

ANALISA UNJUK KERJA ROOFTOP PV 185 KWP PADA SISTEM KELISTRIKAN KANTOR GUBERNUR BALI

¹Putu Billy Ezra Shaniga Punggawa, ²Awan Uji Krismanto
Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional, Malang, Indonesia
¹billypunggawa06@gmail.com, ²awan_uji_krismanto@lecturer.itn.ac.id

Abstrak—Pemerintah Provinsi Bali bekerja sama dengan Kementerian ESDM mengembangkan PLTS rooftop 158 kWp yang terhubung ke jaringan PLN. Energi yang dihasilkan hingga saat ini telah mengurangi suplai energi listrik dari PLN pada Kantor Gubernur Bali. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi energi yang dihasilkan oleh PLTS 158 kWp tersebut. Produksi energi diestimasi menggunakan Matlab. Data yang diperlukan yaitu lokasi PLTS, dan spesifikasi teknis PLTS. Simulasi menghasilkan data energi total dalam setahun sebesar 249.764 kWh/tahun dengan energi tertinggi terjadi pada bulan Mei sebesar 24.172 kWh dan energi terendah terjadi pada bulan Januari sebesar 16.226 kWh. Pemanfaatan sumber energi terbarukan dalam bentuk sistem pembangkit hybrid menjadi salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil. Sistem interaktif grid yang memanfaatkan photovoltaic array dan diesel generator sebagai sumber energi dapat diaplikasikan di Gedung Kantor Gubernur Bali yang mengandalkan sumber energi fosil. Perangkat lunak yang digunakan dalam pemodelan sistem ini yaitu software MATLAB. Hasil dari simulasi MATLAB bahwa PV Array dapat menghasilkan daya sebesar 26,4 kW. Tujuan pemodelan sistem ini yaitu mempermudah analisa sistem pembangkit hybrid PV dan diesel agar performanya sesuai yang diinginkan. Pemodelan dan simulasi tersebut dapat digunakan sebagai alat bantu dalam merancang, membangun dan menganalisa sistem pembangkit energi hybrid PV dan diesel.

Kata Kunci: Energi terbarukan, PLTS, Unjuk Kerja, Matlab, PLTD

I. PENDAHULUAN

Rencana Umum Energi Nasional adalah kebijakan pemerintah pusat yang mengatur pengembangan energi secara nasional. Kebijakan ini merupakan penjabaran dan rencana pelaksanaan Kebijakan Energi Nasional yang melibatkan sektor-sektor terkait, dengan tujuan mencapai sasaran Kebijakan Energi Nasional. RUEN berfungsi sebagai panduan untuk mengarahkan pengelolaan energi nasional, dengan fokus pada pencapaian kemandirian energi dan ketahanan energi nasional dalam mendukung pembangunan nasional yang berkelanjutan. Saat ini, pembangkitan energi

listrik masih sangat bergantung pada sumber energi fosil, yang berkontribusi sebesar 95%. Penggunaan energi baru terbarukan (EBT) baru mencapai 2% dari total potensinya[1]. Oleh karena itu, RUEN mencakup rencana pengembangan EBT dengan target minimal 23% dari total bauran energi pada tahun 2025, dan minimal 31% dari total bauran energi primer pada tahun 2050. Meskipun demikian, dalam RUEN yang telah diimplementasikan, pemerintah terus berupaya meningkatkan pemanfaatan energi baru dan terbarukan (EBT).

Provinsi Bali, beberapa pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) berskala besar telah dibangun, seperti PLTS Karangasem dan PLTS Bangli, masing-masing dengan kapasitas 1 MW dan terhubung ke jaringan listrik utama. Namun, menurut Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) untuk periode tahun 2017 hingga 2026, kontribusi energi baru dan terbarukan (EBT) hanya sebesar 12,9%. Jika diuraikan, EBT terbesar berasal dari sumber energi air sebesar 7,8%, panas bumi sebesar 4,3%, dan sumber EBT lainnya sebesar 0,8%. Di Bali sendiri, energi listrik yang berasal dari EBT hanya sekitar 1% dari total pembangkit listrik di wilayah tersebut[2]. Oleh karena itu, pemerintah perlu mengembangkan EBT lebih lanjut di Provinsi Bali mengingat permintaan listrik terus meningkat setiap tahunnya, terutama karena Bali adalah tujuan destinasi wisata dengan banyak hotel dan tempat hiburan yang membutuhkan pasokan listrik yang cukup. Salah satu upaya untuk mencapai target RUEN yang telah ditetapkan adalah dengan mengembangkan PLTS berskala besar dengan kapasitas antara 100 kW hingga 500 kW di seluruh wilayah Indonesia yang memiliki potensi untuk pembangunan PLTS[3].

Pada akhir tahun 2016, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) bekerja sama dengan Pemerintah Provinsi Bali membangun infrastruktur pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) di Kantor Gubernur Bali sebagai proyek percontohan. Proyek ini melibatkan pemasangan 640 panel

surya yang terhubung dengan jaringan mikro pintar (smart microgrid) untuk menghemat biaya listrik dan mendukung program Bali Clean and Green. PLTS dengan sistem jaringan mikro ini terletak di atap lapangan tenis area Kantor Gubernur Bali dan akan terhubung dengan baterai penyimpanan serta jaringan distribusi PLN yang sudah ada. Untuk mengetahui produksi energi yang dihasilkan oleh PLTS tersebut, penelitian dilakukan menggunakan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak Matlab. Simulasi ini akan memprediksi hasil energi yang dihasilkan oleh PLTS berdasarkan parameter-parameter yang diperlukan.

Pemanfaatan energi terbarukan semakin menjadi fokus dalam upaya mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil yang terbatas dan berdampak negatif pada lingkungan. Salah satu bentuk pemanfaatan energi terbarukan adalah dengan penggunaan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Namun, meskipun PLTS memiliki banyak keunggulan, ada situasi di mana sistem ini tidak dapat memenuhi kebutuhan listrik secara optimal, terutama dalam kondisi cuaca buruk atau saat permintaan listrik yang tinggi.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, diperkenalkan konsep PLTS Hybrid Generator Diesel. Sistem ini menggabungkan dua sumber daya utama, yaitu energi surya dari PLTS dan mesin generator diesel konvensional. Dengan mengintegrasikan kedua sumber daya ini, sistem PLTS Hybrid Generator Diesel dapat memberikan pasokan listrik yang stabil dan terjamin, bahkan dalam situasi yang tidak ideal.

II. KAJIAN PUSTAKA

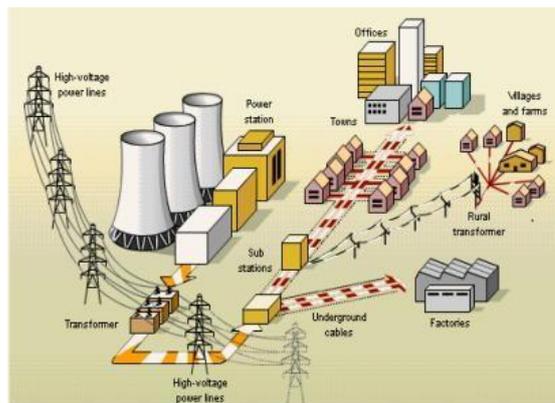
A. Sistem Ketenaga Listrikian

Sistem kelistrikan, yang juga dikenal sebagai sistem tenaga listrik, mengacu pada struktur yang terlibat dalam menghasilkan, mentransmisikan, mendistribusikan, dan menggunakan energi listrik. Sistem ini terdiri dari sejumlah komponen dan subsistem yang bekerja secara sinergis untuk menyediakan pasokan listrik yang aman, dapat diandalkan, dan efisien. Sistem tenaga listrik adalah gabungan dari berbagai komponen atau perangkat listrik seperti generator, transformator, saluran transmisi, saluran distribusi, dan beban yang saling terhubung dan membentuk suatu sistem[4].

Secara umum, sistem tenaga listrik mencakup sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi, yang digambarkan secara keseluruhan dalam gambar 2.1. Baru-baru ini, sistem distribusi, jika dilihat dari skala nasional, diperkirakan memiliki biaya investasi yang sebanding dengan fasilitas pembangkitan. Berdasarkan pengalaman, sistem distribusi, bersama dengan sistem pembangkitan, biasanya memerlukan biaya investasi hingga 80% dari total investasi yang dikeluarkan untuk sistem tenaga listrik.

Istilah Distributed Generation sebenarnya bukan hal yang baru, karena sistem interkoneksi jaringan listrik saat ini pada dasarnya merupakan sistem yang terdiri dari distributed generation. Namun, istilah Distributed Generation baru-baru

ini lebih ditekankan pada pembangkit listrik dengan kapasitas relatif lebih kecil, yang umumnya menggunakan sumber energi terbarukan, dan diinterkoneksi dengan jaringan listrik yang sudah ada yang sebelumnya disuplai oleh pembangkit listrik berkapasitas besar.



Gambar. 1 Distributed generation

B. Prinsip Kerja PLTS

Cahaya matahari dapat diubah menjadi energi listrik melalui penggunaan modul surya yang terbuat dari bahan semikonduktor. Bahan semikonduktor adalah bahan dengan sifat antara logam dan non-logam, yang terdiri dari partikel seperti elektron dan proton. Ketika bahan semikonduktor menerima energi dari luar, elektron akan terlepas, menciptakan arus listrik, serta membentuk pasangan elektron hole.

Modul surya memiliki kemampuan untuk menyerap cahaya matahari yang mengandung energi foton atau gelombang elektromagnetik. Energi foton ini menghasilkan energi kinetik yang dapat melepaskan elektron ke pita konduksi, sehingga menghasilkan arus listrik[8]. Semakin tinggi intensitas cahaya matahari, semakin besar pula energi kinetik yang dihasilkan. Pada siang hari, bumi menyerap intensitas cahaya matahari tertinggi, menghasilkan sekitar 120.000 terra Watt energi surya yang diserap.

C. Photovoltaic CPV Cell

Photovoltaic (PV) merupakan suatu perangkat yang dapat mengubah langsung cahaya matahari menjadi energi listrik. Istilah "photovoltaic" sering disingkat menjadi PV. Bahan semikonduktor seperti *silicon*, *gallium arsenide*, *cadmium telluride*, atau *copper indium deselenide* umumnya digunakan sebagai bahan dasarnya. Solar cell kristalin sering digunakan secara luas dalam pembuatan sel surya[9].

Jenis kristal solar cell (PV cell) yang banyak dipasarkan adalah tipe:

- a. *Monocrystalline solar panels*: menggunakan silicon murni yang dihasilkan dengan proses crystal-growth yang cukup rumit dengan ketebalan sekitar 0.2 – 0.4 mm. Efisiensinya cukup tinggi berkisar 13 – 19 %.

- b. *Polycrystalline solar panels*: kadangkadang disebut dengan multi-crystalline, panel surya dibuat dari Polycrystalline cells yang lebih murah dan efisiensinya masih dibawah mono-crystalline, berkisar 11 – 15 %.
- c. *Amorphous solar panels*: jenis ini tidak merupakan kristal yang real, tetapi berupa lapisan tipis silikon yang dideposit diatas base material seperti metal atau gelas yang bentuk permukaannya bebas. Efisiensinya lebih kecil, yaitu sekitar 5 – 8 %.

Untuk penentuan besar kapasitas terpasang yang dibangkitkan oleh photovoltaic array maka digunakan persamaan-persamaan berikut ini:

- a. Luas area photovoltaic array

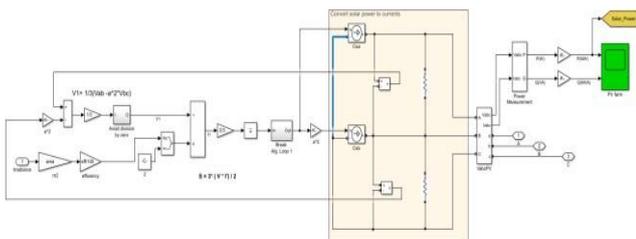
$$\text{Area array} = \frac{EL}{G_{av} \cdot \eta_{PV} \cdot TCF \cdot \eta_{output}} \quad (1)$$
- b. Daya yang di bangkitkan photovoltaic array

$$P \text{ Watt peak} = \frac{\text{Area array}}{PSI \cdot \eta_{PV}} \quad (2)$$
- c. Jumlah modul surya yang dibutuhkan

$$\text{Jumlah modul surya} = \frac{P_{Watt \text{ peak}}}{PMPP} \quad (3)$$

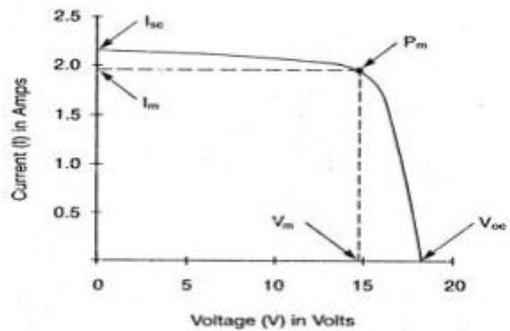
Dimana:

- EL = pemakaian energi (kWh/hari)
- G_{av} = insolasi harian rata-rata matahari (kWh/m² /hari)
- η_{PV} = efisiensi modul surya (%)
- P_{Watt Peak} = daya yang dibangkitkan (Wp)
- PMPP = daya maksimum modul surya (W)



Gambar. 2 model Simulink PV

Grafik I-V Curve di bawah ini menggambarkan kondisi operasional normal sebuah Sel Surya. Sel Surya akan menghasilkan energi maksimum ketika nilai V_m (tegangan maksimum) dan I_m (arus maksimum) juga mencapai nilai maksimum. Di sisi lain, I_{sc} (arus pendek maksimum) adalah arus listrik maksimum pada tegangan nol. I_{sc} berkorelasi langsung dengan intensitas sinar matahari yang tersedia. V_{oc} (tegangan terbuka maksimum) adalah tegangan maksimum pada arus nol; V_{oc} meningkat secara logaritmik seiring peningkatan intensitas sinar matahari, fitur ini memungkinkan Sel Surya untuk mengisi akumulator (accu).



Gambar. 3 Grafik I-V curve

D. Komponen PLTS

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah sistem yang mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik menggunakan prinsip efek fotovoltaik. Efek fotovoltaik adalah fenomena fisika yang terjadi saat sel surya (solar cell) menerima cahaya matahari. Cahaya tersebut kemudian diubah menjadi energi listrik. Proses ini terjadi karena energi foton dalam cahaya matahari melepaskan elektron-elektron, yang kemudian mengalir melalui sambungan semikonduktor tipe n dan p, menghasilkan arus listrik[7].

Potensi energi surya yang dapat dihasilkan di seluruh daratan Indonesia, yang memiliki luas 2 juta km², adalah sekitar 4,8 kWh/m²/hari atau setara dengan 112.000 GWp yang dapat didistribusikan. Namun, saat ini Indonesia hanya memanfaatkan sekitar 10 MWp dari potensi tersebut. Oleh karena itu, masih diperlukan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di seluruh wilayah Indonesia guna meningkatkan produksi listrik dari sumber energi surya.



Gambar. 4 Panel Surya

E. PLTS Off-Grid

Sistem PLTS off-grid (Photovoltaic Solar Power System Off-Grid) adalah sistem pembangkit listrik tenaga surya yang mandiri dan tidak terhubung dengan jaringan listrik utama (grid). Sistem ini biasanya digunakan di daerah terpencil atau di lokasi yang tidak memiliki akses ke jaringan listrik yang ada.

Prinsip kerja sistem PLTS off-grid adalah sebagai berikut:

1. Panel Surya: Panel surya atau sel surya mengubah energi matahari menjadi energi listrik searah (DC). Panel surya terdiri dari beberapa modul atau panel fotovoltaik yang terhubung dalam rangkaian paralel atau seri, tergantung pada kebutuhan sistem.
2. Solar Charge Controller: Solar charge controller berfungsi mengatur aliran arus listrik dari panel surya ke baterai. Solar charge controller memastikan bahwa baterai tidak mengalami overcharging atau kelebihan pengisian, serta melindungi baterai dari kondisi yang tidak diinginkan seperti deep discharge (terlalu terdeplesi) atau tegangan yang tidak stabil.
3. Baterai: Baterai digunakan untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya. Baterai ini akan memberikan pasokan listrik saat matahari tidak tersedia, seperti pada malam hari atau saat cuaca buruk. Baterai yang umum digunakan adalah baterai siklus dalam (deep cycle) yang dapat bertahan lama dan tahan terhadap pengisian dan pengosongan berulang.
4. Inverter: Inverter berfungsi mengubah arus listrik searah (DC) dari baterai menjadi arus listrik bolak-balik (AC) yang digunakan untuk mengoperasikan peralatan listrik rumah tangga atau beban lainnya. Inverter memungkinkan penggunaan peralatan listrik AC seperti lampu, kulkas, televisi, dan lainnya.

Sistem PLTS off-grid memberikan keleluasaan dalam menyediakan listrik di tempat-tempat terpencil atau tanpa akses ke jaringan listrik utama. Namun, perlu diperhatikan bahwa kapasitas sistem harus dirancang dengan baik agar dapat memenuhi kebutuhan daya yang diinginkan, dan pemeliharaan teratur pada baterai dan sistem lainnya juga perlu dilakukan untuk menjaga kinerja yang optimal.

Baterai atau aki digunakan sebagai penyimpan energi listrik ketika tidak ada sinar matahari. Secara umum, baterai dapat dibedakan berdasarkan aplikasi dan konstruksinya. Berdasarkan aplikasinya, baterai dapat dibedakan menjadi baterai untuk kendaraan bermotor, kapal, dan siklus dalam (deep cycle). Sedangkan berdasarkan konstruksinya, baterai dapat dibedakan menjadi baterai basah, gel, dan AGM (Absorbed Glass Mat). Baterai AGM juga sering dikenal sebagai VRLA (Valve Regulated Lead Acid).

Untuk sistem panel surya, baterai yang cocok digunakan adalah baterai deep cycle lead acid, yang memiliki kemampuan menampung kapasitas sebesar 100 Ah dengan tegangan 12 V, dan memiliki efisiensi sekitar 80%. Waktu pengisian baterai atau aki biasanya membutuhkan waktu antara 12 jam hingga 16 jam.

Solar Charge Controller adalah perangkat elektronik yang berfungsi untuk mengatur arus searah yang mengisi baterai dan diambil dari baterai untuk beban. Fungsi utama dari solar charge controller adalah mengontrol pengisian berlebih (overcharging) dan tegangan berlebih dari panel surya atau sel surya. Kelebihan tegangan dan pengisian dapat mengurangi umur baterai. Panel surya biasanya menghasilkan tegangan output antara 16 hingga 21 Volt, sedangkan baterai umumnya diisi pada tegangan 14 hingga 14.7 Volt. Tanpa solar charge controller, baterai dapat rusak karena overcharging dan ketidakstabilan tegangan.

F. PLTS Rooftop

PLTS rooftop merupakan metode pembangkitan tenaga listrik yang melibatkan pemasangan modul surya secara *Roof-mounting*, yaitu modul surya dipasang di atap, dinding, atau bagian lain dari bangunan yang dimiliki oleh pelanggan PLN. Metode ini umumnya digunakan pada atap rumah, bangunan komersial, atau kompleks industri yang terhubung ke jaringan listrik utama dan diatur melalui *Feed-in-Tarif (Fit)*[10]. PLTS rooftop merupakan metode yang banyak digunakan saat ini untuk konsumsi listrik rumahan, pemasangan PLTS ini sangat marak dan cepat dalam pemasangannya. Berikut gambar skema PLTS atap.



Gambar. 5 skema PLTS atap

Sistem PLTS Rooftop memiliki skema yang dimulai dengan modul surya yang mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik[11]. Modul surya ini menghasilkan arus searah (DC) yang kemudian diubah menjadi arus bolak-balik (AC) menggunakan inverter. Selanjutnya, energi listrik yang dihasilkan terhubung ke jaringan listrik rumah melalui panel hubung bagi (PHB) dan dialirkan ke beban elektronik dalam rumah.

Untuk pengukuran energi, digunakan kWh meter ekspor impor (exim) yang menggunakan sistem net metering. Dalam sistem ini, pengukuran energi dilakukan dengan menggunakan pengukuran dari sistem grid. Meteran exim akan membaca jumlah energi yang diekspor dari pelanggan PLTS ke jaringan PLN, serta jumlah energi yang diimpor dari jaringan PLN ke pelanggan PLTS. Pemasangan PLTS rooftop ini biasanya diintegrasikan dengan pembangkit listrik lainnya seperti angin, air, generator diesel dan lainnya sebagainya.

G. Solar Charge Control

Solar Charge Controller adalah perangkat elektronik yang berfungsi untuk mengatur arus searah yang mengisi baterai dan diambil dari baterai untuk beban. Fungsi utama dari solar charge controller adalah mengontrol pengisian berlebih (overcharging) dan tegangan berlebih dari panel surya atau sel surya. Kelebihan tegangan dan pengisian dapat mengurangi umur baterai. Panel surya biasanya menghasilkan tegangan output antara 16 hingga 21 Volt, sedangkan baterai umumnya diisi pada tegangan 14 hingga 14.7 Volt. Tanpa solar charge controller, baterai dapat rusak karena overcharging dan ketidakstabilan tegangan.

Solar charge controller biasanya terdiri dari satu input (2 terminal) yang terhubung dengan output panel surya, satu output (2 terminal) yang terhubung dengan baterai, dan satu output (2 terminal) yang terhubung dengan beban (load). Arus listrik DC dari baterai tidak dapat masuk ke panel surya karena adanya perlindungan diode yang hanya memperbolehkan aliran arus listrik DC dari panel surya ke baterai, bukan sebaliknya.

Solar charge controller (pengendali pengisian surya) dalam sistem PLTS Hybrid adalah perangkat elektronik yang mengatur aliran energi surya dari panel surya ke baterai penyimpanan energi. Fungsi utamanya adalah mengoptimalkan pengisian baterai dengan memantau dan mengatur arus dan tegangan yang masuk ke baterai.

Berikut adalah penjelasan lebih lanjut tentang solar charge controller pada PLTS Hybrid:

1. Pengaturan Pengisian Baterai: Solar charge controller mengontrol pengisian baterai dengan memantau tegangan dan arus dari panel surya. Ketika energi surya tersedia, charge controller akan mengoptimalkan pengisian baterai dengan mengatur arus pengisian sehingga baterai diisi sesuai dengan peraturan dan batasan yang ditentukan. Ini membantu mencegah overcharging dan memastikan baterai diisi dengan efisien.
2. Proteksi Baterai: Solar charge controller dilengkapi dengan fitur proteksi baterai yang penting. Ini meliputi proteksi terhadap overcharging, yang dapat merusak baterai dengan mengakibatkan overheating dan degradasi kapasitas. Charge controller juga melindungi baterai dari undercharging, yang dapat menyebabkan baterai tidak optimal dan mempengaruhi umur pakai. Dengan melakukan pengaturan yang tepat, charge controller memastikan baterai beroperasi dalam kondisi yang aman dan optimal.
3. Pemantauan dan Pengaturan: Solar charge controller biasanya dilengkapi dengan layar atau indikator LED yang memungkinkan pengguna untuk memantau kondisi baterai, arus pengisian, tegangan, dan status sistem secara umum. Pengguna juga dapat mengatur parameter pengisian dan memantau kinerja sistem melalui

menu pengaturan yang disediakan oleh charge controller.

4. Pengaturan Beban: Beban listrik yang terhubung ke sistem PLTS Hybrid juga dapat dikendalikan oleh solar charge controller. Charge controller memastikan distribusi daya yang tepat ke beban listrik dan mencegah overloading pada baterai. Pengaturan ini memungkinkan pengguna untuk menggunakan energi yang disimpan dalam baterai dengan efisien dan mengoptimalkan penggunaan energi.

Komunikasi dan Pemantauan Jarak Jauh: Beberapa solar charge controller memiliki kemampuan komunikasi dan pemantauan jarak jauh. Ini memungkinkan pengguna untuk terhubung dengan charge controller melalui komputer, smartphone, atau sistem pemantauan khusus. Dengan demikian, pengguna dapat memantau kinerja dan status sistem secara real-time dan mengatur pengaturan pengisian baterai dari jarak jauh.

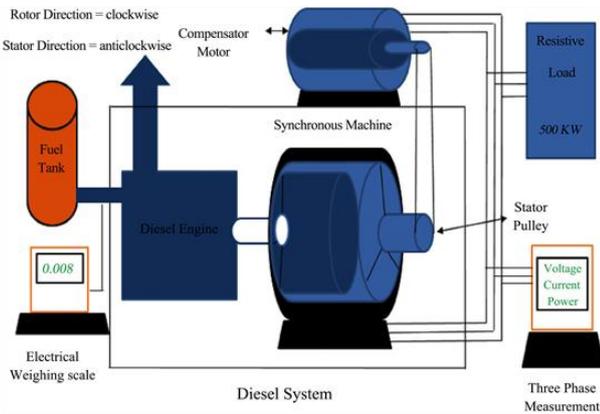
H. Komponen Generator Diesel

Generator adalah perangkat yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, dan umumnya digunakan sebagai pembangkit tenaga listrik. Diesel generator terdiri dari mesin diesel dan generator listrik (alternator) yang berfungsi untuk menghasilkan energi listrik[14]. Energi mekanik yang diperoleh oleh generator dapat berasal dari motor bakar diesel. Prinsip kerja generator melibatkan penggunaan rotor untuk memotong medan magnet yang dihasilkan oleh bahan feromagnetik yang dialiri listrik. Untuk menghasilkan medan magnet, arus eksitasi atau arus pembangkit diperlukan. Ketika rotor berputar, lilitan kawatnya akan memotong gaya magnet pada kutub-kutub magnet, yang menghasilkan perbedaan tegangan dan menghasilkan arus listrik.

Penggunaan diesel generator umumnya untuk memenuhi kebutuhan listrik dengan beban yang relatif kecil atau sebagai sumber cadangan ketika pembangkit listrik utama tidak dapat menyediakan pasokan daya ke beban. Selain itu, diesel generator juga berfungsi sebagai cadangan untuk menyediakan daya saat beban mencapai puncak penggunaan listrik oleh konsumen[14].

Diesel generator juga menjadi solusi dalam menyediakan pasokan daya listrik di daerah terpencil dan terisolir yang tidak terjangkau oleh jaringan listrik. Diesel Generator terdiri dari beberapa komponen, antara lain sistem pelumasan, sistem bahan bakar, sistem pendinginan, dan generator sinkron. Sistem pelumasan berperan dalam mengurangi getaran dan gesekan antara komponen yang bergerak, serta membantu dalam mengeluarkan panas dengan memberikan minyak pelumas pada semua bearing dan dinding dalam silinder-silinder mesin. Sistem bahan bakar bertugas untuk memberikan daya pada mesin agar dapat berputar. Sistem pendinginan berfungsi dalam mengeluarkan panas untuk mencegah kerusakan atau gangguan pada diesel generator. Generator sinkron berperan dalam mengubah energi mekanik menjadi energi listrik arus bolak-balik (Alternating Current)[15].

Synchronize Generator juga dikenal sebagai generator paralel, merupakan metode untuk mengoperasikan generator secara bersamaan dengan menghubungkan dua atau lebih generator untuk mencapai kapasitas daya yang lebih besar. Jika sebuah generator terbebani melebihi kapasitasnya, dapat menyebabkan generator tersebut mati atau bahkan mengalami kerusakan. Namun, hal ini dapat diatasi dengan mengoperasikan generator secara paralel dengan generator lain.



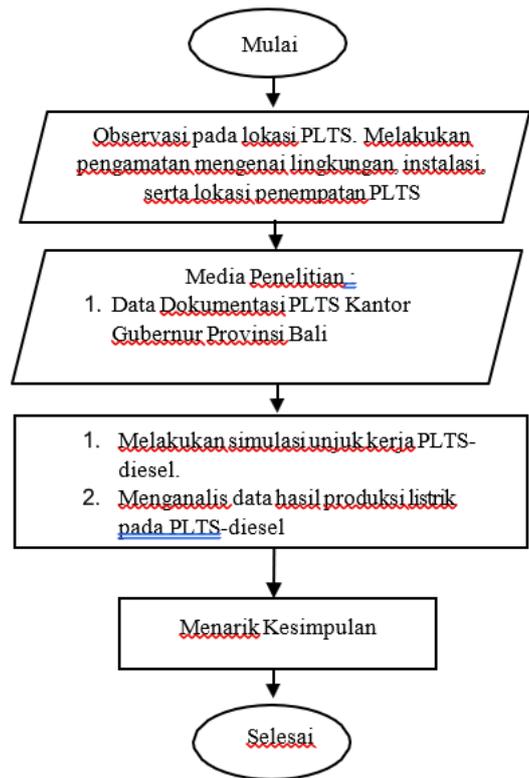
Gambar. 6 komponen generator diesel

Proses sinkronisasi generator memiliki beberapa persyaratan yang harus dipenuhi. Pertama, generator harus memiliki amplitudo tegangan yang sama. Kedua, generator harus memiliki frekuensi yang sama. Ketiga, generator harus memiliki urutan fasa yang sama. Terakhir, generator harus memiliki sudut fasa yang sama besar. Dengan memenuhi persyaratan tersebut, generator dapat disinkronkan secara efektif.

III. METEDOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk memantau parameter listrik dengan pendekatan penelitian survei dimana tidak ada dilakukan perubahan terhadap variabel ataupun komponen yang diteliti. Setelah data didapatkan maka akan dilakukan proses pengolahan data dan mengambil kesimpulan dari hasil pengolahan data untuk dapat diambil beberapa solusi secara umum untuk perbaikan variabel dan komponen PLTS. Tahap awal penelitian ini adalah melakukan observasi untuk mengetahui lokasi, konfigurasi dan spesifikasi sistem PLTS pada Kantor Gubernur Bali. Selanjutnya melakukan simulasi dengan software *Matlab*. Tahap selanjutnya mengumpulkan data dokumentasi pada PLTS Kantor Gubernur Bali.

Melakukan simulasi unjuk kerja PLTS menggunakan software dan menganalisis data hasil produksi pada simulasi yang telah dilakukan. Terakhir setelah dilakukan analisis, didapatkan kesimpulan mengenai estimasi hasil produksi energi pada PLTS Kantor Gubernur Bali.



Gambar. 7 Flow Chart

Dari skema desain alur di atas, penelitian dimulai dengan pengumpulan data melalui pengukuran langsung dan juga studi literatur. Selanjutnya penelitian dilanjutkan dengan membuat pemodelan sistem pembangkit hybrid diesel generator-PV sesuai dengan kebutuhan daya listrik beban di gedung kantor gubernur Bali. Pemodelan dilakukan menggunakan alat bantu berupa perangkat lunak MATLAB. Setelah dilakukan simulasi dengan perangkat lunak MATLAB, kemudian dilakukan analisa dari hasil penelitian untuk akhirnya mendapatkan kesimpulan dari penelitian ini. Data yang diperoleh dari pengambilan data di Gedung kantor gubernur Bali akan diolah dengan melakukan simulasi dan perhitungan untuk memperoleh nilai efisiensi sistem tersebut. Data yang didapat dihitung dengan rumus sesuai materi pada kajian pustaka adalah sebagai berikut:

A. Daya

Daya dalam watt yang diserap oleh suatu beban pada setiap saat sama dengan jatuh tegangan pada beban tersebut dalam volt dikalikan dengan arus yang mengalir ke beban. Perhitungan daya yang mengalir ke beban dapat dilihat pada persamaan (1):

$$P = V \times I \times \cos \theta \quad (1)$$

P merupakan kuantitas daya, P atau daya rata-rata dikenal juga sebagai daya aktif (real power). Daya memiliki satuan dasar yaitu watt. Namun karena watt adalah satuan yang terlalu kecil pada kuantitas sistem tenaga, maka P biasanya diukur dalam kilowatt atau megawatt.

B. Kalkulasi Panel Surya yang Dibutuhkan

Rancangan instalasi akan mengacu pada beban yang disuplai. Pada sistem pembangkit hybrid ini panel surya dirancang untuk memenuhi kebutuhan beban listrik. Persamaan (2) merupakan perhitungan beban listrik dan panel surya yang dibutuhkan.

$$PPV \text{ Array} = P_{\text{beban}} \times 100\% \times 1,3 \quad (2)$$

Dimana:

- PPV Array = Total daya yang dibangkitkan panel surya
- Pbeban = Total daya yang dibutuhkan beban 100%
- = persen untuk dicatu panel surya 1,3
- = 1 – faktor daya

Jadi jumlah modul surya yang digunakan disesuaikan dengan daya yang dibutuhkan oleh beban, kemudian dihitung dari daya yang akan dibangkitkan. Setelah data terkumpul dan dilakukan perhitungan, kemudian dirancang suatu sistem pembangkit hybrid yang sesuai dengan kebutuhan daya terpakai. Perancangan dilakukan dengan cara simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB. Simulasi diawali dengan memilih komponen-komponen yang diperlukan untuk sebuah sistem pembangkit hybrid diesel generator-PV interaktif grid. Kemudian komponen-komponen ini disusun agar dapat menjadi sebuah rangkaian yang dapat menampilkan aliran daya sistem tersebut. Setelah itu data yang telah terkumpul di input melalui perangkat lunak MATLAB untuk melakukan simulasi yang kemudian akan dihasilkan aliran daya terpakai untuk sistem pembangkit secara hybrid sesuai dengan kebutuhan daya terpakai. Perancangan dilakukan dengan cara simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB. Simulasi diawali dengan memilih komponen-komponen yang diperlukan untuk sebuah sistem pembangkit hybrid diesel generator-PV interaktif grid. Kemudian komponen-komponen ini disusun agar dapat menjadi sebuah rangkaian yang dapat menampilkan aliran daya sistem tersebut. Setelah itu data yang telah terkumpul di input melalui perangkat lunak MATLAB untuk melakukan simulasi yang kemudian akan dihasilkan aliran daya terpakai untuk sistem pembangkit secara hybrid.

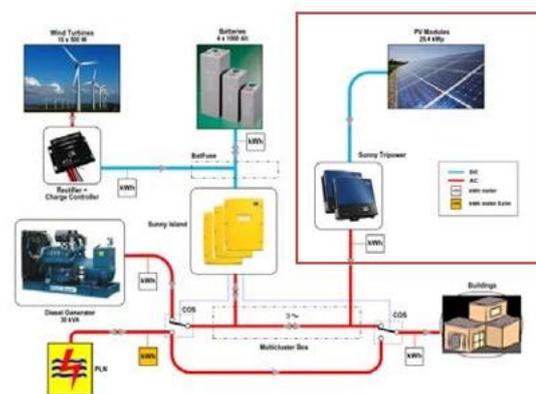
IV. SIMULASI DAN ANALISA

Pembangkit Listrik Tenaga Surya dibangun di atas Lapangan Tennis dengan luas lahan kurang lebih 421,25 m². Secara geografis PLTS terletak pada koordinat - 8,79° lintang selatan, 115,17° bujur timur dengan ketinggian ± 61 meter di atas permukaan laut. Tampak atas dari lokasi PLTS menggunakan Google Earth dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar. 8 Tampak Atas Lokasi PLTS

PLTS dengan daya nominal 26,4 kWp terhubung dengan jaringan PLN 220/380 V yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik di Kantor Gubernur Bali. *Single line diagram* PLTS dengan sistem *Smart Microgrid* dapat dilihat pada gambar 3.



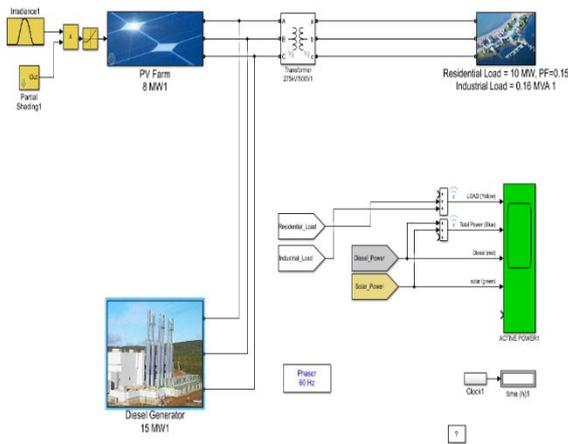
Gambar. 9 Single line diagram PLTS

Sistem *Smart Microgrid* memiliki sistem monitoring yang berfungsi untuk mencatat data dan operasi dari keseluruhan sistem, termasuk operasi PLTS sehingga dapat dipantau secara *realtime*.

1. Konfigurasi jaringan Mircogrid

Pengujian sistem PV hybrid melibatkan evaluasi kinerja dan fungsionalitas sistem konversi energi matahari yang menggunakan kombinasi panel surya (PV) dengan komponen penyimpanan energi tambahan, seperti baterai atau superkapasitor. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menguji sistem PV hybrid dalam kondisi nyata dan memastikan bahwa sistem tersebut dapat beroperasi secara efisien dan andal.

Dalam pengujian ini dilakukan dengan menggunakan simulink yang ada pada MATLAB. Rangkaian yang dimodelkan pada MATLAB sesuai dengan yang ada di lapangan.



Gambar. 10 PV Array PLTS dan generator diesel

PLTS *Microgrid* menggunakan inverter *Sunny Tripower 1500 TL* sebanyak 2 unit untuk mengubah daya listrik searah (DC) dari solar panel menjadi daya listrik AC 3 fasa 4 kawat dengan kapasitas masing-masing 15 kW. Inverter *Sunny Tripower* ditunjukkan pada gambar 8



Gambar. 11 Inverter

Inverter adalah suatu perangkat elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) dengan menggunakan metode *switching* pada frekuensi tertentu. Proses *switching* sendiri melibatkan perpindahan antara kondisi *ON* dan *OFF*[8]. Terdapat beberapa jenis inverter yang dapat dibedakan berdasarkan fasa outputnya, yaitu:

1. Inverter 1 fasa: Inverter yang menghasilkan output 1 fasa.
2. Inverter 3 fasa: Inverter yang menghasilkan output 3 fasa.

Selain itu, terdapat juga jenis-jenis inverter berdasarkan pengaturan tegangannya, yaitu:

1. Voltage Fed Inverter (VFI): Inverter yang tegangan inputnya diatur konstan.
2. Current Fed Inverter (CFI): Inverter yang arus inputnya diatur konstan.
3. Variable DC linked inverter: Inverter yang tegangan inputnya dapat diatur.

Baterai atau aki digunakan sebagai penyimpan energi listrik ketika tidak ada sinar matahari. Secara umum, baterai dapat dibedakan berdasarkan aplikasi dan konstruksinya. Berdasarkan aplikasinya, baterai dapat dibedakan menjadi baterai untuk kendaraan bermotor, kapal, dan siklus dalam (*deep cycle*). Sedangkan berdasarkan konstruksinya, baterai dapat dibedakan menjadi baterai basah, gel, dan AGM (*Absorbed Glass Mat*). Baterai AGM juga sering dikenal sebagai VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*).

Untuk sistem panel surya, baterai yang cocok digunakan adalah baterai *deep cycle lead acid*, yang memiliki kemampuan menampung kapasitas sebesar 100 Ah dengan tegangan 12 V, dan memiliki efisiensi sekitar 80%. Waktu pengisian baterai atau aki biasanya membutuhkan waktu antara 12 jam hingga 16 jam.

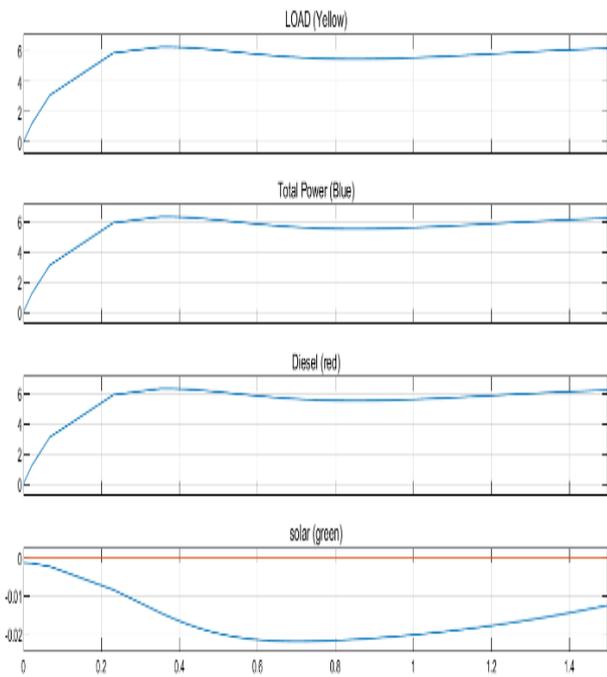
2. Hasil Simulasi

Tabel. 1 Simulasi Produksi Energi PLTS

Bulan	GlobHor (kWh/m ²)	Temp °C	Energy (kWh)
Jan	138	28	2.746
Feb	140	28	2.875
Mar	160	28	3.430
Apr	167	28	3.775
Mei	172	28	4.142
Jun	157	27	3.900
Jul	170	26	4.206
Ags	173	26	4.093
Sep	175	26	3.831
Okt	190	28	3.908
Nov	158	28	3.133
Des	154	28	3.018
TOTAL SATU TAHUN			43.055

Berdasarkan tabel 1 potensi energi PLTS sebesar 43.055 kWh per tahun, dengan iradiasi matahari tertinggi pada bulan Oktober sebesar 190 kWh/m² dan iradiasi matahari terendah pada bulan Januari sebesar 138 kWh/m². Suhu lingkungan selama satu tahun berkisar 26°C sampai dengan 28°C.

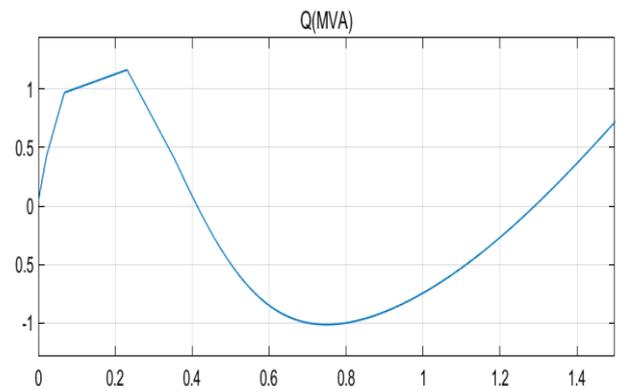
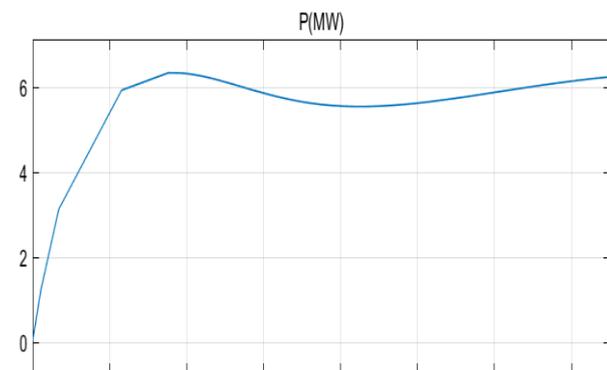
Berdasarkan hasil simulasi kedua pembangkit yakni PLTS dan generator diesel pada matlab grafik yang yang dihasilkan pada beban dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar. 12 Grafik simulasi MATLAB

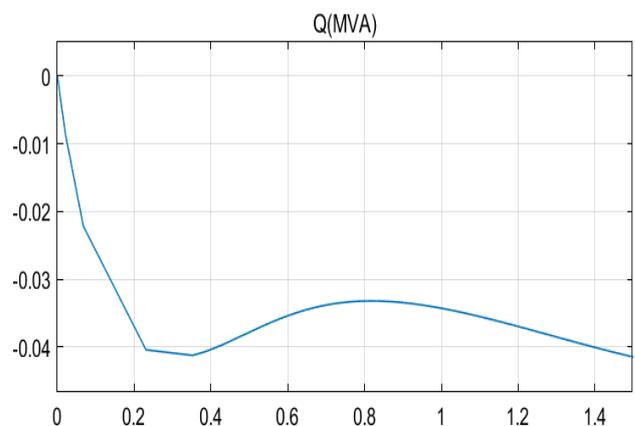
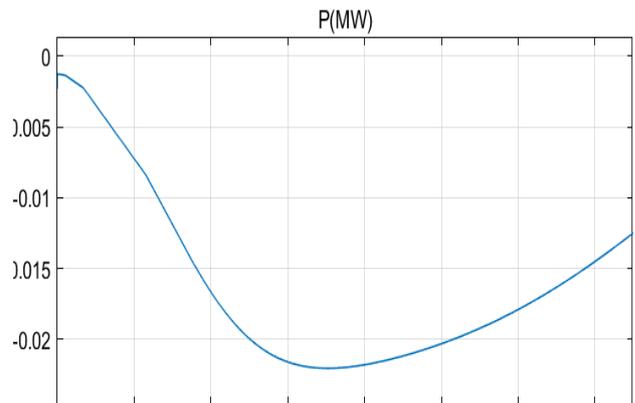
Berdasarkan grafik diatas dapat dilihat bahwa daya yang dihasilkan ke beban sama dengan total daya yang dihasilkan oleh generator diesel dan PLTS. Daya yang dihasilkan oleh generator diesel lebih tinggi dari PLTS hal ini diakibatkan oleh irradiansi yang terjadi pada panel surya. Kedua dari grafik diatas merupakan hasil simulasi dari MATLAB. Daya yang di terima oleh beban akan mencapai kestabilan pad detik 1.4, hal ini dipengaruhi oleh adanya irradiansi dan starting motor yang terjadi pada pv dan generator diesel.

Perbandingan grafik diatas berdasarkan tegangan terhadap waktu. Pada generator diesel semakin lama tegangan akan semakin naik hal ini dikarenakan starting dari generator untuk sampai pada kondisi stabil:



Gambar. 13 Grafik daya aktif dan daya reaktif generator diesel

Perbandingan grafik diatas berdasarkan tegangan terhadap waktu. Pada generator diesel semakin lama tegangan akan semakin naik hal ini dikarenakan starting dari generator untuk sampai pada kondisi stabil. grafik diatas merupakan grafik daya aktif dan reaktif yang dihasilkan oleh generator tersebut. Kedua daya yang dihasilkan oleh generator tersebut. Daya yang dihasilkan sesuai dengan kapasitas dari generator dan $\cos \phi$ pada generator. Daya yang dihasilkan berbanding lurus dari putaran rotor, Dimana tegangan akan stabil atau konstan Ketika rotor mencapai puncak stabilnya.

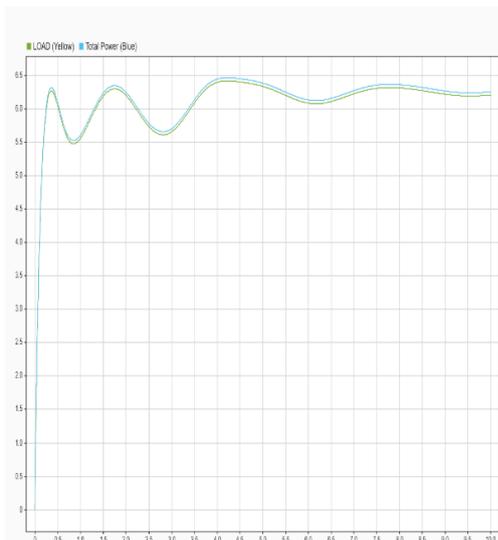


Gambar. 14 grafik daya aktif dan daya reaktif PV

Pengujian keluaran PV dipengaruhi oleh iradiasi yang terjadi pada cahaya matahari. Nilai daya yang dihasilkan oleh panel surya (PV) akan meningkat seiring dengan peningkatan nilai iradiasi matahari. Sebaliknya, jika nilai iradiasi matahari menurun, maka nilai daya yang dihasilkan oleh PV akan menurun pula. Hubungan antara daya dan iradiasi matahari menyebabkan terjadinya fluktuasi dalam daya yang dihasilkan oleh PV.

Grafik diatas merupakan grafik daya aktif dan daya reaktif yang dihasilkan oleh PV. Grafik tersebut dipengaruhi oleh adanya iradiasi pada panel PV. Namun hal ini dapat diatas oleh MPPT sebagai pengatur tegangan maupun arus yang di keluarkan oleh PV akan distabilkan oleh MPPT tersebut sehingga daya yang dikeluarkan akan maksimal.

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan pada aplikasi MATLAB, pengujian beban menggunakan pembangkit listrik tenaga surya tanpa melakukan penggabungan kedua pembangkit dapat dilihat dari hasil simulasi pada gambar 12 dibawah ini :



Gambar. 15 Grafik beban dan daya PLTS

Berdasarkan grafik diatas grafik yang dihasilkan pada saat simulasi ketika menggunakan PLTS saja menampilkan grafik beban yang fluktuatif, hal ini diakibatkan oleh adanya variasi pada iradiasi sinar matahari pada saat pengoperasian PLTS.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan didapat beberapa simpulan sebagai berikut:

1. Desain pemanfaatan sistem pembangkit hybrid diesel generator-PV interaktif grid menggunakan 110 modul panel surya Monocrystalin 240 Wp, 2 buah inverter, charger 12 kVA, yang disambung dengan diesel generator.

2. Setiap modul panel surya menghasilkan daya maksimal (Pmax) sebesar 290,7 W. Setelah modul panel surya sebanyak 110 unit disusun secara paralel daya yang dapat dihasilkan dari PV Array sebesar 26,4 kW.
3. Simulasi pemanfaatan sistem pembangkit hybrid diesel generator-PV interaktif grid dapat mengurangi daya terpakai dari grid PLN sebesar 54%.
4. Potensi produksi energi Listrik PLTS Smart Microgrid hasil simulasi selama satu tahun adalah 43.055 kWh.
5. Produksi energi riil dari PLTS selama tahun 2018 adalah 38,948 kWh lebih rendah 4,107,12 kWh atau 9,53% dari hasil simulasi
6. Perbedaan produksi energi listrik tersebut disebabkan oleh shading dari pepohonan disekitar modul surya, Tingkat kebersihan modul surya, perbedaan modelling modul surya serta perbedaan orientasi dari PLTS yang terpasang.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dixon, "Ruen," *Notes Queries*, vol. s7-XI, no. 287, p. 508, 1891, doi: 10.1093/nq/s7-XI.287.508-b.
- [2] P. Hetherington, "Rooftop," *West. Hum. Rev.*, vol. 69, no. 2, pp. 178–183, 2015, doi: 10.2307/j.ctt1ffjjtw.21.
- [3] M. R. Wicaksana, I. N. S. Kumara, and I. A. . Giriantari, "Unjuk Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya Rooftop 158 Kwp Pada Kantor Gubernur Bali," *J. SPEKTRUM*, vol. 6, no. 3, p. 107, 2019, doi: 10.24843/spektrum.2019.v06.i03.p15.
- [4] R. Syahputra, "Tenaga Listrik," *Transm. Dan Distrib. Tenaga List.*, no. LP3M UMY, Yogyakarta, pp. 249–256, 2016.
- [5] J. S. Setyono, F. H. Mardiansjah, and M. F. K. Astuti, "Potensi Pengembangan Energi Baru Dan Energi Terbarukan Di Kota Semarang," *J. Riptek*, vol. 13, no. 2, pp. 177–186, 2019, [Online]. Available: <http://ripteck.semarangkota.go.id>
- [6] A. J. Adellea, "Implementation of New Energy and Renewable Energy Policy in the Context of National Energy Security," *Indones. State Law Rev.*, vol. 4, no. 2, pp. 43–51, 2022, doi: 10.15294/islrev.v4i2.61093.
- [7] T. R. Tangga, "Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Sebagai Solusi Energi Terbarukan Rumah Tangga," vol. 06, no. 02, pp. 136–142, 2022.
- [8] S. S. Mohammad Hafidz ;, "Perancangan Dan Analisis Pembangkit Listrik Tenaga Surya Kapasitas

- 10 Mw on Grid Di Yogyakarta,” *Jur. Tek. Elektro, Sekol. Tinggi Tek. PLN*, vol. 7, no. JURNAL ENERGI & KELISTRIKAN VOL. 7 NO. 1, JANUARI-MEI 2015, p. 49, 2015.
- [9] W. S. Steven J. Strong, *The Solar Electric House: A Design Manual for Home-scale Photovoltaic Power systems*, 0 ed. Rodale Press, 1987.
- [10] A. Rachmi, B. Prakoso, Hanny Berchmans, I. Devi Sara, and Winne, “Panduan Perencanaan dan Pemanfaatan PLTS atap di Indonesia,” *PLTS Atap*, p. 94, 2020.
- [11] I. K. Juniarta, I. N. Setiawan, and I. A. Dwi Giriantari, “Analisis Sistem Kelistrikan Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya on-Grid Kapasitas 25 Kwp Di Badan Perencanaan Pembangunan Daerah (Bappeda) Provinsi Bali,” *J. SPEKTRUM*, vol. 9, no. 1, p. 111, 2022, doi: 10.24843/spektrum.2022.v09.i01.p13.
- [12] D. Dzulfikar and W. Broto, “OPTIMALISASI PEMANFAATAN ENERGI LISTRIK TENAGA SURYA Abstrak,” vol. V, pp. 73–76, 2016.
- [13] Z. Tharo and M. Andriana, “PEMBANGKIT LISTRIK HYBRID TENAGA SURYA DAN ANGIN ENERGI FOSIL DI SUMATERA,” pp. 141–144.
- [14] M. Homer, S. Kasus, D. Sirilogui, K. K. Mentawai, D. P. Sari, and R. Nazir, “OPTIMALISASI DESAIN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA HYBRID DIESEL GENERATOR- PHOTOVOLTAIC ARRAY,” no. 1, pp. 1–12, 2015.
- [15] U. A. Pringsewu, “Volume 5 Issue 1 Aisyah Journal of Informatics and Electrical Engineering ANALISIS

IV. BIODATA PENULIS

Putu Billy Ezra Shaniga Punggawa, lahir di Denpasar, 6 Maret 2001. Ia menyelesaikan pendidikan SLTA di SMK Penerbangan Cakra Nusantara pada tahun 2019, dan pada tahun yang sama ia melanjutkan pendidikan tinggi di Institut Teknologi Nasional Malang dengan mengambil Program Studi Teknik Elektro S1 peminatan Teknik Energi Listrik yang berfokus pada bidang energi baru terbarukan. Penulis dapat dihubungi melalui email: bilypunggawa06@gmail.com

