

Penggunaan Photovoltaic Sebagai Sumber Energi Terbarukan bagi BTS di Daerah Tanpa Aliran Listrik

Indah Kurniawati¹, Reynanda Bagus W.A.², M. Arif Batutah³, dan Ardy Santoso⁴

^{1,2,4}Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Muhammadiyah Surabaya

³Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Muhammadiyah Surabaya
Jl Sutorejo 59 Surabaya, Indonesia 60113

e-mail : indah.kurniawati@ft.um-surabaya.ac.id

Abstrak— Permintaan layanan teknologi seluler memaksa perusahaan komunikasi membangun banyak perangkat Base Transceiver Station (BTS) untuk memenuhi kebutuhan pelanggan. Pembangunan BTS harus mencakup segala area termasuk daerah terpencil yang tidak teraliri listrik. Salah satu contoh wilayah pulau terpencil yang belum teraliri listrik adalah Pulau Genting di Karimunjawa, dimana penerapan energi terbarukan yang ramah lingkungan dapat menjadi catu daya bagi BTS. Salah satu catu daya ramah lingkungan adalah menggunakan photovoltaic berbasis micro-grid system. Oleh karena itu, ketersediaan energi listrik sebesar 234 kWh dengan photovoltaic berbasis micro-grid system sebagai catu daya BTS yang ideal di Pulau Genting perlu direncanakan sekaligus menganalisis nilai ekonominya. Analisis data *micro-grid system* ini dilakukan dengan simulasi pada *PVSyst*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa *photovoltaic micro-grid system* yang ideal untuk BTS adalah menggunakan modul PV *monocrystal* 410 Watt sebanyak 192 unit dengan *Solar Charger Controller* 15 unit, baterai *lead-acid* 312 unit, inverter baterai 9 unit, nilai NVP sebesar 65.511.705 , nilai PI sebesar 1,0064 dan nilai DPP sebesar 25 tahun.

Kata kunci— *Base Transceiver Station; Nilai Ekonomi; Micro-Grid System; Photovoltaic; PVSyst*

Abstract— *The demands for cellular technology services makes communications companies build many Base Transceiver Station (BTS) devices to meet network needs. The BTS constructions must cover all areas, including the remote ones without electricity. The example of this remote area is Genting Island, in Karimunjawa District. In this area, environmentally friendly renewable energy can be used as a BTS power supply. One of the environment - friendly energy for power supply is photovoltaic based on micro-grid systems. Because of that, the availability of electrical energy of 234 kWh with photovoltaics based micro-grid system as an ideal power supply for BTS needs to be planned, as well as analyzed the economic values. Analysis of this micro-grid systems data was carried-out using simulation on PVSyst. The results of this research showed that the ideal photovoltaic micro-grid system for BTS is using 192 units of PV monocrystal 410 Watt moduls equipped with 15 units of Solar Charger Controller, 312 units of lead-acid batteries, and 9 units of batteries inverter. The NVP is 65.511.705, the PI is 1,0064, and the DPP is 25 years.*

Keywords— *Base Transceiver Station; Economic Value; Micro-Grid System; Photovoltaic; PVSyst;*

I. PENDAHULUAN

Permintaan sistem komunikasi yang lebih efisien membuat perusahaan telekomunikasi negara harus membangun banyak perangkat *Base Transceiver Station* (BTS) guna memenuhi kebutuhan pelanggan. Di sisi lain, pembangunan sarana BTS yang dilakukan oleh perusahaan telekomunikasi memiliki banyak permasalahan. Salah satu permasalahan tersebut yaitu BTS harus mencakup segala area, termasuk daerah yang tidak teraliri oleh listrik, seperti di daerah pegunungan, pulau yang jauh dari daratan utama, gurun, dan lain sebagainya. Secara umum terdapat banyak BTS yang dibangun di area pedesaan dan daerah terpencil. Dimana pasokan listrik untuk mencatu kebutuhan listrik BTS di daerah tersebut umumnya menggunakan generator set sebagai sumber energi utama. Di sisi lain, penggunaan

generator set secara kontinyu juga berdampak buruk bagi lingkungan. Hasil pembakaran bahan bakar diesel pada generator set menghasilkan polutan berupa gas CO₂ yang tidak ramah lingkungan. Berdasarkan permasalahan tersebut, penggunaan catu daya yang ramah lingkungan tanpa menggunakan bahan bakar fosil menjadi solusi yang tepat guna mengatasi permasalahan polutan gas sisa pembakaran diesel [1]. Industri Telekomunikasi (ICT) untuk catu daya BTS menghabiskan sekitar 900 MWh setiap tahunnya atau setara dengan 10% dari pemakaian listrik di dunia [2]. Dari presentase tersebut, penyumbang terbesar adalah industri telekomunikasi seluler, dan sekitar 60% sampai 80% adalah pemakaian untuk operasional BTS [3]. Dari hal tersebut, terdapat beberapa solusi penanganan optimasi konsumsi listrik, yaitu pengaturan penonaktifan elemen (*switching off elements*) ketika kebutuhan trafik

rendah, mengurangi beban listrik, dan pemilihan komponen yang ramah lingkungan atau berdaya rendah [4]. Berdasarkan ketiga strategi tersebut, penggunaan teknologi yang ramah lingkungan menjadi salah satu alternatif yang paling cocok untuk diterapkan pada sistem BTS milik perusahaan penyedia layanan telekomunikasi yang berada di wilayah kepulauan terpencil tersebut.

Penggunaan energi tenaga surya sebagai sumber energi alternatif akan memberikan dampak yang besar dalam menghemat penggunaan bahan bakar fosil. Banyaknya penelitian yang mendukung tentang penggunaan sistem tenaga surya (*photovoltaic*) pada daerah pedalaman ataupun pulau terpencil menunjukkan bahwa sistem tersebut lebih memungkinkan untuk dibangun dibandingkan dengan penggunaan generator diesel dan tenaga listrik tegangan tinggi dari penyedia listrik setempat (PLN/IPP) [5]. Di sisi lain, biaya instalasi sistem *photovoltaic* saat ini juga mulai mengalami penurunan. Penurunan biaya modul *photovoltaic*, biaya operasional, dan pemeliharaan memainkan peran yang semakin penting dalam efektivitas instalasi *photovoltaic*. Untuk mengoptimalkan instalasi sistem *photovoltaic*, maka diperlukan analisis nilai ekonomi agar interaksi antara biaya instalasi dan sistem dapat berjalan dengan baik [6]. Selain optimalisasi, perkembangan teknologi sistem *photovoltaic* juga menunjang proses perencanaan dan instalasi sistem tenaga surya. Salah satu bentuk perangkat lunak yang digunakan dalam proses desain ataupun pemodelan sistem *photovoltaic* adalah software *PVSyst*. Penggunaan perangkat lunak dapat memudahkan untuk mendesain sistem *photovoltaic* baik dari segi teknis maupun ekonomi [7]. Penggunaan perangkat lunak *PVSyst* untuk menganalisis kelayakan teknis dan ekonomis proyek pemasangan *photovoltaic* banyak dilakukan dalam penelitian. Kajian kelayakan proyek *photovoltaic rooftop on-grid* dalam fasilitas gedung yang dilakukan juga menggunakan analisis ekonomis. *PVSyst* yang memberikan informasi tentang spesifikasi komponen utama sistem *off-grid* meliputi *PV-Module*, *solar Charger Controller (SCC)*, dan *Battery* yang digunakan [8]. Berdasarkan hal tersebut dan permasalahan yang telah ada, maka tujuan makalah ini adalah merancang instalasi sistem tenaga surya (*photovoltaic*) berbasis *micro-grid system* yang digunakan untuk pencatu BTS di Pulau Genting, Karimunjawa. Selain itu, juga dilakukan analisis secara teknis dan ekonomi yang dikonfigurasi dengan simulasi perangkat lunak menggunakan software *PVSyst*.

II. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam perencanaan penggunaan *photovoltaic* sebagai sumber energi terbarukan untuk BTS di daerah tanpa aliran listrik Pulau Genting, Karimunjawa dimulai dengan pengumpulan data yang digunakan untuk perhitungan secara matematis dan simulasi. Data yang dipergunakan untuk perhitungan adalah total daya listrik yang diperlukan oleh BTS untuk bekerja untuk menghasilkan kualitas jaringan komunikasi yang baik sesuai parameter yang ditentukan. Tipe BTS ini sesuai dengan BTS yang digunakan oleh Perusahaan penyedia layanan seluler di Pulau Genting.

Data sekunder yang digunakan untuk perhitungan dan simulasi adalah data posisi geografis Pulau Genting menurut

lintang dan bujur, data radiasi dan energi matahari, kapasitas beban yang ada, besar energi surya yang ada di area instalasi, kapasitas PLTS yang dipasang beserta data ekonomi instalasi PLTS. Selanjutnya, data yang telah didapatkan akan dibandingkan hasil perhitungan secara matematis dan disimulasikan dengan software *PVSyst*.

2.1 Perencanaan *Micro-Grid System*

Perencanaan sistem PLTS *micro-grid system* dilakukan dengan memulai pemilihan peralatan-peralatan yang diperlukan dan memiliki spesifikasi sesuai dengan kebutuhan sebagaimana dijelaskan sebagai berikut :

A. *Photovoltaic*

Photovoltaic yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis *monocrystal* yang memiliki tingkat efisiensi yang tinggi. Selain itu, modul *photovoltaic* jenis *monocrystal* juga mudah ditemukan di pasaran. Modul *photovoltaic* jenis *monocrystal* yang digunakan merupakan merek SUN-EARTH DXM8-54H dengan variasi daya luaran sebesar 400, 405, dan 410 Watt Peak (WP). Tujuan pemilihan modul *photovoltaic* ini adalah ukurannya yang medium, sehingga mempermudah dalam proses mobilisasi dan instalasi maupun proses pemasangan panel. Adapun *datasheet* dari masing-masing modul *photovoltaic* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengumpulan Data Sekunder

No.	Data Spesifikasi	400	405	410	415	Satuan
1.	Rated Power (Pmax)	400	405	410	415	Watt
2.	Maximum Power (Pmax)	400	405	410	415	Watt
3.	Rate Voltage (Vmp)	31,10	31,20	31,30	31,40	Volt
4.	Rate Current (Imp)	12,86	12,97	13,10	13,22	Amper e
5.	Open-Circuit Voltage (Voc)	37,20	37,30	37,40	37,50	Volt
6.	Short-Circuit Current (Isc)	13,78	13,85	13,92	13,99	Amper e
7.	Module Efficiency	20,50	20,70	21,00	21,30	%

B. *Solar Charger Controller (SCC)*

Modul *Solar Charger Controller (SCC)* yang digunakan untuk dalam perancangan *micro-grid system* ini adalah merek 250/100-MC4 VE.Can (VITRON ENERGY) [9]. Adapun *datasheet* SCC 250/85-MC4 VE.Can dapat diamati pada Tabel 2 sebagai berikut :

Tabel 2. Datasheet SCC 250/100-MC4 (VITRON ENERGY)

No.	Data Spesifikasi	Nilai	Satuan
1.	Battery Voltage	48	Volt
2.	Rated Charge Current	100	Ampere
3.	Max PV Power	5800	Watt
4.	Max PV Short Circuit Current	70	Ampere
5.	Max PV Open Circuit Voltage	245 - 250	Volt
6.	Max Efficiency	99	%

C. Baterai

Baterai yang digunakan untuk dalam perancangan *micro-grid system* dalam penelitian ini adalah baterai jenis *lead-acid* dengan tegangan kerja sebesar 12 Volt, 3 RES, OPzS 190 (SUNLIGHT). Besar kapasitas baterai yang dibutuhkan akan disesuaikan untuk memenuhi konsumsi beban energi harian.

D. Inverter Baterai

Inverter baterai yang digunakan untuk dalam perancangan *micro-grid system* ini merupakan inverter baterai dengan merk SUNNY ISLAND 8.0 OH [10]. Adapun *datasheet* inverter baterai SUNNY ISLAND 8.0 OH dapat diamati pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Datasheet SUNNY ISLAND 8.0 OH

No.	Data Spesifikasi	Nilai	Satuan
1.	AC Voltage Range	202 - 253	Volt
2.	Rated Frequency	45 - 65	Hz
3.	Rated Power	6000	Watt
4.	Battery DC Input	48 - 63	Volt
5.	Battery Type (Lead Acid)	100 - 10000	Ah
6.	Max Efficiency	95,8	%

2.2 Analisis Model dan Parameter *Micro-Grid System*

Dalam perencanaan *micro-grid system*, penelitian ini akan menetapkan beberapa parameter, antara lain sebagai berikut:

A. Arah dan Sudut Kemiringan Modul *Photovoltaic*

Arah dan sudut kemiringan dari modul *photovoltaic* akan menentukan arah (*azimuth angle*) dan sudut kemiringan (*tilt angle*) modul *photovoltaic* saat instalasi *micro-grid system* di Pulau Genting, Karimunjawa. Hal ini penting untuk dilakukan dengan tujuan untuk mengoptimalkan energi matahari yang akan terkonversi oleh sistem. Berdasarkan data yang telah didapatkan dengan menggunakan aplikasi Google Earth, diketahui bahwa letak geografis Pulau Genting, Karimunjawa berada di bumi bagian utara.

Untuk menentukan nilai *azimuth angle* dan *tilt angle* modul *photovoltaic* yang sesuai dan ideal yaitu dengan menghadap bumi bagian selatan (0°) dengan rekomendasi sudut kemiringan (*tilt angle*) sebesar 5° sampai 15° sesuai dengan data yang telah didapatkan [11].

B. Potensi Energi Matahari dan Meteorologi Pulau Genting

Pengukuran energi matahari dan temperatur di Pulau Genting, Karimunjawa diperoleh dari data Tabel 5 yang dikeluarkan oleh NASA dan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Semarang tahun 2020 dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Temperatur dan Energi Matahari Wilayah

Bulan	Temperature ($^\circ\text{C}$)	Energi Matahari ($\text{kWh/m}^2/\text{days}$)
Januari	28,76	4,63
Februari	28,21	4,72
Maret	29,06	5,28
April	29,65	4,86
Mei	30,17	4,58
Juni	30,08	4,77
Juli	29,85	5,25
Agustus	30,37	5,85
September	30,46	5,95
Oktober	29,85	5,23
November	29,5	4,99
Desember	28,25	3,98
Total		
Rata-rata	29,52	5,088

Berdasarkan Tabel 3, untuk proses perencanaan *micro-grid system* dilakukan dengan menggunakan nilai energi harian matahari minimum yaitu sebesar $3,98 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$. Hal ini bertujuan agar sistem *photovoltaic* yang akan dikembangkan tetap dapat memenuhi kapasitas yang dibangkitkan. Data temperatur di wilayah Kabupaten Jepara sepanjang tahun 2020 memiliki rata-rata nilai sebesar $29,52 \text{ }^\circ\text{C}$. Sedangkan perencanaan *micro-grid system* menggunakan nilai temperatur maksimum berada pada nilai $30,46 \text{ }^\circ\text{C}$, dan temperatur berada pada nilai yang paling tinggi. Analisis nilai temperatur ini dapat digunakan untuk mendapatkan besar faktor koreksi temperatur (*Temperature Correction Factor*) pada *micro-grid system*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Model dan Parameter *Micro-Grid System*

A. Kapasitas Daya BTS

Kapasitas daya BTS merupakan total daya dan beban harian pada sebuah tower BTS yang digunakan. Berdasarkan data yang telah didapatkan, diketahui bahwa kapasitas daya untuk pengoperasian BTS selama sehari adalah sebesar $10,6 \text{ kVA}$ atau $8,48 \text{ kW}$. Jika BTS beroperasi dalam keadaan daya konstan selama 24 jam maka total daya yang dibutuhkan yaitu $203,52 \text{ kWh}$. Berdasarkan *micro-grid system* yang telah direncanakan, tahap berikutnya yaitu menentukan asumsi rugi-rugi (*losses*) dengan nilai sebesar 15%. Hal ini dikarenakan keseluruhan komponen sistem yang digunakan masih baru (bukan komponen lama atau bekas pakai). Sehingga total kebutuhan energi pada *micro-grid system* yang disyaratkan akan menjadi $234,048 \text{ Wh}$ atau $234,048 \text{ kWh}$.

B. Luas Area Photovoltaic (*PV Area*)

Data luas area untuk perencanaan *micro-grid system* sebagai catu daya operasional BTS di Pulau Genting, Karimunjawa sangat diperlukan. Perhitungan luas area PV digunakan untuk mengetahui dan menghitung jumlah PV yang akan dibangun di area tersebut berdasarkan pengukuran energi harian. Di sisi lain, total pemakaian daya listrik BTS yang akan disuplai oleh PLTS sebesar $234,048 \text{ kWh}$. Nilai insolasi harian matahari (*Gav*) akan menggunakan nilai insolasi rata-rata sejak tahun 2021, yaitu sebesar $5,51 \text{ kWh/m}^2$ (dapat diamati pada Tabel 5). Nilai efisiensi PV ($\eta \text{ PV}$) dan kapasitas PV ditentukan sesuai data

yang ada pada Tabel 3. Temperatur standar PV dapat beroperasi dengan baik dan optimal pada nilai temperatur sebesar 25 °C. Berdasarkan data yang berasal dari BMKG, temperatur rata – rata maksimum di kabupaten Jepara mencapai 30,5 °C (data dapat diamati pada Tabel 3). Perhitungan selisih kenaikan temperatur dari 25 °C menjadi 30,5 °C yaitu sebesar 5,5 °C. Kenaikan temperatur 1 °C pada *photovoltaic* akan mengakibatkan daya yang dihasilkan oleh panel surya akan mengalami penurunan sebesar 0,5%. Sehingga untuk menghitung luas area PV yang akan direncanakan dapat menggunakan persamaan 1.

$$PV \text{ Area} = \frac{EL}{G_{av} \times \eta_{pv} \times TFC \times \eta_{Out}} \quad (1)$$

Dengan EL merupakan pemakaian energi (kWh/hari), G_{av} adalah intensitas cahaya matahari (kWh/m²), η_{pv} yaitu efisiensi modul PV (%), TFC adalah faktor koreksi suhu (°C), η_{Out} merupakan efisiensi keseluruhan sistem PV (%). Adapun hasil luas area untuk kapasitas PV 405 Watt, 410 Watt, dan 415 Watt dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4 . Hasil Perhitungan Luas Area PV

Kapasitas PV (Watt)	Radiasi Matahari (kWh/m ² /hari)	Efisiensi PV (%)	Luas Area PV (m ²)
400	3,98	20,5	385
405	3,98	20,7	382
410	3,98	21,0	376
415	3,98	21,3	371

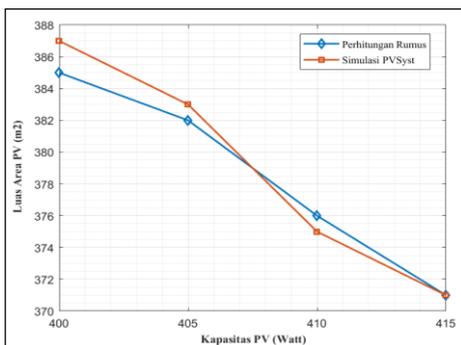
Untuk memperoleh hasil perbandingan luas area PV yang lebih akurat, maka dilakukan simulasi menggunakan *software PVSyst*. *PVSyst* yang digunakan pada perencanaan sistem ini adalah *PVSyst* versi 7.2. Hasil simulasi luas area PV dengan percobaan dapat diamati pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Simulasi Luas Area PV Dengan *PVSyst*

Kapasitas PV (Watt)	Tilt Angle (°)	Efisiensi PV (%)	Luas Area PV (m ²)
400	0°	20,5	387
405	5°	20,7	383
410	10°	21,0	375
415	15°	21,3	371

Hasil dari perhitungan dan simulasi selanjutnya digambarkan ke dalam grafik perbandingan luas area PV berdasarkan kapasitas PV yang akan dipasang. Sudut kemiringan dan arah PV yang dapat dilihat pada Gambar 1.

Dari gambar tersebut, dapat diamati bahwa perhitungan yang telah dilakukan dengan menggunakan Persamaan (1) dan simulasi menggunakan *PVSyst* terdapat perbedaan hasil.



Gambar 1. Grafik Perbandingan Luas Area PV

Perhitungan luas area untuk PV 400, 405, 410, dan 415 Watt yang didapatkan dengan menggunakan Persamaan (1) memiliki selisih 0 sampai 2 meter persegi (m²) jika dibandingkan dengan hasil simulasi *PVSyst*. Hasil perhitungan luas area PV dengan Persamaan (1) memiliki hasil nilai lebih efisien jika dibandingkan dengan hasil simulasi menggunakan *PVSyst*.

C. Perhitungan Daya *Photovoltaic*

Dari hasil perhitungan luas area PV yang telah dilakukan, untuk masing-masing kapasitas PV dapat dihitung nilai kapasitas daya PV (Wp) nya. Perhitungan daya PV ini menggunakan parameter *Peak Sun Insulation* (PSI) yaitu menggunakan nilai sebesar 1000W/m² dan efisiensi dari PV. Kedua parameter tersebut akan menentukan nilai total daya yang dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$Wp \text{ PV} = PV \text{ Area} \times PSI \times \eta_{PV} \quad (2)$$

Pada Persamaan (2), Wp PV merupakan total daya PV (Watt) yang dipasang, PV Area adalah luas area PV (m²), dan η_{pv} adalah efisiensi modul PV (%). Hasil perhitungan daya untuk kapasitas panel surya 400, 405, 410, dan 415 Watt dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Daya PV Menggunakan Rumus

Kapasitas PV (Watt)	PSI (W/m ²)	Efisiensi PV (%)	Luas Area PV (m ²)	Daya PV (kWp)
400	1000	20,5	387	78,925
405	1000	20,7	383	79,074
410	1000	21,0	375	78,960
415	1000	21,3	371	79,023

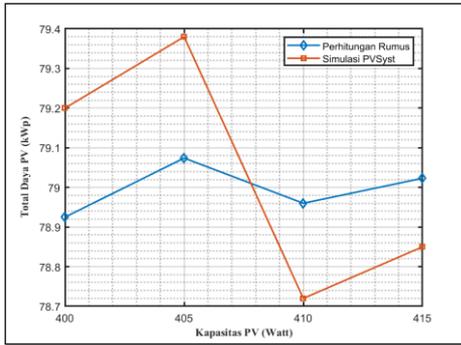
Untuk memperoleh hasil pembandingan perhitungan menggunakan persamaan pada parameter kapasitas daya PV, maka tahap berikutnya yaitu melakukan simulasi menggunakan *software PVSyst*. Hasil dari simulasi dapat diketahui pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Simulasi Daya PV Dengan *PVSyst*

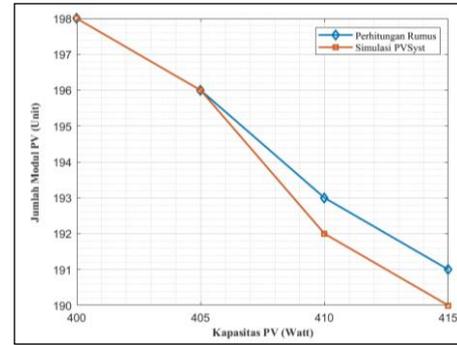
Kapasitas PV (Watt)	PSI (W/m ²)	Efisiensi PV (%)	Luas Area PV (m ²)	Daya PV (kWp)
400	1000	20,5	385	79,200
405	1000	20,7	382	79,380
410	1000	21,0	376	78,720
415	1000	21,3	371	78,850

Hasil perbandingan antara perhitungan secara analitik dengan proses simulasi *PVSyst* didapatkan hasil Daya PV yang sama yaitu berada pada nilai 79,00 kWp. Adapun grafik perbandingan perhitungan kapasitas daya PV dapat dilihat pada Gambar 2.

Pada Gambar 2 dapat diamati bahwa perhitungan yang telah dilakukan dengan menggunakan Persamaan (2) dan simulasi menggunakan *PVSyst* terdapat perbedaan hasil. Perhitungan daya pada PV dengan kapasitas 400 dan 405 Watt memiliki hasil lebih baik daripada hasil simulasi menggunakan *software PVSyst*. Sebaliknya untuk kapasitas PV sebesar 410 dan 415 Watt, nilainya lebih baik menggunakan perhitungan secara analitik menggunakan Persamaan (2).



Gambar 2. Grafik Perbandingan Nilai Kapasitas Daya PV



Gambar 3. Grafik Perbandingan Jumlah Modul PV

D. Perhitungan Jumlah Modul Photovoltaic

Berdasarkan hasil perhitungan kapasitas daya PV yang telah dilakukan untuk masing-masing kapasitasnya, maka dapat di analisis juga jumlah modul PV yang akan dibutuhkan. Perhitungan jumlah modul PV menggunakan parameter daya PV yang dibangkitkan (Wp) dan kapasitas PV. Perhitungan secara analitik dilakukan dengan menggunakan persamaan 3, 4, dan 5 sebagai berikut :
Jumlah Modul

$$PV = \frac{WP}{P_{PV}} \quad (3)$$

$$PV \text{ Array Seri} = \frac{V_{max SCC}}{V_{mp modul}} \quad (4)$$

$$PV \text{ Array Parallel} = \frac{I_{max SCC}}{I_{mp modul}} \quad (5)$$

Pada persamaan 3, 4, dan 5, untuk Wp merupakan total daya PV (*Watt Peak*), P_{PV} yaitu kapasitas daya PV yang digunakan (Watt), $V_{max SCC}$ adalah *open circuit voltage* SCC (Volt), $V_{mp modul}$ yaitu rata-rata tegangan pada modul PV (Volt), $I_{max SCC}$ merupakan rata-rata arus pengisian (Ampere), $I_{mp modul}$ adalah rata-rata arus pada modul PV (Ampere). Sedangkan hasil perhitungan menggunakan persamaan 3 yang bertujuan untuk menentukan kapasitas daya modul PV 400, 405, 410, dan 415 Watt dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Perhitungan Jumlah PV Menggunakan Rumus

Kapasitas PV (Watt)	Daya PV (kWp)	Luas Area PV (m ²)	Jumlah Modul PV
400	78,925	387	198
405	79,074	383	196
410	78,960	375	193
415	79,023	371	191

Untuk membandingkan hasil perhitungan persamaan pada Tabel 8, maka dapat dilakukan simulasi dengan software *PVsyst*. Hasil simulasi didapatkan hasil jumlah modul PV yang dapat diamati pada Tabel 9.

Tabel 9 Hasil Simulasi Jumlah PV Dengan *PVsyst*

Kapasitas PV (Watt)	Daya PV (kWp)	Luas Area PV (m ²)	Jumlah Modul PV
400	79,200	385	198
405	79,380	382	196
410	78,720	376	192
415	78,850	371	190

Hasil perbandingan perhitungan dengan persamaan rumus dan simulasi *PVsyst* didapatkan beberapa perbedaan yang ada pada hasil untuk kapasitas modul PV 410 dan 415 Watt. Adapun grafik perbandingan perhitungan jumlah modul PV dapat dilihat pada Gambar 3.

Berdasarkan tersebut, perhitungan dengan persamaan untuk kapasitas PV 410 Watt didapatkan bahwa jumlah modul PV yang diperlukan yaitu sebanyak 193 unit. Sedangkan untuk hasil simulasi menggunakan *PVsyst* diperlukan jumlah modul PV sebanyak 192 unit. Perhitungan dengan persamaan untuk kapasitas PV 415 Watt diperlukan jumlah modul PV sebanyak 191 unit, sedangkan jika dengan hasil simulasi *PVsyst* diperlukan jumlah modul PV sebanyak 190 unit. Dari hasil perbandingan yang telah diuraikan, terdapat selisih perbedaan 1 unit modul PV yang menunjukkan hasil simulasi *PVsyst* lebih efisien.

E. Perhitungan Kapasitas Solar Charger Controller (SCC)

Solar Charger Controller (SCC) yang digunakan untuk dalam perancangan *micro-grid system* ini adalah SCC dengan tipe 250/100-MC4 sesuai dengan data pada Tabel 4. Pemilihan modul SCC berdasarkan sistem operasi daya BTS Telkomsel yaitu sebesar 48 VDC. Untuk menentukan jumlah SCC dapat dilakukan perhitungan menggunakan persamaan 6.

$$NSCC = \left(\frac{CPV \times NPV}{V_{DC} \times c_{SCC}} \right) + 1 \quad (6)$$

Dimana NSCC adalah jumlah SCC yang digunakan, CPV merupakan kapasitas modul PV (Watt), NPV yaitu total PV yang dihubungkan secara seri, VDC adalah tegangan nominal kerja (Volt), dan CSCC merupakan kapasitas output SCC (Ampere). Adapun hasil perhitungan modul SCC untuk kapasitas PV 400, 405, 410, dan 415 Watt dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Hasil Perhitungan Jumlah SCC Menggunakan Rumus

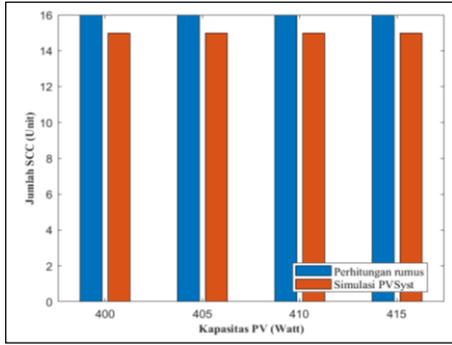
Kapasitas PV (Watt)	Jumlah Modul PV (Unit)	Tegangan (VDC)	Jumlah SCC (Unit)
400	198	53	16
405	196	53	16
410	193	53	16
415	191	53	16

Untuk membandingkan hasil perhitungan persamaan pada Tabel 12, maka dapat dilakukan dengan simulasi

dengan software *PVSyst*. Dari hasil simulasi, didapatkan bahwa hasil nilai SCC PV yang dapat diamati pada Tabel 13.

Tabel 13. Hasil Simulasi Jumlah SCC Dengan *PVSyst*

Kapasitas PV (Watt)	Jumlah Modul PV (Unit)	Tegangan (VDC)	Jumlah SCC (Unit)
400	198	53	15
405	196	53	15
410	192	53	15
415	190	53	15



Gambar 6. Grafik Perbandingan Jumlah Modul SCC

Hasil perbandingan antara perhitungan secara analitik dengan persamaan dan simulasi software *PVSyst* didapatkan perbedaan hasil untuk kapasitas PV 400, 405, 410 dan 415 Watt. Adapun grafik perbandingan perhitungan jumlah modul SCC dapat dilihat pada Gambar 6.

Berdasarkan Gambar 6, dapat diamati bahwa untuk perhitungan persamaan kapasitas PV 400, 405, 410, dan 415 Watt diperlukan jumlah modul SCC sebanyak 16 unit. Sedangkan untuk hasil simulasi *PVSyst* diperoleh sebanyak 15 unit. Dari hasil perbandingan diatas, terdapat selisih perbedaan 1 unit modul SCC. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi *PVSyst* lebih efisien untuk diimplementasikan.

F. Perhitungan Kapasitas Baterai

Baterai yang digunakan untuk dalam perancangan *micro-grid system* ini adalah baterai jenis Lead-Acid 12 Volt, 159 Ah 3 RES OPzS 190 (SUNLIGHT). Untuk menentukan jumlah kapasitas baterai harian dapat diperoleh melalui perhitungan menggunakan persamaan 7 dan 8.

$$BAHR = \frac{(Et \times n)}{(Vs \times DOD \times \eta)} \quad (7)$$

$$NBTR = \frac{BAHR}{I_b} \quad (8)$$

Dimana BAHR adalah kapasitas baterai (Ah), Et merupakan total beban (Watt), n yaitu jumlah hari psokan listrik, Vs adalah tegangan baterai (Volt), DOD merupakan persentase baterai yang digunakan (%), η yaitu efisiensi baterai (%), NBTR adalah jumlah baterai, dan I_b merupakan arus baterai (Ampere). Adapun hasil perhitungan baterai untuk PV 400, 405, 410, dan 415 Watt dapat dilihat pada Tabel 14.

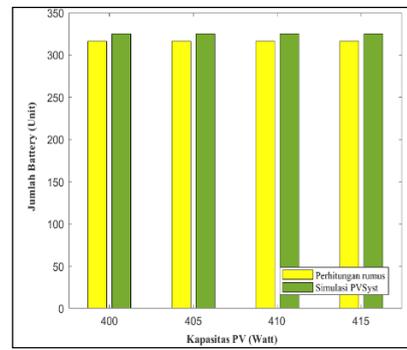
Tabel 14. Hasil Perhitungan Jumlah Baterai Menggunakan Rumus

Kapasitas PV (Watt)	DoD (%)	Efisiensi (%)	Tegangan (VDC)	Jumlah Baterai (Unit)
400	80	97	53	316
405	80	97	53	316
410	80	97	53	316
415	80	97	53	316

Untuk membandingkan hasil perhitungan persamaan Tabel 14, maka dapat dilakukan simulasi dengan software *PVSyst*. Dari hasil simulasi, didapatkan bahwa hasil jumlah baterai yang dapat diamati pada Tabel 15.

Tabel 15. Hasil Simulasi Jumlah Baterai Dengan *PVSyst*

Kapasitas PV (Watt)	DoD (%)	Efisiensi (%)	Tegangan (VDC)	Jumlah Baterai (Unit)
400	80	97	53	320
405	80	97	53	320
410	80	97	53	320
415	80	97	53	320



Gambar 7. Grafik Perbandingan Jumlah Baterai

Hasil perbandingan antara perhitungan analitik dengan persamaan dan simulasi software *PVSyst* didapatkan perbedaan hasil jumlah baterai PV yang berkapasitas 400, 405, 410 dan 415 Watt. Grafik perbandingan perhitungan jumlah modul PV dapat dilihat pada Gambar 7.

Berdasarkan Gambar 8, diketahui bahwa hasil perhitungan dengan persamaan untuk kapasitas PV 400, 405, 410, dan 415 Watt diperlukan jumlah baterai sebanyak 316 unit. Jika dibandingkan hasil simulasi dengan software *PVSyst* diperlukan jumlah baterai sebanyak 320 unit. Hasil perbandingan tersebut menunjukkan terdapat selisih perbedaan sebanyak 4 unit modul baterai. Hal ini menunjukkan hasil simulasi dengan software *PVSyst* lebih efisien.

G. Perhitungan Kapasitas Baterai Inverter

Dalam *micro-grid system* diperlukan inverter baterai untuk mengkonversi tegangan DC menjadi tegangan AC. Dimana asumsi pemakaian untuk beban AC dapat dilihat pada Tabel 16.

Tabel 16. Data Beban AC Pada Sistem BTS

Beban AC	Daya (Watt)	Penggunaan / Jam	Jumlah (Unit)	Total Daya (Wh)
PC / Mobile	240	9	2	4320
AC 2,5 PK	1000	20	2	40000

Dari hasil perhitungan analitik diatas, didapatkan asumsi pemakaian beban AC adalah 44320 Wh. Untuk menentukan

kapasitas inverter baterai yang ideal perlu dilakukan perhitungan menggunakan Persamaan (9).

$$\text{Kapasitas Inverter} = \text{Load AC} \times \text{SF} \quad (9)$$

Dimana SF adalah *safety faktor* (1,25). Hasil perhitungan menunjukkan kapasitas inverter baterai sebesar 6000 Watt. Hasil tersebut menunjukkan bahwa inverter baterai yang ideal untuk *micro-grid system* adalah SUNNY ISLAND 8.0 OH, sesuai data yang ada pada pada Tabel 5. Berdasarkan hasil perhitungan daya inverter, didapatkan hasil ideal total kebutuhan inverter baterai untuk *micro-grid system* sebesar 10 unit modul.

3.2 Analisis Nilai Ekonomi Perencanaan *Micro-Grid System* A. Biaya Investasi

Analisis nilai ekonomi perlu dilakukan untuk mengetahui kelayakan perencanaan pembangunan *micro-grid system* sebagai catu daya BTS di Pulau Genting, Karimunjawa. Biaya investasi awal sangat penting dilakukan agar perencanaan *micro-grid system* dapat dijalankan sesuai dengan perencanaan. Investasi ini meliputi perhitungan anggaran biaya untuk pekerjaan umum dan pengadaan material. Dari hasil analisis yang telah dilakukan, diketahui bahwa PV yang memiliki efisiensi terbaik memiliki kapasitas sebesar 410 Watt. Adapun perhitungan biaya investasi seperti pada Tabel 17.

Tabel 17. Biaya Investasi *Micro-Grid System*

No.	Uraian	Jumlah	Satuan	Jumlah Harga
1.	Biaya pekerjaan umum	1	Lot	Rp. 108.780.000
2	Biaya Material	1	Lot	Rp. 6.246.237.000

Dari analitik di Tabel 17, diketahui bahwa total biaya investasi awal *micro-grid system* sebagai catu daya BTS di Pulau Genting, Karimunjawa adalah sebesar Rp. 6.355.017.000.

B. Perhitungan Biaya Energi Sistem PLTS

Hasil luaran maksimum energi dari PV dapat ditentukan sesuai rating kapasitas modul surya yang terpasang. Pada *micro-grid system*, kapasitas keseluruhan *photovoltaic* yang diimplementasikan sebesar 78.720 Wp. Energi yang dihasilkan oleh modul PV berkaitan dengan data intensitas matahari pada system simulasi di software *PVSyst*. Pada perencanaan *micro-grid system* sebagai catu daya BTS Telkomsel di Pulau Genting, Karimunjawa. Durasi intensitas yang digunakan merupakan nilai rata-rata penyinaran matahari sebesar 4 - 5 jam. Total energi dari PV yang dihasilkan per tahun sebesar 123.218 kWh.

C. Perhitungan Biaya Operasional Dan Pemeliharaan

Besar biaya operasional dan pemeliharaan PLTS pada *micro-grid system* ditetapkan sebesar 1% dari total keseluruhan biaya investasi awal. Hal ini mengacu pada operasional dan pemeliharaan sistem umumnya sebesar 1%. Biaya operasional dan pemeliharaan pertahun yang bernilai 1% memiliki biay investasi sebesar Rp. 63.550.170 dari total biaya investasi keseluruhan.

D. Perhitungan Perhitungan Biaya Siklus Hidup (LCC)

Biaya siklus hidup pada *micro-grid system* ditentukan oleh nilai nyata biaya total sistem PLTS yang terdiri dari biaya investasi awal, biaya jangka panjang untuk biaya pemeliharaan, dan biaya operasional (MPW). *Micro-grid system* yang direncanakan dalam penelitian ini diasumsikan dapat beroperasi selama 25 tahun. Penentuan usia implementasi mengacu pada jaminan yang diberikan oleh produsen panel surya dan spesifikasi panel surya. Besarnya tingkat diskonto mengacu pada tingkat suku bunga kredit Bank Indonesia pada bulan Januari – Maret di tahun 2023, yaitu memiliki nilai rata-rata sebesar 9%. Besar nilai sekarang (*present value*) untuk biaya jangka panjang pemeliharaan dan operasional (MPW) PV selama usia implementasi sistem selama n tahun dengan tingkat diskonto sebesar i adalah Rp. 624.253.320. Untuk biaya siklus hidup (LCC) pada *micro-grid system* yang direncanakan merupakan jumlah biaya investasi ditambah dengan biaya pemeliharaan dan operasional (MPW) dengan besar nominal yaitu sebesar Rp. 6.979.274.642.

E. Perhitungan Perhitungan Biaya Energi (Cost Of Energy)

Perhitungan biaya energi (*Cost of Energy*) suatu PV ditentukan oleh biaya siklus hidup (LCC), faktor pemulihan modal (CRF) sebesar 0,1018, dan produksi tahunan (E_{pv} tahunan). Total rasio biaya energi adalah Rp. 5.800 per kWh.

F. Analisis Kelayakan Investasi

Kelayakan investasi *micro-grid system* ditentukan berdasarkan hasil perhitungan *Net Present Value* (NPV), *Profitability Index* (PI), dan *Discounted Payback Period* (DPP). Pada perhitungan investasi yang direncanakan, digunakan biaya energi PV (COE_{pv}) sebesar Rp. 5.800,-/kWh dan produksi energi tahunan *micro-grid system* sebesar 123.218 kWh/tahun. Berdasarkan proses analitik biaya energi dan produksi energi selama 1 tahun, maka biaya arus input dapat ditentukan sebesar Rp. 714.664.400. Untuk biaya arus output ditentukan berdasarkan biaya pemeliharaan dan operasional *photovoltaic micro-grid system* selama 1 tahun dengan besar nilai Rp. 61.124.410. Adapun hasil perhitungan biaya arus bersih (NCF) dan faktor diskonto (DF) menggunakan data Bank Indonesia pada bulan Maret 2023 dan nilai nyata biaya arus (PVNCF) selama 25 tahun dapat ditentukan sebesar Rp. 6.395.621.356. Teknik analitik *Net Present Value* (NPV) diperhitungkan dengan total nilai biaya arus nyata (PVNCF) dikurangi dengan biaya investasi awal. Sehingga nilai NPV didapatkan sebesar 40.604.356. Hasil perhitungan NPV akan bernilai positif dengan nominal Rp. 40.604.356 (>0). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa investasi *photovoltaic micro-grid system* yang akan dikembangkan layak untuk dilaksanakan. Untuk pengukuran teknik *profitability index* (PI) dihitung dengan total nilai biaya arus nyata (PVNCF) dibagi dengan biaya investasi awal sehingga nilai PI didapatkan sebesar 1,0064. Hasil perhitungan PI sebesar 1,0064 (>1) menunjukkan bahwa investasi *micro-grid system* yang akan dikembangkan layak untuk dilaksanakan. Untuk pengukuran metode *Discounted Payback Period* (DPP) diperoleh dengan menghitung jumlah tahun PVNCF akan sama dengan nilai investasi awal.

Nilai PVNCF telah melewati nilai investasi awal sebesar Rp. 6.355.017.000, dengan nilai sebesar Rp. 6.395.621.356 sehingga waktu yang diperoleh untuk mengembalikan modal awal dalam berinvestasi PV dengan baterai yaitu pada tahun ke-25. Dari pengukuran dan Analisis yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan bahwa pengembangan *photovoltaic micro-grid system* sangat layak untuk diimplementasikan.

IV. KESIMPULAN

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis kebutuhan energi listrik sebagai catu daya BTS di Pulau Genting, Karimunjawa, hasil perhitungan perencanaan *photovoltaic micro-grid system* yaitu 234.048 Wh. Dimana hasil perhitungan dan simulasi dengan software *PVSyst* untuk perencanaan *photovoltaic micro-grid system* sebagai catu daya BTS di Pulau Genting, Karimunjawa sebesar 234 kWh. Dimana untuk mendapatkan hasil ideal, diperlukan lahan dengan luas 375 m² dan 192 modul PV tipe mono-crystal yang berkapasitas 410 Watt, *Solar Charger Controller* (SCC) sebanyak 15 unit, baterai tipe lead-acid sebanyak 320 unit, dan inverter baterai yang berjumlah 10 unit. Analisis nilai ekonomi *photovoltaic micro-grid system* didapatkan nilai NPV bernilai positif sebesar 65.511.705 (>0), PI bernilai sebesar 1,010 (>1), dan DPP yang diperoleh untuk pengembalian modal awal investasi yaitu pada tahun ke-25. Sehingga hasil perencanaan *photovoltaic micro-grid system* sebagai catu daya BTS di Pulau Genting, Karimunjawa Jawa Tengah sangat layak untuk dilaksanakan.

REFERENSI

- [1] Saputra, & Jaya, A. N, (2017), "Analisis Penggunaan Panel Surya Sebagai Catu Daya Pada BTS PT.Telkomsel di Pulau Giligenting Madura".
- [2] Fettweis, G., & Zimmermann, E, (2008), "ICT Energy Consumption - Trends And Challenges".
- [3] Vereecken, W., W, V. H., Deruyck, M., Puype, B., & Lannoo, B, (2010), "Power Consumption in Telecommunication Networks: Overview and Reduction Strategies".
- [4] M, A. M., L, C., D, C., & M, M, (2009), "Optimal Energy Savings in Cellular Access Networks", pp. 1-5.
- [5] Mahmoud, M., & Ibrik, I, (2006), "Techno-economic feasibility of energy supply of remote villages in Palestine by PV-systems, diesel generators and electric grid. Renewable and Sustainable Energy Reviews", pp. 128-138.
- [6] Wittmer, B., & Mermoud, A, (2014), "A Tool To Optimize The Layout Of Ground-Based PV Installations Taking Into Account The Economic Boundary Conditions. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference". Amsterdam, NetherlandsM. Shell. (2002) IEEEtran homepage on CTAN. [Online]. Available: <http://www.ctan.org/tex-archive/macros/latex/contrib/supported/IEEEtran/>
- [7] Karuniawan, E. A, (2021), "Analisis Perangkat Lunak PVSYST, PVSOL dan HelioScope. Jurnal Teknologi Elektro".
- [8] Asrori, Ramdhani, A. F., Nugroho, P. W., & Eryk, I. H., (2022), "Kajian Kelayakan Solar Rooftop On-Grid untuk Kebutuhan Listrik Bengkel Mesin di Polinema".
- [9] SMA Solar Technology AG, (2023), www.sma.de/en/products/battery-inverters/sunny-island-44m-60h-80h., (Diakses 26 Januari 2023).
- [10] Victron Energy. (2023), www.victronenergy.com,(Diakses 29 Januari 2023).
- [11] Bagus Ramadhani, GIZ, (2018), "Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya: Dos & Don'ts", Jakarta: Energising Development (EnDev) Indonesia.