

Analisa Simulasi *Photovoltaic* 250 kW Terhubung Jaringan 25 kV dengan Konverter Dua Tingkat Menggunakan MATLAB

Dias Widodo^{*1}, Harmini², Elfira Nureza Ardina³

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Semarang

Email: ^{*1}diasadidas83@gmail.com, ²harmini@usm.ac.id, ³elfira_na@usm.ac.id

(Naskah masuk: 19 Mei 2025, diterima untuk diterbitkan: 30 Desember 2025)

Abstrak: Sektor energi global mengalami perubahan signifikan dalam beberapa tahun terakhir, dengan peralihan utama dari energi tak terbarukan ke energi terbarukan. Energi Terbarukan, seperti tenaga surya, kini menjadi pilihan utama untuk mendukung kebutuhan energi berkelanjutan dan mengatasi perubahan iklim. Salah satu teknologi yang banyak digunakan dalam sistem energi terbarukan adalah sistem *Photovoltaic* (PV), yang mengubah energi matahari menjadi listrik arus searah (DC). Sistem ini membutuhkan konverter dua tingkat untuk meningkatkan efisiensi konversi dan menjaga stabilitas daya, serta untuk mengurangi harmonisa dan meningkatkan kualitas daya yang dihasilkan. Penelitian ini menganalisis sistem PV 250 kW yang terhubung dengan jaringan 25 kV, menggunakan konverter dua tingkat yang terdiri dari konverter DC-DC dan inverter DC-AC. Sistem ini dirancang untuk menjaga efisiensi konversi daya, stabilitas tegangan, dan distribusi daya yang optimal. Simulasi dilakukan dengan perangkat lunak MATLAB untuk mengevaluasi kinerja sistem secara komprehensif. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa sistem ini menghasilkan total daya 248,6 kW, yang sangat mendekati target. Pengujian sistem dilakukan dengan memvariasikan kondisi radiasi matahari, suhu panel, dan beban untuk mengevaluasi respons dan kestabilan daya yang dihasilkan.

Kata Kunci – Energi Terbarukan; *Photovoltaic*; Konverter Dua Tingkat

Simulation Analysis of 250 kW Photovoltaic Connected to 25 kV Grid with Two-Stage Converter Using MATLAB

Abstract: The global energy sector has undergone significant changes in recent years, with a major shift from non-renewable energy to renewable energy. Renewable energy, such as solar power, is now the main choice to support sustainable energy needs and address climate change. One of the technologies widely used in renewable energy systems is the *Photovoltaic* (PV) system, which converts solar energy into direct current (DC) electricity. This system requires a two-level converter to improve conversion efficiency and maintain power stability, as well as to reduce harmonics and improve the quality of the power produced. This study analyzes a 250 kW PV system connected to a 25 kV grid, using a two-level converter consisting of a DC-DC converter and a DC-AC inverter. This system is designed to maintain power conversion efficiency, voltage stability, and optimal power distribution. Simulations were performed using MATLAB software to comprehensively evaluate the system performance. The calculation results show that this system produces a total power of 248.6 kW, which is very close to the target. System testing was carried out by varying the conditions of solar radiation, panel temperature, and load to evaluate the response and stability of the power produced.

Keywords – Renewable Energy; *Photovoltaic*; Two Stage Converter

1. PENDAHULUAN

Perkembangan sektor energi di dunia telah mengalami perubahan signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Secara umum sumber energi dikategorikan menjadi dua, yaitu sumber energi tak terbarukan dan sumber energi terbarukan [1]. Energi terbarukan semakin menjadi pilihan utama dalam upaya pemenuhan kebutuhan energi yang berkelanjutan. Perubahan ini terjadi untuk memerangi perubahan iklim dan meningkatkan keamanan energi [2]. Namun, integrasi sistem energi terbarukan dan teknologi penyimpanan menjadi perhatian utama, karena dapat

meningkatkan efisiensi konversi energi dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya [3]. Salah satu teknologi energi matahari yang dapat digunakan yaitu *Photovoltaic* (PV) [4]. *Photovoltaic* (PV) adalah suatu alat yang dapat mengubah energi surya menjadi listrik arus searah [5]. Besarnya energi listrik yang dihasilkan tergantung pada jumlah foton yang diterima [6]. Daya yang dihasilkan melalui sistem *Photovoltaic* digunakan untuk mengoperasikan berbagai jenis beban [7].

Dalam implementasinya, sistem *Photovoltaic* perlu terhubung dengan jaringan listrik untuk mendistribusikan energi yang dihasilkan. Penggunaan konverter dua tingkat (*two-stage converter*) dalam sistem *Photovoltaic* memungkinkan pengaturan aliran energi yang efisien dan stabil. Selain itu, simulasi menggunakan perangkat lunak seperti MATLAB merupakan sebuah sistem komputasi numerik dan bahasa pemrograman komputer yang memungkinkan analisis dan perancangan sistem *Photovoltaic* secara lebih mendalam, sehingga dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai kinerja dan stabilitas sistem [8].

Dari penelitian sebelumnya telah membahas sistem *photovoltaic* (PV) dua tingkat yang terhubung ke jaringan, baik dari sisi efisiensi maupun pengelolaan daya reaktif. Penelitian pada penggunaan STATCOM efektif dalam menjaga stabilitas tegangan dan kompensasi daya reaktif pada sistem PV 100 kW [9]. Sementara itu, penelitian yang saya lakukan memfokuskan pada analisis efisiensi dan stabilitas sistem PV 250 kW tanpa integrasi STATCOM dengan pendekatan konversi dua tingkat yang terdiri dari konverter DC-DC dan inverter DC-AC yang memungkinkan peningkatan efisiensi konversi daya, pengurangan harmonisa, dan kestabilan output daya dalam menghadapi fluktuasi irradiance.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi model sistem *Photovoltaic* dengan kapasitas 250 kW yang terhubung ke jaringan 25 kV, menggunakan konverter dua tingkat. Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk memodelkan dan menganalisis kinerja sistem secara komprehensif. Parameter yang dianalisis mencakup efisiensi konverter, kestabilan tegangan, serta distribusi daya yang dihasilkan oleh sistem *Photovoltaic*. untuk menganalisis kinerja sistem *Photovoltaic* 250 kW yang terhubung dengan jaringan 25 kV menggunakan konverter dua tingkat.

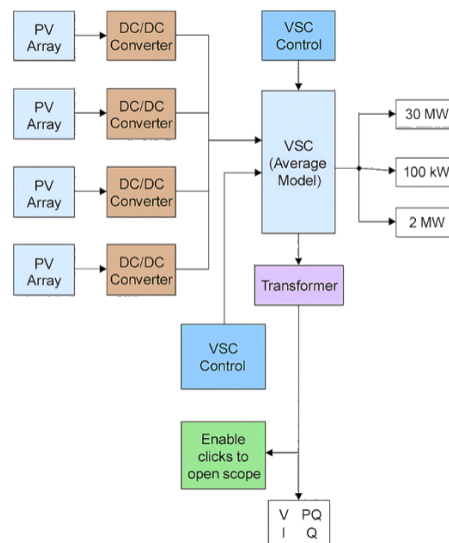
Penggunaan konverter dua tingkat pada sistem *Photovoltaic* yang terhubung ke jaringan menawarkan berbagai keuntungan yang signifikan. *DC to DC Power Converter* adalah konverter daya yang mengubah daya dengan input DC menjadi output DC [10]. Salah satu keuntungan utama adalah peningkatan efisiensi konversi energi, di mana daya DC yang dihasilkan oleh panel surya dapat diubah menjadi daya AC dengan lebih sedikit kehilangan energi selama proses konversi. Selain itu, konverter dua tingkat membantu mengurangi harmonisa dalam daya yang dihasilkan, menjaga kualitas daya yang lebih bersih dan stabil, serta meminimalkan gangguan pada perangkat yang terhubung ke jaringan. Sistem ini juga memungkinkan penyesuaian tegangan dan frekuensi yang lebih presisi, mempermudah integrasi dengan jaringan listrik yang memiliki karakteristik berbeda. Selain itu, sistem konverter dua tingkat lebih responsif terhadap fluktuasi intensitas cahaya matahari, menjaga output daya tetap stabil meskipun ada perubahan cuaca.

2. KONFIGURASI SISTEM GRID CONNECTED PV ARM

2.1 Blok Diagram Sistem

Sistem 250-kW *Grid-Connected PV Farm* yang ditampilkan dalam gambar blok terdiri dari empat unit PV Array yang masing-masing menghasilkan arus searah (DC), kemudian dihubungkan ke konverter DC/DC yang berfungsi untuk mengoptimalkan daya keluaran melalui metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) serta menstabilkan tegangan. Seluruh output DC digabungkan dan dikonversi menjadi arus bolak-balik (AC) menggunakan *Voltage Source Converter* (VSC) berbasis model rata-rata, yang pengoperasiannya dikendalikan melalui modul *VSC Control* untuk menjaga kestabilan tegangan, arus, serta faktor daya reaktif sesuai dengan kondisi jaringan. Arus AC yang dihasilkan kemudian dinaikkan tegangannya menggunakan transformator agar sesuai dengan standar tegangan jaringan listrik. Energi listrik yang dihasilkan oleh sistem ini dialirkan ke beberapa beban, antara lain beban sebesar 30 MW, 100 kW, dan 2 MW, sambil dilakukan pemantauan parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, daya aktif (P), dan daya reaktif (Q) secara

real-time. Keseluruhan sistem ini dirancang untuk memastikan integrasi energi surya yang efisien, stabil, dan handal ke dalam sistem jaringan tenaga listrik modern.

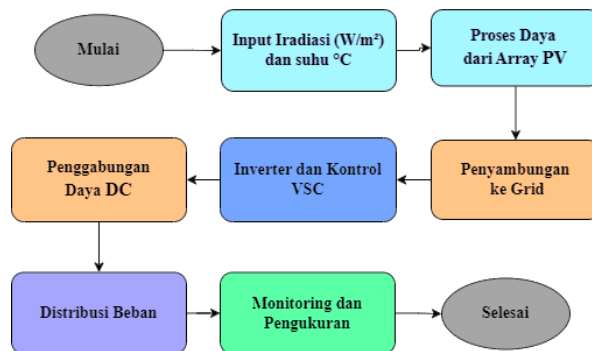


Gambar 1. Blok Diagram Sistem

2.2 Blok Diagram Alir

Sistem ini merupakan sistem pembangkit listrik tenaga surya terhubung ke jaringan dengan kapasitas 250 kW. Proses dimulai dengan empat *array* panel surya (*PV Arrays 1-4*), yang masing-masing menghasilkan daya listrik berdasarkan kondisi lingkungan seperti *irradiansi* (intensitas cahaya matahari) dan suhu. Masing-masing panel surya memiliki sensor yang mendeteksi *irradiansi* dan suhu, yang terhubung ke konverter *DC/DC* untuk mengubah energi surya menjadi arus searah (DC) yang sesuai untuk selanjutnya diolah. Setelah daya DC dikonversi, energi ini diteruskan ke VSC (Voltage Source Converter). VSC bertanggung jawab untuk mengonversi arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) yang dapat diterima dan disalurkan ke jaringan listrik. VSC ini dikendalikan oleh sistem kontrol VSC, yang memastikan bahwa aliran daya sesuai dengan kebutuhan dan kemampuan jaringan, serta mematuhi parameter teknis yang dibutuhkan untuk operasional *grid*. Proses pengaturan ini juga memungkinkan sinkronisasi dengan jaringan listrik agar keduanya bisa bekerja bersama dengan aman.

Keluaran dari VSC kemudian mengalir ke sistem distribusi jaringan, yang mencakup beberapa feeder (saluran distribusi). Dalam gambar ini, ada dua *feeder* utama yang menghubungkan sistem ke *grid feeder* 14 km dan feeder 8 km. Masing-masing *feeder* mengalirkan daya ke berbagai beban listrik, termasuk beban utama seperti sistem beban industri, rumah tangga, dan beberapa fasilitas lain yang membutuhkan daya, seperti yang terlihat pada beban 30-MW dan 2-MW yang terhubung ke *grid*. Di bagian jaringan ini juga terdapat pengaturan untuk memastikan bahwa daya yang diterima *grid* sesuai dengan kebutuhan operasional. Terdapat unit pengaturan daya reaktif (40 kVAR), yang berfungsi untuk menyeimbangkan daya reaktif yang diperlukan oleh *grid*. Proses ini sangat penting untuk mempertahankan stabilitas jaringan listrik. Selain itu, sistem ini juga dilengkapi dengan pengukuran dan pemantauan, yang memungkinkan monitoring secara *real-time* dari parameter-parameter seperti *irradiansi* dan daya maksimum yang dihasilkan. Pengukuran ini ditampilkan dalam format yang memungkinkan visualisasi dan analisis lebih lanjut, yang terintegrasi dengan alat kontrol untuk menyesuaikan kinerja sistem secara otomatis jika diperlukan. Semua elemen ini bekerja secara terkoordinasi untuk memastikan sistem tenaga surya dapat beroperasi secara optimal dan terhubung dengan *grid* secara efisien.



Gambar 2. Blok Diagram Alir

2.3 Kapasitas Sistem Grid Connected PV Farm

Secara rinci kapasitas total dari sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *grid-connected* yang digunakan, serta parameter teknis dari setiap komponen utama dalam sistem. Pemahaman terhadap kapasitas dan karakteristik tiap bagian sangat penting untuk memastikan kinerja optimal dan keandalan sistem dalam mengalirkan daya ke jaringan listrik. Penjelasan ini juga menjadi dasar dalam analisis performa, evaluasi efisiensi, serta pengembangan strategi kontrol dan pemeliharaan sistem.

1) PV Array dan DC/DC Converter

Terdapat 4 buah *PV Array*, masing-masing dihubungkan ke konverter DC/DC. Setiap *PV array* menerima input berupa intensitas iradiasi dan suhu. Konverter DC/DC digunakan untuk mengatur tegangan output dan mengoptimalkan daya menggunakan teknik *Maximum Power Point Tracking* (MPPT).

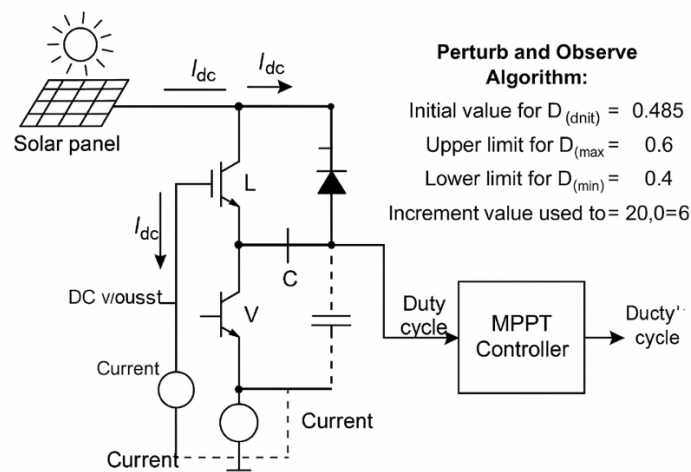
Table 1. Parameter PV Array

PV Array	Irradiance (W/m ²)	Temperature (°C)
PV 1	1000	40
PV 2	1000	45
PV 3	1000	35
PV 4	1000	45

Berdasarkan Tabel 1. Menunjukkan nilai dari kapasitas *PV Array*, PV 1 *Irridiance* 1000(W/m²) dengan *Temperature* 40 (°C), PV 2 *Irridiance* 1000(W/m²) dengan *Temperature* 25 (°C), PV 3 *Irridiance* 1000(W/m²) dengan *Temperature* 35 (°C), PV 4 *Irridiance* 1000(W/m²) dengan *Temperature* 45 (°C).

Selain itu Sistem *Photovoltaic* memerlukan converter DC-DC. *Converter* DC ke DC adalah suatu rangkaian elektronik yang menggunakan saklar elektronik untuk mengubah tegangan searah menjadi tegangan searah dengan tegangan dan frekuensi yang dapat diatur [11]. DC-DC *converter* dalam sistem photovoltaic 25 kW berfungsi untuk menstabilkan tegangan output dari panel surya, mengatur titik daya maksimum (MPPT) agar sistem menghasilkan daya tertinggi secara efisien, serta menaikkan tegangan (boost) agar sesuai dengan kebutuhan beban atau inverter. Selain itu, Rangkaian *Boost Converter* yang digunakan dalam sistem panel surya dengan algoritma *Perturb and Observe* (P&O) untuk mengatur titik daya maksimum (*Maximum Power Point Tracking* / MPPT). Panel surya menghasilkan arus searah (*Idc*) yang dialirkan ke konverter *boost*. Rangkaian *boost converter* terdiri dari induktor (L), dioda, kapasitor (C), dan saklar elektronik (V, biasanya berupa MOSFET). MPPT controller berfungsi untuk mengatur siklus kerja (*duty cycle*) dari saklar berdasarkan nilai D yang dikontrol menggunakan algoritma P&O. Parameter yang digunakan adalah nilai awal D = 0.485, batas atas D = 0.6, batas bawah D = 0.4, dan nilai kenaikan/penurunan D (DeltaD) = 20e-6. Algoritma ini secara berkala mengubah *duty cycle* dan mengamati perubahan daya output untuk mengatur D agar mendekati titik daya maksimum. Daya yang diperoleh dari panel kemudian ditingkatkan tegangannya oleh konverter boost dan disimpan ke kapasitor untuk

digunakan oleh beban DC. Rangkaian ini umum digunakan dalam aplikasi energi terbarukan seperti sistem tenaga surya *off-grid*.



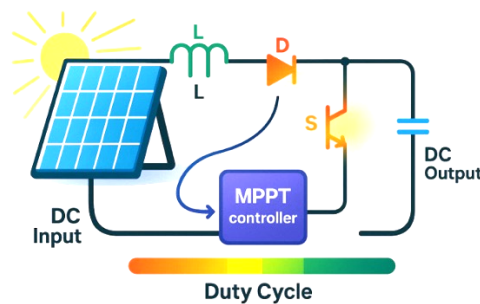
Gambar 3. Konverter DC-DC

2) DC Bus

Konverter DC-DC Bus dapat dikendalikan oleh pengendali arus dan tegangan keluaran [12]. Output dari keempat *converter* DC/DC disatukan dalam satu DC Bus. Tegangan pada bus ini menjadi input ke *converter* VSC (*Voltage Source Converter*). DC Bus Voltage biasanya merujuk pada tegangan di bus DC setelah tegangan dari panel PV (*Photovoltaic*) diubah oleh DC-DC *converter* atau *Voltage Source Converter* (VSC). tegangan DC yang dihasilkan oleh PV Arrays disalurkan ke DC-DC *converter*, yang kemudian diubah menjadi tegangan yang sesuai untuk sistem grid melalui VSC. Pada sistem *photovoltaic* (PV), DC Bus digunakan untuk menstabilkan dan mengatur aliran daya DC yang dihasilkan oleh panel surya sebelum dikonversi menjadi daya AC oleh inverter. Dengan adanya bus DC, tegangan dapat dijaga stabil meskipun ada variasi pada output daya panel yang dipengaruhi oleh faktor seperti irradiansi dan suhu. Selain itu, DC Bus memungkinkan sistem untuk menghubungkan beberapa komponen seperti array PV dan inverter secara efisien, memfasilitasi pengaturan arus dan tegangan, serta mendukung pengendalian MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) untuk memastikan panel surya bekerja pada titik daya maksimum. Sistem ini juga mempermudah pengelolaan daya dan distribusinya, memberikan fleksibilitas dalam menghubungkan berbagai komponen dalam sistem energi terbarukan, serta meningkatkan efisiensi konversi daya dari DC ke AC yang siap disalurkan ke grid atau digunakan untuk beban lainnya. Dalam sistem ini, nilai DC Bus yang digunakan adalah 500 V, yang merupakan tegangan nominal untuk memastikan konversi daya yang optimal dan stabil.

3) Maximum Power Point Tracking (MPPT)

MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) yang dikombinasikan dengan rangkaian *Boost Converter* untuk panel surya. Sumber energi berasal dari panel surya (DC Input), kemudian arus mengalir melalui induktor (L) dan dikendalikan oleh saklar elektronik (S), biasanya berupa transistor atau MOSFET. Saklar ini diatur oleh MPPT Controller untuk mengatur besar kecilnya *duty cycle*, yaitu rasio waktu saklar tertutup dalam satu siklus. Ketika saklar membuka dan menutup dengan kecepatan tertentu, energi disimpan dan dilepas dari induktor menuju kapasitor di sisi keluaran, menghasilkan tegangan yang lebih tinggi dari input (karakteristik *boost converter*). Dioda (D) berfungsi sebagai jalur satu arah agar arus tidak kembali ke sumber. MPPT controller memantau daya keluaran dan mengatur *duty cycle* untuk menjaga sistem bekerja pada titik daya maksimum (*Maximum Power Point*), sehingga efisiensi penyerapan energi dari panel surya tetap optimal meski kondisi pencahayaan berubah-ubah. Visualisasi warna di bagian bawah menunjukkan rentang nilai *duty cycle* yang terus disesuaikan berdasarkan perintah dari MPPT.



Gambar 4. Sistem MPPT

4) Voltage Source Converter (VSC - Average Model)

Sistem konverter sumber tegangan (*Voltage Source Converter/ VSC*) dalam skema 250-kW *Grid-Connected PV Farm* ini memiliki kapasitas daya sebesar 250 kW dan diimplementasikan dalam bentuk model rata-rata (*average model*) untuk menyederhanakan simulasi. VSC menerima daya DC dari gabungan empat PV array melalui konverter DC/DC dan mengubahnya menjadi daya AC tiga fasa yang kemudian disalurkan ke jaringan melalui *transformator step-up* berkapasitas 250 kVA (4160 V/25 kV). VSC dilengkapi dengan kapasitor DC-link yang berfungsi menjaga kestabilan tegangan pada sisi DC serta filter L atau LCL untuk meredam harmonisa pada sisi AC. Sistem kontrol VSC terdiri dari *Phase Locked Loop* (PLL) untuk sinkronisasi fasa dengan jaringan, pengendali arus untuk mengatur komponen i_d (daya aktif) dan i_q (daya reaktif), serta regulator tegangan DC untuk menjaga kestabilan output dan pengendali daya untuk memastikan daya aktif dan reaktif sesuai permintaan sistem. Dengan konfigurasi ini, VSC berperan penting dalam menjaga kestabilan, efisiensi konversi, dan kualitas daya yang disuplai ke jaringan listrik.

5) Jaringan Distribusi dan Beban

Jaringan distribusi terdiri dari dua *feeder* utama dengan kapasitas dan fungsi yang berbeda. *Feeder 1*, sepanjang 14 km, menyalurkan daya atau komersial dengan total daya sebesar 30 MW, yang juga terhubung ke sistem 120 kV melalui transformator besar untuk memastikan distribusi daya yang stabil dan efisien. Sementara itu, *Feeder 2*, dengan panjang 8 km, menyalurkan daya ke dua beban yang lebih kecil, yaitu 2 MW dan 100 kW, serta dilengkapi dengan bank kapasitor sebesar 40 kvar untuk kompensasi daya reaktif, guna menjaga kualitas daya dan mengurangi kerugian daya pada jaringan. Kegagalan jaringan distribusi listrik dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti cuaca buruk, kecelakaan, kerusakan peralatan, dan banyak lagi [13]. Oleh karena itu, kedua *feeder* ini memainkan peran penting dalam memastikan penyediaan energi yang sesuai dengan kebutuhan beban dan stabilitas sistem distribusi.

6) Step-up Transformer ke Grid (25 MVA, 120 kV / 25 kV)

Transformer step-up dengan kapasitas 25 MVA ini berfungsi untuk menghubungkan sistem ke grid tegangan tinggi 120 kV dengan meningkatkan tegangan dari 25 kV pada sisi primer ke 120 kV pada sisi sekunder. Dengan kapasitas 25 MVA, transformator ini mampu mengalirkan daya besar yang diperlukan untuk integrasi sistem distribusi atau pembangkit dengan jaringan listrik tegangan tinggi. Peran utama transformator ini adalah memastikan daya yang dihasilkan atau diproses pada tegangan menengah (25 kV) dapat disalurkan ke *grid* tegangan tinggi (120 kV), sehingga memungkinkan distribusi daya yang efisien dan stabil ke konsumen dalam cakupan area yang lebih luas, termasuk untuk kebutuhan industri besar atau wilayah dengan permintaan energi tinggi.

2.4 Menghitung Parameter Kapasitas Sistem (P_V)

Dalam sistem 250 kW *Grid-Connected PV Farm* ini menentukan konfigurasi sistem *fotovoltaik* (PV) yang dapat menghasilkan daya total 250 kW dengan menggunakan 4 PV array, kita perlu menghitung beberapa parameter, seperti daya per string, daya per array, dan jumlah string paralel yang dibutuhkan.

Table 2. Data Perhitungan

Daya Maksimum per Modul	Jumlah String Seri	Jumlah String Paralel	Jumlah PV Array
327,106	5	38	4

Dari Tabel 2 merupakan data acuan perhitungan untuk menentukan konfigurasi sistem *photovoltaic*. Dalam memastikan jumlah keseluruhan daya 250 kW, perlu menghitung daya dari *string* seri dan paralel, maka dapat dihitung dengan rumus:

$$\begin{aligned} \text{Daya per string} &= \text{Daya maksimum} \times \text{Daya string seri} \\ \text{Daya per string} &= 327.106 \times 5 = 1,635.53 \text{ W} \end{aligned} \quad (1)$$

Daya *string* seri setelah dihitung menghasilkan total 1,635.53 kW. Kemudian dalam menentukan daya *string* paralelnya perlu mengetahui jumlah *string* paralel setiap *array* nya. Diketahui bahwa jumlah *string* paralel setiap *array* nya adalah 38. Sehingga daya total untuk satu *array* dapat dihitung dengan mengalikan daya *string* seri dengan jumlah *string* paralel:

$$\begin{aligned} \text{Daya per array} &= \text{Daya string seri} \times \text{Jumlah string paralel} \\ \text{Daya per array} &= 1,635.53 \text{ W} \times 38 = 62,150.14 \text{ W} = 62.15 \text{ kW} \end{aligned} \quad (2)$$

Diketahui bahwa jumlah total *string* paralel yaitu 62.15 kW. Kemudian untuk mendapatkan daya total, maka dapat mengalikan daya per *string* paralel dengan jumlah PV *array*:

$$\begin{aligned} \text{Daya total untuk 4 array} &= \text{Daya per array} \times \text{Jumlah PV array} \\ \text{Daya total 4 array} &= 62.15 \text{ kW} \times 4 = 248.6 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3)$$

Diketahui dari hasil perhitungan, maka total daya yang dihasilkan oleh ke empat PV *array* adalah 248,6 kW. Menunjukkan bahwa konfigurasi yang digunakan yaitu 38 *string* paralel sudah sangat sesuai untuk kebutuhan pembangkit daya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

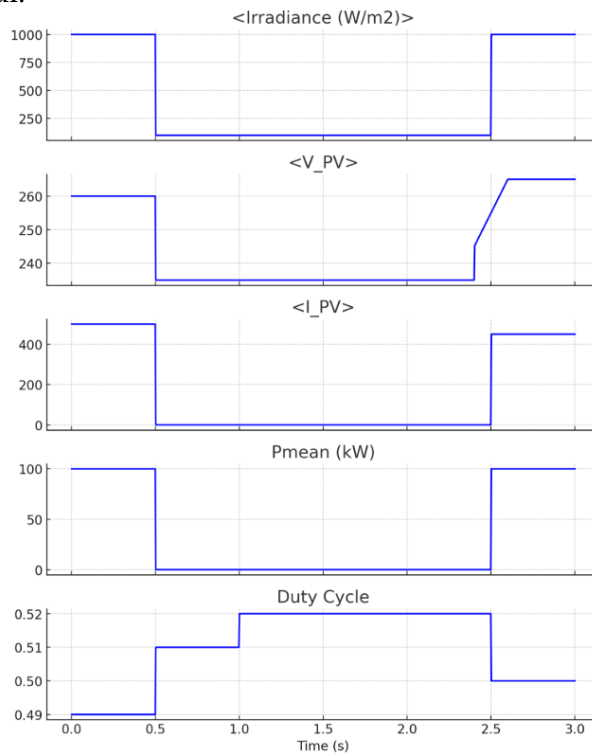
3.1 Hasil Pembahasan

Pengujian sistem secara keseluruhan dilakukan untuk mengevaluasi respons dan kestabilan sistem pembangkit PV terhadap perubahan kondisi lingkungan dan beban. Uji pertama dilakukan dengan memvariasikan intensitas radiasi matahari sementara suhu panel tetap dijaga konstan, serta beban dibiarkan berubah secara dinamis untuk melihat sejauh mana sistem mampu mempertahankan kestabilan daya keluaran. Uji kedua dilakukan dengan mempertahankan radiasi matahari tetap, namun suhu panel divariasikan dan beban kembali berubah, guna mengamati pengaruh temperatur terhadap kinerja sistem. Selain itu, pengujian ini juga bertujuan untuk memastikan bahwa sistem dapat secara konsisten menjaga kestabilan daya pada sisi beban meskipun terjadi fluktuasi pada sisi input (PV).

3.1.1 Hasil Pengujian PV 1

Pada skenario pengujian pertama, bahwa perubahan radiasi *Irradiance* secara langsung memengaruhi beberapa parameter utama pada sistem, yaitu tegangan (V_{PV}), arus (I_{PV}), daya rata-rata (P_{mean}), dan siklus tugas (*Duty Cycle*). Pada awal periode, ketika radiasi meningkat dari sekitar 250 W/m² menuju 1000 W/m², daya yang dihasilkan oleh sistem (P_{mean}) juga menunjukkan peningkatan signifikan, mencapai sekitar 50-100 kW. Peningkatan daya ini terjadi seiring dengan kenaikan arus (I_{PV}) yang bervariasi antara 200 A hingga 450 A, yang menyesuaikan dengan peningkatan radiasi. Tegangan (V_{PV}) tetap stabil pada sekitar 260V untuk sebagian besar waktu, meskipun terjadi lonjakan kecil pada detik kedua, yang menunjukkan bahwa sistem melakukan penyesuaian untuk menjaga kestabilan tegangan meskipun ada fluktuasi radiasi.

Siklus tugas *duty cycle* juga menunjukkan stabilitas dengan nilai sekitar 0.51 hingga 0.52, yang menunjukkan upaya sistem untuk menjaga efisiensi operasional meskipun terjadi perubahan dalam radiasi dan daya yang dihasilkan. Ketika radiasi mulai menurun, daya yang dihasilkan berkurang, dan arus pun berkurang seiring dengan penurunan radiasi. Meskipun ada perubahan ini, tegangan tetap stabil, mencerminkan bahwa sistem tidak terlalu dipengaruhi oleh fluktuasi kecil dalam radiasi. Siklus tugas tetap berada pada rentang yang stabil, yang menggambarkan mekanisme pengendalian sistem dalam menjaga efisiensi kerja meskipun ada variabilitas dalam parameter lainnya. Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa sistem beroperasi dengan efisien, menyesuaikan daya, arus, dan tegangan untuk merespons perubahan radiasi, sementara siklus tugas dikendalikan untuk memaksimalkan efisiensi dan kestabilan operasional pada berbagai kondisi radiasi yang terjadi.

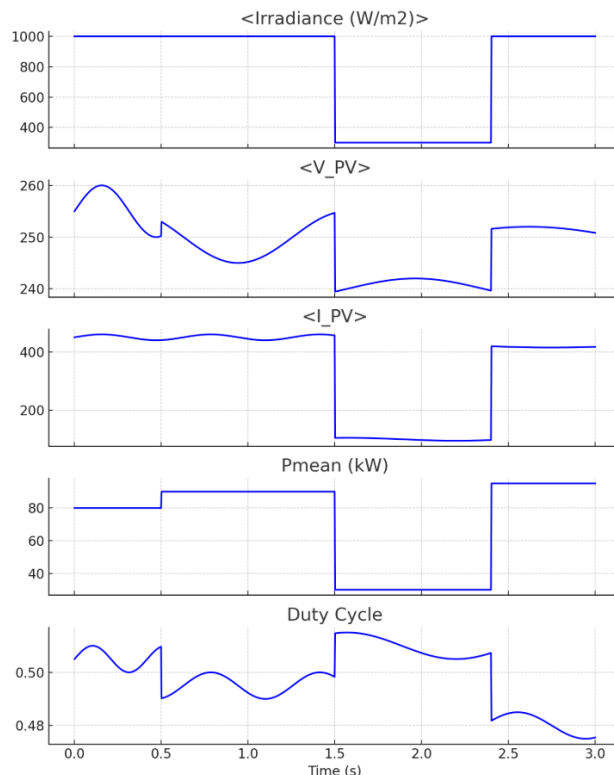


Gambar 5. Grafik PV 1

3.1.2. Hasil Pengujian PV 2

Hasil pengujian menunjukkan, ketika radiasi berubah sementara suhu tetap dan beban berubah, daya yang dihasilkan (P_{mean}) akan berfluktuasi mengikuti perubahan radiasi, dengan nilai radiasi *irradiance* yang bergerak dari sekitar 400 W/m² hingga 1000 W/m². Tegangan panel surya (V_{PV}) tetap relatif stabil sekitar 260V, sementara arus (I_{PV}) menyesuaikan antara 200A hingga 450A untuk menjaga keseimbangan daya, dengan daya (P_{mean}) yang berfluktuasi antara 50 kW hingga 80 kW sesuai perubahan radiasi dan beban. Siklus tugas (*Duty Cycle*) juga menunjukkan variasi, berfluktuasi antara 0.48 hingga 0.51 untuk memaksimalkan efisiensi sistem. Ketika radiasi tetap dan suhu berubah, meskipun radiasi tetap konstan, suhu yang berubah dapat mempengaruhi efisiensi sistem, yang menyebabkan fluktuasi kecil pada daya (P_{mean}).

Pada saat yang sama, perubahan beban akan mempengaruhi daya yang dihasilkan, dengan arus dan tegangan yang menyesuaikan untuk memenuhi perubahan tersebut. Siklus tugas tetap menyesuaikan untuk mempertahankan efisiensi operasional. Pada skenario terakhir, ketika radiasi dan suhu berubah bersamaan dengan variasi beban, daya (P_{mean}) berfluktuasi lebih dinamis, dengan fluktuasi tegangan (V_{PV}) dan arus (I_{PV}) yang lebih kompleks untuk menjaga keseimbangan daya dan efisiensi sistem. Siklus tugas *Duty Cycle* juga berfluktuasi lebih sering, mencerminkan penyesuaian sistem terhadap kombinasi perubahan radiasi, suhu, dan beban.

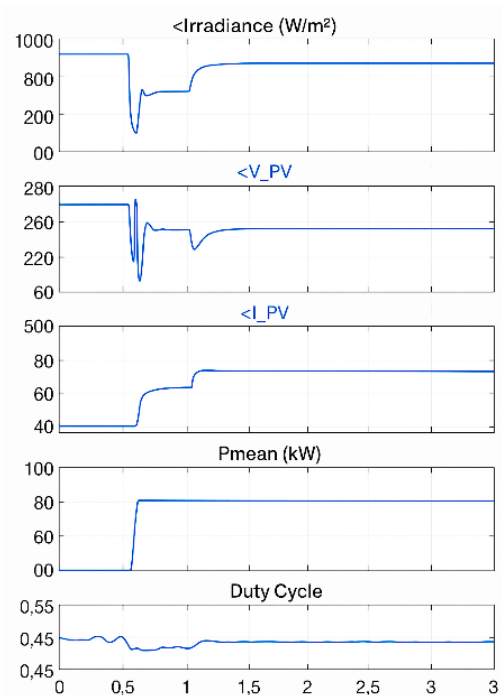


Gambar 6. Grafik PV 2

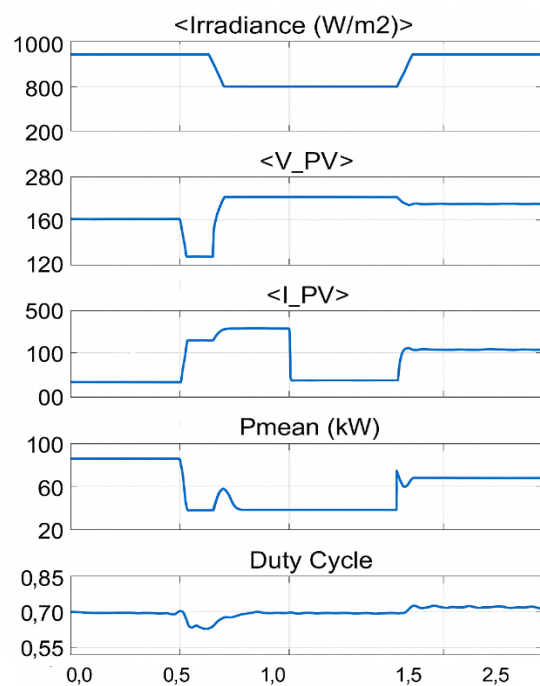
2.1.3 Hasil Pengujian PV 3

Hasil pengujian sistem PV 3, diberikan perubahan radiasi *Irradiance*, suhu, dan beban saling mempengaruhi dalam sistem *photovoltaic*. Ketika radiasi berubah sementara suhu tetap dan beban berubah, daya yang dihasilkan (P_{mean}) akan berfluktuasi mengikuti perubahan radiasi, dengan tegangan (V_{PV}) yang tetap stabil sekitar 260 V dan arus (I_{PV}) yang menyesuaikan untuk memenuhi kebutuhan daya lebih besar saat beban meningkat. Dalam grafik ini, arus (I_{PV}) bervariasi antara 40 A hingga 500 A, sementara daya (P_{mean}) berfluktuasi antara 50 kW hingga 80 kW sesuai dengan perubahan radiasi dan beban. Siklus tugas *Duty Cycle* juga sedikit berfluktuasi antara 0.45 hingga 0.55 untuk menjaga efisiensi sistem. Ketika radiasi tetap dan suhu berubah, meskipun radiasi tidak berubah, fluktuasi suhu dapat mempengaruhi efisiensi sistem, yang tercermin dalam fluktuasi daya (P_{mean}).

Ketika beban berubah, arus (I_{PV}) dan daya (P_{mean}) menyesuaikan sesuai dengan kebutuhan sistem. Pada skenario ketiga, ketika radiasi dan suhu berubah bersamaan, fluktuasi daya menjadi lebih kompleks. Tegangan (V_{PV}) tetap stabil di sekitar 260 V, tetapi perubahan radiasi dan suhu mempengaruhi arus (I_{PV}) yang bervariasi antara 40 A hingga 500 A dan daya (P_{mean}) yang berfluktuasi, sementara siklus tugas *Duty Cycle* beradaptasi untuk memaksimalkan efisiensi. Sistem beradaptasi dengan perubahan radiasi, suhu, dan beban untuk menjaga keseimbangan daya, dengan penyesuaian pada tegangan, arus, dan siklus tugas untuk mempertahankan efisiensi operasional yang optimal.



Gambar 7. Grafik PV 3



Gambar 8. Grafik PV 4

3.1.4 Hasil Pengujian PV 4

Hasil pengujian pada grafik PV4, perubahan *irradiance* (W/m^2), suhu, dan beban memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja sistem *Photovoltaic*. Ketika *irradiance* berubah sementara suhu tetap dan beban berubah, kita melihat bahwa perubahan *irradiance* yang meningkat dari 800 W/m^2 hingga 1000 W/m^2 menyebabkan peningkatan *Pmean* (kW), dengan nilai daya yang mencapai sekitar 100 kW. *I_{PV}* meningkat seiring dengan peningkatan *irradiance* untuk menyesuaikan kebutuhan daya, sedangkan *V_{PV}* cenderung menurun sedikit karena perubahan arus. *Duty Cycle* sedikit berfluktuasi antara 0.60 hingga 0.70, yang menunjukkan bahwa sistem menyesuaikan untuk memaksimalkan efisiensi dalam merespons perubahan radiasi dan beban. Ketika *irradiance* tetap konstan dan suhu berubah, meskipun *irradiance* stabil, perubahan suhu dapat mempengaruhi efisiensi sistem, yang tercermin dalam fluktuasi *Pmean* (kW) antara 50 kW hingga 90 kW. Hal ini terjadi karena suhu dapat menurunkan efisiensi konversi energi, meskipun arus (*I_{PV}*) dan daya (*Pmean*) disesuaikan untuk memenuhi perubahan beban.

Pada skenario terakhir, ketika *irradiance* dan suhu berubah bersamaan, fluktuasi pada *Pmean* (kW) menjadi lebih kompleks karena kedua faktor tersebut mempengaruhi *I_{PV}* dan *V_{PV}*. Perubahan suhu dapat menurunkan efisiensi lebih lanjut meskipun *irradiance* tinggi, dan siklus tugas *Duty Cycle* berfluktuasi lebih besar untuk menyesuaikan kondisi ini dan mempertahankan efisiensi operasional. Pada akhirnya, sistem fotovoltaiik berusaha menyesuaikan *I_{PV}*, *V_{PV}*, dan *Duty Cycle* secara dinamis untuk mempertahankan kestabilan daya dan efisiensi meskipun ada variasi dalam *irradiance*, suhu, dan beban.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan pengujian pada sistem fotovoltaiik (PV) 250 kW yang terhubung ke jaringan, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi sistem yang menggunakan 38 string paralel per array sudah sangat sesuai untuk mencapai kebutuhan daya 250 kW, dengan total daya yang dihasilkan mencapai 248,6 kW. Kelebihan utama sistem ini adalah kemampuannya dalam menyesuaikan daya, arus, dan tegangan untuk menjaga kestabilan operasional meskipun terjadi

fluktuasi dalam radiasi, suhu, dan beban. Selain itu, sistem ini menunjukkan respons yang baik terhadap perubahan radiasi matahari dan suhu panel, dengan tegangan yang tetap stabil di sekitar 260V dan siklus tugas yang dapat mengoptimalkan efisiensi. Namun, kekurangan sistem ini terletak pada pengaruh perubahan suhu yang dapat mengurangi efisiensi konversi energi, meskipun arus dan daya disesuaikan dengan perubahan beban. Pengembangan selanjutnya dapat difokuskan pada peningkatan efisiensi konversi daya, pengintegrasian sistem penyimpanan energi untuk mengatasi ketergantungan pada kondisi cuaca, serta pemantauan dan kontrol yang lebih canggih untuk menjaga kestabilan dan efisiensi jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Irawati, F. D. Kartikasari, and E. Tarigan, "Pengenalan Energi Terbarukan dengan Fokus Energi Matahari kepada Siswa Sekolah Dasar dan Menengah," *Publikasi Pendidikan*, vol. 11, no. 2, 2021, doi: [10.26858/publikan.v11i2.16413](https://doi.org/10.26858/publikan.v11i2.16413).
- [2] Denny Haryanto Sinaga, Riz Rifai Oktavianus Sasue, and Harvei Desmon Hutahaeen, "Pemanfaatan Energi Terbarukan Dengan Menerapkan Smart Grid Sebagai Jaringan Listrik Masa Depan," *JOURNAL ZETROEM*, vol. 3, no. 1, 2021, doi: [10.36526/ztr.v3i1.1251](https://doi.org/10.36526/ztr.v3i1.1251).
- [3] R. Effendi, "Integrasi Sistem Energi Terbarukan dan Penyimpanan untuk Meningkatkan Efisiensi Konversi Energi pada Mikrogrid," *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, vol. 8, no. 1, 2023, doi: [10.33379/gtech.v8i1.3682](https://doi.org/10.33379/gtech.v8i1.3682).
- [4] A. Kurniawan, "Perancangan Model dan Simulasi Modul Sel Surya Paralel Menggunakan MATLAB," *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro UIN Sunan Gunung Djati Bandung ...*, vol. 1, no. 3, 2022.
- [5] M. A. Rahmanta, A. Syamsuddin, F. Tanbar, and ..., "Analisis Perkembangan Teknologi Modul Photovoltaic (PV) Untuk Meningkatkan Penetrasi Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) Di Indonesia," *Jurnal Offshore: Oil ...*, vol. 7, no. 1, 2023.
- [6] A. Basit, R. Khoeruzzaman, R. Rais, and A. Maulana, "Monitoring System Automatic Solar Cell Sebagai Sumber PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) Berbasis Microcontroller," *Smart Comp: Jurnalnya Orang Pintar Komputer*, vol. 13, no. 1, 2024, doi: [10.30591/smartcomp.v13i1.6057](https://doi.org/10.30591/smartcomp.v13i1.6057).
- [7] D. W. Silitonga and K. B. Adam, "Monitoring Sinkronisasi Tegangan Photovoltaic(Pv)-Grid(Pln)," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 10, no. 6, p. 5144, 2023.
- [8] S. Qirana and E. Harahap, "Simulasi Antrian Kendaraan Pada Gerbang Tol Pasteur Kota Bandung Menggunakan SimEvents MATLAB Vehicle Queue Simulation at Pasteur Toll Gate Bandung City Using MATLAB SimEvents," *Jurnal Matematika*, vol. 21, no. 1, 2022.
- [9] M. Fatima, A. S. Siddiqui, and S. K. Sinha, "Implementation of a Two Stage Grid Connected Solar PV System with Reactive Power Compensation under Dynamic Load Conditions," *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, vol. 11, no. 3, 2023.
- [10] F. Al-Habsyi, R. Fauzi, I. Mahmudi, Y. A. Rahman, and M. Masarrang, "MODIFIKASI SEPIC CONVERTER UNTUK PENGONTROLAN TEGANGAN KELUARAN BERBASIS LOGIKA FUZZY," *Jurnal Ilmiah Foristek*, vol. 13, no. 2, Nov. 2022, doi: [10.54757/fs.v13i2.147](https://doi.org/10.54757/fs.v13i2.147).
- [11] N. Fuada and I. Husnaini, "Rancang Bangun Buck Converter dengan Kontrol PID Berbasis Mikrokontroler Arduino," *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 4, no. 2, pp. 781–791, Oct. 2023, doi: [10.24036/jtein.v4i2.513](https://doi.org/10.24036/jtein.v4i2.513).
- [12] S. Muhammad Ilman and F. A. Septian Putra, "Pemodelan dinamis dan kendali multi-loop konverter DC-DC boost dengan pengendali PI," *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga)*, vol. 3, no. 1, 2023, doi: [10.35313/jitel.v3.i1.2023.47-56](https://doi.org/10.35313/jitel.v3.i1.2023.47-56).
- [13] A. Hariadi, I. Termawut, and A. Hafid, "Analisis Resiko Kegagalan Jaringan Distribusi PLN Menggunakan Metode Fault Tree Analysis," *IJESPG Journal*, vol. 1, no. 3, 2023, [Online]. Available: <http://ijespgjournal.org>
- [14] A. A. Hidayat, I. Made, A. Nrnatha, and D. S. Nababan, "ANALISIS SOFT STARTING METODA PWM UNTUK MOTOR INDUKSI TIGA FASE 37 KW Analysis Soft Starting PWM Method for Three Phase Induction Motor 37 KW," *Dielektrika*, vol. 7, no. 2, pp. 132–139, 2020.