pengukuran radiasi matahari dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu pengukuran secara langsung yang diambil selama siang hari dan pengukuran radiasi berdasarkan data dari satelit. Pada penelitian ini, nilai radiasi matahari didapat dari *database* Meteonorm.

c) Pemilihan spesifikasi panel surya

Pemilihan panel surya sangat penting dalam perancangan sistem PLTS yang akan dibuat. Pemilihan panel surya ini dapat ditentukan berdasarkan efisiensi panel surya, area modul dan biaya perancangan. Untuk mengetahui berapa jumlah panel surya yang digunakan dapat dihitung dengan persamaan berikut [14]:

$$\text{Jumlah}_{\text{panel surya}} = \frac{P_{\text{PLTS yang dirancang}}}{P_{\text{panel surya yang digunakan}}} \quad (2)$$

d) Pemilihan spesifikasi inverter

Pemilihan *inverter* ini bergantung pada kapasitas sistem PLTS yang dirancang. Untuk penentuan spesifikasi *inverter* sebuah sistem PLTS dapat menggunakan persamaan berikut [14]:

$$\text{Kapasitas inverter} = \text{jumlah panel} \times \text{kapasitas panel} \quad (3)$$

e) Konfigurasi rangkaian *array* sistem PLTS

Ketika merancang sebuah PLTS, jenis panel surya dan jenis *inverter* harus diperhatikan karena untuk menghasilkan produksi daya keluaran yang optimal pada rangkaian sistem PLTS maka *array* panel surya harus disesuaikan dengan *inverter*. Konfigurasi rangkaian *array* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut [10]:

$$\text{seri minimal} = \frac{V_{\text{min inverter}}}{V_{\text{oc panel surya}}} \quad (4)$$

$$\text{seri maksimal} = \frac{V_{\text{max inverter}}}{V_{\text{mp panel surya}}} \quad (5)$$

$$\text{paralel} = \frac{I_{\text{max input inverter}}}{I_{\text{mp panel surya}}} \quad (6)$$

2.4. Analisis Ketenagalistrikan

Analisis ketenagalistrikan ini mengacu pada kualitas kelayakan implementasi dari rancangan sistem PLTS *on-grid*. Adapun indikator kelayakan sistem PLTS dari aspek

ketenagalistrakan adalah *Performance Ratio* (PR). *Performance ratio* didefinisikan sebagai rasio dari jumlah sebenarnya energi panel surya yang dikirim ke jaringan PLN dalam jangka waktu tertentu dengan jumlah teoritis energi yang dihasilkan oleh panel surya. PR merupakan persentase yang menunjukkan daya total yang dihasilkan oleh sistem PLTS dengan adanya pengaruh rugi-rugi dibandingkan dengan produksi daya listrik pada sistem PLTS yang ideal. Sebuah sistem PLTS dinyatakan layak jika memiliki persentase PR sebesar 70%-90%. PR dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Performance\ Ratio = \frac{E_{yield}}{E_{ideal}} \quad (7)$$

Dimana:

E_{yield} : energi keluaran sistem PLTS dalam satu tahun
 E_{ideal} : energi ideal sistem PLTS

Energi keluaran dan energi ideal dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$E_{yield} = kapasitas\ PV \times N \times H_{tilt} \times efisiensi \quad (8)$$

$$H_{tilt} = PSH \times 365\ hari \quad (9)$$

Dimana:

E_{yield} : rata-rata keluaran energi PLTS (Wh)
N : jumlah panel dalam *array* sistem PLTS
 H_{tilt} : radiasi matahari (1 PSH = 1 kWh/m²)
PSH : *Peak Sun Hours* (kWh/m²)
Efisiensi : 100% - *losses* (%)

Sedangkan untuk mengetahui nilai dari energi ideal yang dihasilkan dari PLTS dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$E_{ideal} = kapasitas\ PV \times N \times H_{tilt} \quad (10)$$

Dimana:

E_{ideal} : keluaran produksi energi PLTS tanpa *losses* (Wh)
N : jumlah panel dalam *array* sistem PLTS
 H_{tilt} : radiasi matahari (1 PSH = 1 kWh/m²)

2.5. Analisis Ekonomi

Analisis ekonomi ini dilakukan untuk mengetahui kelayakan investasi sistem PLTS dari sudut pandang ekonomi. Analisis aspek ekonomi dari sistem PLTS ini terdiri dari analisis biaya yang meliputi biaya investasi awal, biaya operasional dan perawatan, dan biaya pergantian komponen, biaya siklus hidup, *levelized cost of energy*, aliran kas masuk, aliran kas keluar, aliran kas bersih, *net present value* dan *payback period*.

a) Net Present Value (NPV)

NPV digunakan untuk mengevaluasi kelayakan sebuah sistem PLTS yang dirancang. Hasil NPV dipengaruhi oleh aliran kas bersih dan nilai investasi awal. Aliran kas bersih merupakan uang yang dihasilkan oleh sistem PLTS setelah dipotong oleh aliran kas keluar. Untuk menghitung nilai aliran kas bersih dapat menggunakan persamaan berikut:

$$Aliran\ kas\ bersih = kas\ masuk - kas\ keluar \quad (11)$$

Aliran kas masuk pada penelitian ini diasumsikan sebagai aliran uang yang masuk setiap tahunnya selama sistem PLTS beroperasi. Aliran uang masuk ini dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$cash\ flow\ benefit = LCoE \times produksi\ energi\ PLTS \quad (12)$$

$$LCoE = \frac{LCC \times CRF}{kWh} \quad (13)$$

$$CRF = \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (14)$$

Dimana:

LCoE : biaya energi (Rp/kWh)
LCC : biaya siklus hidup
CRF : faktor pemulihan modal
n : periode dalam tahun (umur investasi)
i : tingkat diskonto

Sedangkan aliran kas keluar merupakan uang yang dikeluarkan pada setiap tahunnya selama sistem PLTS beroperasi yang terdiri dari biaya operasional dan perawatan.

Jika nilai NPV bernilai positif, maka sistem PLTS yang dirancang memperoleh keuntungan dan sebaliknya jika nilai NPV bernilai negatif maka rancangan sistem PLTS tersebut menimbulkan kerugian sehingga tidak layak untuk diimplementasikan [16]. Nilai NPV dihitung dengan persamaan berikut:

$$NPV = \sum_t^n \frac{NFC_t}{(1+i)^t} - investasi\ awal \quad (15)$$

Dimana:

NPV : *Net Present Value*
NFC_t: Arus kas bersih selama masa umur teknis PLTS
i : tingkat diskonto
n : periode dalam tahun (umur investasi)

b) Payback Period

Payback Period adalah salah satu parameter yang digunakan untuk menghitung waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan suatu nilai investasi. Satuan yang digunakan adalah tahun, bulan dan hari. *Payback Period* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{nilai investasi}}{\text{total kas bersih}} \times 1 \text{ tahun} \quad (16)$$

Sebagai salah satu penentu kelayakan, jika nilai *Payback Period* yang dihasilkan lebih lama dari waktu yang ditentukan pada rencana awal maka perencanaan pembangunan sistem PLTS tersebut dapat ditolak. Namun, jika waktunya singkat maka perencanaan pembangunan sistem PLTS tersebut dapat diterima [17].

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil dari perancangan PLTS pada atap Masjid Jami' Al-Muhajirin Bekasi adalah sebagai berikut:

3.1. Radiasi Sinar Matahari di Lokasi Penelitian

Potensi radiasi matahari yang didapatkan berdasarkan titik koordinat Masjid Jami' Al-Muhajirin disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Radiasi pada Masjid Jami' Al-Muhajirin Bekasi

Bulan	Radiasi Matahari (kWh/m ² /hari)
Januari	4.09
Februari	4.96
Maret	4.61
April	4.82
Mei	4.62
Juni	4.64
Juli	4.88
Agustus	5.11
September	5.34
Oktober	5.48
November	4.69
Desember	4.35

Berdasarkan data yang didapatkan, diketahui bahwa nilai radiasi matahari tertinggi terdapat pada bulan Oktober sebesar 5.48 kWh/m²/hari. Bulan Oktober memiliki nilai yang tinggi karena pada bulan tersebut merupakan puncak dari musim kemarau. Untuk nilai radiasi matahari terendah ada pada bulan Januari yaitu 4.09 kWh/m²/hari. Untuk rata-rata radiasi matahari dalam setahun yaitu sebesar 4.80 kWh/m²/hari.

3.2. Beban Daya Listrik Harian pada Masjid

Estimasi beban listrik pada Masjid Jami' Al-Muhajirin Bekasi didapatkan dari hasil pengamatan langsung pada objek dan juga wawancara kepada pihak DKM. Berdasarkan pengamatan maka didapatkan hasil estimasi maksimal beban daya listrik harian pada masjid sebesar 6703 watt. Masjid menggunakan daya listrik sebesar 5500 VA. Meskipun secara estimasi maksimal daya listrik melampaui daya yang terpasang, tapi secara kenyataan yang terjadi beban listrik tidak pernah melampaui daya listrik terpasang karena semua beban listrik yang ada tidak pernah digunakan dalam waktu yang bersamaan.

3.3. Komponen Utama Sistem PLTS

Komponen utama yang digunakan pada sistem PLTS adalah panel surya dan *inverter*. Sebelum menentukan komponen yang digunakan, kapasitas sistem PLTS harus dihitung terlebih dahulu. Dengan menggunakan persamaan (1), maka didapat kapasitas minimum yang dibutuhkan untuk perancangan sistem PLTS adalah sebesar 7.2 kWp. Namun karena sistem mengalami rugi-rugi maka ditambahkan 15%-25% sehingga sistem PLTS yang dirancang berkapasitas 8.2 kWp.

Panel surya yang digunakan pada perancangan sistem PLTS on-grid ini adalah tipe monokristalin dan polikristalin yang masing-masing berkapasitas 150 Wp dan 250 Wp. Untuk mengetahui jumlah modul surya yang dibutuhkan berdasarkan jenis dan kapasitasnya, dilakukan perhitungan sesuai dengan persamaan (2) sehingga didapatkan hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Kebutuhan Panel Surya

Jenis panel surya	Kapasitas panel surya	Total watt peak yang dirancang	Total panel yang dirancang
Polikristalin	150 Wp	8.2 kWp	55 panel
Polikristalin	250 Wp	8.2 kWp	33 panel
Monokristalin	150 Wp	8.2 kWp	55 panel
Monokristalin	250 Wp	8.2 kWp	33 panel

Sedangkan persamaan (4), (5), dan (6) digunakan untuk mengetahui konfigurasi rangkaian *array* sistem PLTS yang terdiri dari seri minimal, seri maksimal dan paralel. Hasil konfigurasi ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Konfigurasi Rangkaian Array

Variasi	Seri		Paralel
	minimal	maksimal	
Polikristalin 150 Wp	8 panel	55 panel	3 panel
Polikristalin 250 Wp	5 panel	33 panel	3 panel
Monokristalin 150 Wp	10 panel	55 panel	3 panel
Monokristalin 250 Wp	6 panel	33 panel	3 panel

Selanjutnya dengan menggunakan persamaan (3) maka didapat *inverter* yang digunakan berkapasitas sebesar 8 kWp.

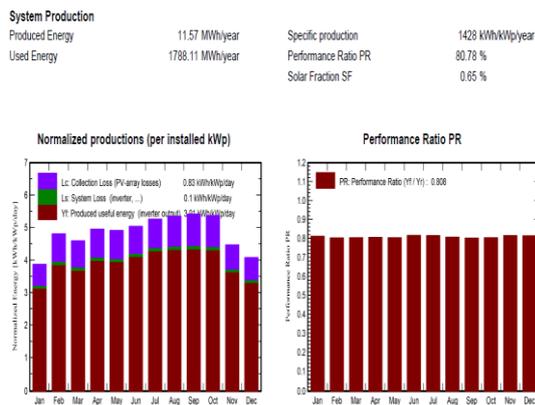
3.4. Simulasi

Dalam melakukan simulasi rancangan sistem PLTS pada Masjid Jami' Al-Muhajirin Bekasi menggunakan PVSyst, dibutuhkan data-data parameter yang akan mempengaruhi hasil keluaran simulasi dari rancangan sistem PLTS. Parameter pertama adalah derajat kemiringan panel yang ditentukan dengan *trial and error* yaitu sebesar 11° karena memiliki rugi-rugi sistem yang paling kecil. *Inverter* yang digunakan yaitu *inverter* SolarMax 8SMT-8kWp. Panel surya divariasikan jenis, kapasitas dan konfigurasi.

Perancangan yang dilakukan menggunakan sistem *roof-mounted* dengan penyangga panel tetap.

a) Variasi 1

Simulasi pertama yaitu variasi rancangan sistem PLTS menggunakan panel surya jenis polikristalin berkapasitas 150 Wp sebanyak 55 panel dengan konfigurasi *array* panel yang dipasang secara 3 panel string atau paralel. String 1 terdiri dari 25 panel yang disusun secara seri, string 2 dan 3 masing-masing terdiri dari 15 panel yang disusun secara seri. Gambar 3 menunjukkan bahwa total energi yang diproduksi oleh PLTS *on-grid* variasi 1 diprediksi sebesar 11.57 MWh pertahunnya. Produksi energi yang tertinggi terdapat pada bulan Agustus, yaitu mencapai 1112 kWh dan produksi energi terendah pada bulan Januari, yaitu sebesar 810 kWh. *Performance Ratio* (PR) yang diperoleh sistem PLTS variasi 1 ini mencapai 80.78% dimana nilai tersebut dianggap memenuhi kelayakan implementasi sistem PLTS karena sistem berkinerja baik.

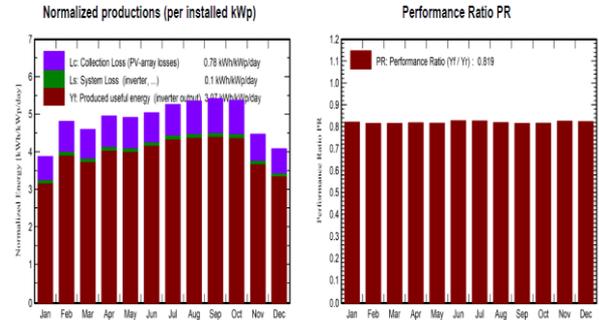


Gambar 3. Hasil Simulasi Sistem PLTS Variasi 1

b) Variasi 2

Simulasi kedua yaitu variasi rancangan sistem PLTS dengan menggunakan panel surya jenis polikristalin berkapasitas 250 Wp sebanyak 33 panel dengan konfigurasi *array* panel yang dipasang secara 3 panel string atau paralel. Masing-masing string terdiri dari 11 panel yang disusun secara seri. Gambar 4 menunjukkan bahwa total energi yang diproduksi oleh PLTS *on-grid* variasi 2 diprediksi sebesar 12.31 MWh pertahunnya dengan produksi energi tertinggi terdapat pada bulan Agustus yaitu mencapai 1184 kWh dan produksi energi terendah pada bulan Januari yaitu sebesar 860 kWh. *Performance Ratio* (PR) yang diperoleh sistem PLTS variasi 2 ini mencapai 81.93% dimana nilai PR variasi 2 lebih tinggi dibandingkan dengan nilai PR variasi 1. Sistem PLTS variasi 2 juga dianggap memenuhi kelayakan implementasi sistem PLTS karena sistem berkinerja baik.

System Production			
Produced Energy	12.31 MWh/year	Specific production	1448 kWh/kWp/year
Used Energy	1788.11 MWh/year	Performance Ratio PR	81.93 %
		Solar Fraction SF	0.69 %

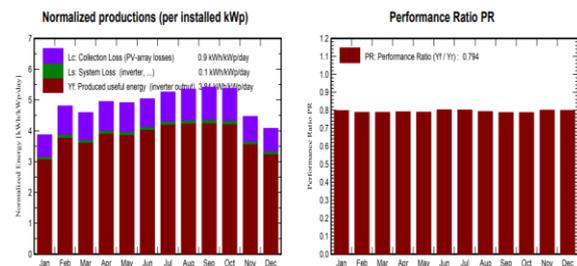


Gambar 4. Hasil Simulasi Sistem PLTS Variasi 2

c) Variasi 3

Simulasi ketiga yaitu variasi rancangan sistem PLTS dengan menggunakan panel surya jenis monokristalin berkapasitas 150 Wp sebanyak 55 panel dengan susunan 3 panel string atau paralel. String 1 terdiri dari 25 panel yang disusun secara seri, string 2 dan 3 masing-masing terdiri dari 15 panel yang disusun secara seri. Pada variasi ketiga ini, hasil simulasi menunjukkan bahwa energi yang diproduksi setiap tahunnya mencapai 11.79 MWh dengan energi tertinggi didapatkan pada bulan Agustus yaitu sebesar 1106 kWh dan energi terendah pada bulan Januari yaitu sebesar 804 kWh. *Performance ratio* (PR) yang dihasilkan pada variasi ini sebesar 79.38%. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 5.

System Production			
Produced Energy	11.79 MWh/year	Specific production	1403 kWh/kWp/year
Used Energy	1788.11 MWh/year	Performance Ratio PR	79.38 %
		Solar Fraction SF	0.66 %



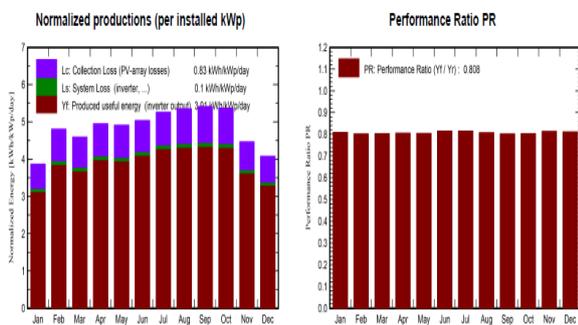
Gambar 5. Hasil Simulasi Sistem PLTS Variasi 3

d) Variasi 4

Simulasi keempat yaitu variasi rancangan sistem PLTS dengan menggunakan panel surya jenis monokristalin berkapasitas 250 Wp sebanyak 33 panel dengan konfigurasi *array* panel yang dipasang secara 3 panel string atau paralel. Masing-masing string terdiri dari 11 panel yang disusun secara seri. Gambar 6 menunjukkan

bahwa total energi yang diproduksi oleh PLTS *on-grid* diprediksi memproduksi energi sebesar 12.14 MWh pertahun dengan produksi energi tertinggi terdapat pada bulan Agustus yaitu mencapai 1168 kWh dan produksi energi terendah pada bulan Januari yaitu sebesar 848 kWh. *Performance ratio* (PR) yang diperoleh dari variasi 4 ini mencapai 80.77%. Sistem PLTS variasi 4 dianggap memenuhi kelayakan implementasi sistem PLTS karena sistem berkinerja baik.

System Production		Specific production	
Produced Energy	12.14 MWh/year	Specific production	1428 kWh/kWp/year
Used Energy	1788.11 MWh/year	Performance Ratio PR	80.77 %
		Solar Fraction SF	0.68 %



Gambar 6. Hasil Simulasi Sistem PLTS Variasi 4

3.6. Analisis Ketenagalistikan

Analisis aspek ketenagalistikan dari keempat variasi rancangan sistem PLTS dilakukan dengan cara membandingkan hasil simulasi PVSyst dengan perhitungan teoritis. Indikator kelayakan rancangan sistem PLTS yang dibandingkan dalam penelitian ini adalah *performance ratio* (PR) dan perbandingan energi rata-rata yang diproduksi dalam satu tahun. Data hasil perbandingan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Hasil Simulasi dan Teoritis

Keterangan	Hasil Simulasi PVSyst	Hasil Perancangan Teoritis
Variasi 1		
Energi yang diproduksi pertahun	11.57 MWh/tahun	12.28 MWh/tahun
<i>Performance ratio</i>	80.93%	85%
Variasi 2		
Energi yang diproduksi pertahun	12.31 MWh/tahun	12.28 MWh/tahun
<i>Performance ratio</i>	81.93%	85%
Variasi 3		
Energi yang diproduksi pertahun	11.79 MWh/tahun	12.28 MWh/tahun
<i>Performance ratio</i>	79.38%	85%
Variasi 4		
Energi yang diproduksi pertahun	12.14MWh/tahun	12.28 MWh/tahun
<i>Performance ratio</i>	80.77%	85%

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, produksi energi listrik sistem PLTS paling besar adalah variasi 2 atau sistem PLTS yang menggunakan panel polikristalin 250 Wp dan yang paling rendah ada pada variasi 3 atau sistem PLTS menggunakan panel monokristalin 150 Wp. Jika dilihat dari PR masing-masing variasi, variasi dengan PR yang paling tinggi adalah variasi 2 sebesar 81.93 % dan terendah adalah variasi 3 yaitu sebesar 79.8%. Dari analisis ketenagalistikan maka sistem PLTS yang layak diaplikasikan pada Masjid Jami Al-Muhajirin adalah sistem PLTS variasi 2 atau sistem yang menggunakan panel surya jenis polikristalin 250 Wp dengan keluaran energi pertahun sebesar 12.31 MWh dan *performance ratio* sebesar 81.93%.

3.7. Analisis Ekonomi

Sistem PLTS yang telah dirancang kemudian ditinjau kelayakan dari aspek ekonomi dan dipilih sesuai dengan perhitungan NPV serta *Payback Period*. Nilai investasi awal merupakan biaya yang pertama kali dikeluarkan atau yang harus dibayarkan saat ingin melakukan pembuatan suatu proyek. Adapun biaya investasi awal pada setiap variasi rancangan sistem PLTS *on-grid* dapat dilihat pada Tabel 5, 6, 7 dan 8.

Tabel 5. Biaya Investasi Awal Variasi 1

Nama Komponen	Jumlah	Satuan	Harga Satuan	Total Harga
Panel Surya polikristalin 150 Wp	55	Panel	Rp.1.050.000	Rp.57.750.000
Inverter Grid-Tie 8kW	1	Buah	Rp.25.152.407	Rp.25.152.407
Kerangka panel surya atap	55	Set	Rp.158.000	Rp.8.690.000
Kwh Meter Exim	1	Set	Rp.490.000	Rp.490.000
Kabel	1	Set	Rp.500.000	Rp.500.000
Peralatan proteksi	1	Set	Rp.2.000.000	Rp.2.000.000
Total Investasi Awal Variasi 1				Rp.94.582.407

Tabel 6. Biaya Investasi Awal Variasi 2

Nama Komponen	Jumlah	Satuan	Harga Satuan	Total Harga
Panel Surya polikristalin 250 Wp	33	Modul	Rp.2.250.000	Rp.74.250.000
Inverter Grid-Tie 8kW	1	Buah	Rp.25.152.407	Rp.25.152.407
Kerangka panel surya atap	33	Set	Rp.158.000	Rp.5.214.000
Kwh Meter Exim	1	Buah	Rp.490.000	Rp.490.000
Kabel	1	Set	Rp.500.000	Rp.500.000
Peralatan proteksi	1	Set	Rp.2.000.000	Rp.2.000.000
Total Investasi Awal Variasi 2				Rp.107.606.407

Biaya operasional dan perawatan yang rutin dilakukan setiap tahunnya untuk sistem PLTS *on-grid* diperkirakan sekitar 1 % sampai 2% dari total biaya investasi awal sistem. Perawatan yang dilakukan diantaranya adalah perawatan panel surya, perawatan kerangka panel surya, perawatan pentanahan dan perawatan alat proteksi sistem PLTS. Pada penelitian ini biaya operasional dan

perawatan diprediksikan 1% dari nilai investasi awal dikarenakan Indonesia hanya memiliki 2 musim sehingga biaya pemeliharannya cenderung lebih rendah. Biaya operasional perawatan PLTS *on-grid* pada Masjid Jami' Al-Muhajirin pertahunnya dan besarnya biaya perawatan selama umur proyek 20 tahun dengan tingkat diskonto 3.50% dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 7. Biaya Investasi Awal Variasi 3

Nama Komponen	Jumlah	Satuan	Harga Satuan	Total Harga
Panel Surya monokristalin 150Wp	55	Modul	Rp.2.352.000	Rp.129.360.00
Inverter Grid-Tie 8kW	1	Buah	Rp.25.152.407	Rp.25.152.407
Kerangka panel surya atap	55	Set	Rp.158.000	Rp.8.690.000
Kwh Meter Exim	1	Set	Rp.490.000	Rp.490.000
Kabel	1	Set	Rp.500.000	Rp.500.000
Peralatan proteksi	1	Set	Rp.2.000.000	Rp.2.000.000
Total Investasi Awal Variasi 3				Rp.166.192.407

Tabel 8. Biaya Investasi Awal Variasi 4

Nama Komponen	Jumlah	Satuan	Harga Satuan	Total Harga
Panel Surya monokristalin 250Wp	33	Modul	Rp.2.750.000	Rp.90.750.000
Inverter Grid-Tie 8kW	1	Buah	Rp.25.152.407	Rp.25.152.407
Kerangka panel surya atap	33	Set	Rp.158.000	Rp.5.214.000
Kwh Meter exim	1	Buah	Rp. 490.000	Rp. 490.000
Kabel	1	Set	Rp.500.000	Rp.500.000
Peralatan proteksi	1	Set	Rp.2.000.000	Rp.2.000.000
Total Investasi Awal Variasi 4				Rp.124.106.407

Tabel 9. Biaya Operasional dan Perawatan Sistem PLTS

Variasi sistem PLTS	Biaya investasi awal sistem PLTS	Biaya operasional dan perawatan PLTS pertahun	Biaya operasional dan perawatan selama PLTS beroperasi
Variasi 1	Rp.94.582.407	Rp. 945.824,1	Rp.13.442.434
Variasi 2	Rp.107.606.407	Rp.1.076.064,1	Rp.15.293.457
Variasi 3	Rp.166.192.407	Rp.1.661.924,1	Rp.23.619.936
Variasi 4	Rp.124.106.407	Rp.1.241.064,1	Rp.17.638.504

Untuk mengetahui nilai kas bersih dari sistem PLTS yang dirancang maka perlu diketahui arus kas yang masuk dan arus kas yang keluar. Nilai kas masuk adalah perhitungan biaya energi listrik yang sudah ditetapkan sebesar Rp.900/kWh dikalikan dengan produksi energi sistem PLTS. Arus kas keluar merupakan biaya operasional dan perawatan PLTS per tahun. Arus kas bersih dari rancangan sistem PLTS disajikan pada Tabel 10.

Net present value digunakan untuk menganalisis tingkat keuntungan yang didapatkan dari rancangan sistem PLTS. Pada analisis NPV arus kas masuk didefinisikan sebagai nilai biaya yang dihasilkan oleh sistem PLTS dan arus

keluar didefinisikan sebagai total biaya operasional dan perawatan, dan *discount rate* sebesar 3.5% berdasarkan catatan rilis Bank Indonesia pada Juli 2022. *Net present value* dari setiap variasi rancangan sistem PLTS disajikan pada Tabel 11

Tabel 10. Data Arus Kas Bersih Sistem PLTS

Variasi	Arus kas masuk	Arus kas keluar	Arus kas bersih
1	Rp.10.413.000	Rp. 945.824,1	Rp.9.467.175,9
2	Rp.11.079.000	Rp.1.076.064,1	Rp.10.002.935,9
3	Rp.10.611.000	Rp.1.661.724,1	Rp.8.949.076
4	Rp.10.926.000	Rp.1.241.064,1	Rp.9.684.935,9

Tabel 11. Data NPV Sistem PLTS

Variasi sistem PLTS	NPV
1	Rp.39.968.915
2	Rp.34.559.352,2
3	Rp.39.004.529,7
4	Rp.13.539.808

Berdasarkan Tabel 11, semua variasi rancangan sistem PLTS memiliki nilai NPV yang positif. Hal ini menunjukkan bahwa investasi sistem PLTS pada Masjid Jami' Al-Muhajirin Bekasi layak untuk direalisasikan karena menghasilkan keuntungan bagi pihak DKM Masjid Jami' Al-Muhajirin Bekasi.

Selanjutnya untuk mengetahui *payback period* rancangan sistem PLTS pada Masjid Jami' Al- Muhajirin, Bekasi maka perlu diketahui nilai biaya siklus sistem PLTS dan arus kas bersih dari rancangan sistem PLTS setiap tahunnya. *Payback period* setiap variasi rancangan sistem PLTS disajikan pada Tabel 12.

Tabel 12. Data Payback Period Sistem PLTS

Variasi	Nilai Investasi Awal	Total Kas Bersih	Payback Period
1	Rp.94.582.407	Rp.9.467.175,9	9 tahun 11 bulan
2	Rp.107.606.407	Rp.10.002.935,9	10 tahun 9 bulan
3	Rp.166.192.407	Rp.8.949.076	18 tahun 7 bulan
4	Rp.124.106.407	Rp.9.684.935,9	12 tahun 9 bulan

Berdasarkan Tabel 12, jangka waktu pengembalian dana investasi awal dari keempat variasi kurang dari umur sistem PLTS beroperasi yaitu 20 tahun. Waktu pengembalian biaya investasi awal yang paling pendek adalah variasi 1 yaitu dengan jangka waktu 9 tahun 11 bulan. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa investasi sistem PLTS pada Masjid Jami' Al- Muhajirin ini layak diimplementasikan.

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari penelitian ini adalah perancangan sistem PLTS memiliki 4 variasi dengan

menggunakan tipe panel surya dan kapasitas yang berbeda. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVSyst yang menunjukkan hasil *performance ratio* dan energi tertinggi maka variasi yang layak diimplementasikan adalah sistem PLTS variasi 2 dengan produksi energi sebesar 12.31 kWh/tahun dan *performance ratio* sebesar 81.93%. Hasil analisis kelayakan investasi dari sudut pandang ekonomi pada keempat variasi menunjukkan bahwa investasi yang paling layak untuk diimplementasikan yaitu sistem PLTS variasi 1, karena memiliki nilai NPV yang paling besar yaitu Rp.39.968.915 dan waktu pengembalian dana investasi awal yang paling cepat yaitu dengan waktu 9 tahun 11 bulan.

Referensi

- [1]. Dewan Energi Nasional, *Buku Bauran Energi Nasional 2020*. Jakarta: Sekretariat Jendral Dewan Energi Nasional, 2020.
- [2]. Presiden Republik Indonesia, *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) No. 79 Tahun 2014*. Jakarta, 2014.
- [3]. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2017 sd 2026," *Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*, Jakarta, 2017.
- [4]. Kementerian Energi Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor: 12 Tahun 2019 Tentang Kapasitas Pembangkit Tenaga Listrik Untuk Kepentingan Sendiri Yang Dilaksanakan Berdasarkan Izin Operasi," *KESDM*, Jakarta, 2019.
- [5]. Elisier Tarigan, "Simulation and Feasibility Studies of Rooftop PV System For University Campus Buildings in Surabaya, Indonesia," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 8, no. 2, pp. 895–908, 2018.
- [6]. S. Sharma, C. P. Kurian, and L. S. Paragond, "Solar PV System Design Using PVSyst: A Case Study of an Academic Institute," *International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCCCT)*, pp. 123–128, 2018.
- [7]. I. H. Ibrik, "Techno-economic Assessment of On-grid Solar PV System in Palestine," *Cogent Eng*, vol. 7, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.1080/23311916.2020.1727131.
- [8]. B. A. Pramudita, B. Sri Aprillia, and M. Ramdhani, "Analisis Ekonomi On Grid PLTS Untuk Rumah 2200 VA," *Jurnal Listrik, Instrumentasi dan Elektronika Terapan*, vol. 1, no. 2, pp. 23–27, 2020.
- [9]. M. A. Y., M. F. I., and I. M. Y., "Grid connected Photovoltaic system," in *International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering (ICCCCEE)*, 2017, pp. 1–5.
- [10]. M. A. Gumintang and M. F. Sofyan, *Design and Control of PV Hybrid System in Praticce*. Jakarta: GIZ GmbH, 2020.
- [11]. F. Arfianto, "Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off Grid Diatap Parkiran Motor Gedung Admisi Universitas Muhamadiyah Yogyakarta," Yogyakarta, 2018.
- [12]. E. Elibol, Ö. T. Özmen, N. Tutkun, and O. Köysal, "Outdoor Performance Analysis of Different PV Panel Types," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 651–661, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.051>.
- [13]. E. Elibol, Ö. T. Özmen, N. Tutkun, and O. Köysal, "Outdoor Performance Analysis of Different PV Panel Types," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 651–661, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.051>.
- [14]. USAID ICED II, *Panduan Perencanaan dan Pemanfaatan PLTS Atap di Indonesia*. Jakarta: Indonesia Clean Energy Development, 2020.
- [15]. A. H. Smets, K. Jager, R. A. van IsabelSwaaij, and M. Zeman, *Solar energy The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems*. Cambridge: UIT Cambridge, 2016.
- [16]. O. TS and T. C.H., "Net Present Value and Payback Period for Building Integrated Photovoltaic Projects in Malaysia," *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, Feb. 2013.
- [17]. F. Hidayat, B. Winardi, and A. Nugroho, "Analisis Ekonomi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Di Departemen Teknik Elektro Universitas Diponegoro," *TRANSIENT*, vol. 7, no. 4, 2019, doi: 10.14710/transient.7.4.875-882.