

Optimasi Kinerja Panel Surya *Monocrystalline* dan *Polycrystalline* dengan Pengendali MPPT pada Berbagai Tingkat Iradiasi dan Temperatur: Studi Simulasi dengan Matlab

Hafidz Saeful Fikri*, Dedi Nugroho, Budi Pranomo Jati

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, Indonesia

Article Info

Article history:

Submitted December 26, 2023

Accepted January 16, 2024

Published February 1, 2024

Keywords:

Panel surya,
maximum power point tracking,
simulink Matlab

Solar panels,
maximum power point tracking,
simulink Matlab

ABSTRACT

Dalam upaya mengatasi kelemahan energi konvensional dan mengatasi kekhawatiran global mengenai perubahan iklim, penggunaan sumber energi terbarukan, seperti energi surya, menjadi semakin penting. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menjelaskan seberapa baik kinerja panel surya saat terkena fluktuasi radiasi dan suhu. Pemodelan matematika simulink Matlab akan dimanfaatkan bersama dengan *maximum power point tracking* (MPPT) untuk menghasilkan daya keluaran yang optimal. Saat mengukur panel surya dengan kapasitas 100 watt, keluaran daya untuk sistem *monocrystalline* dan *polycrystalline* masing-masing adalah 85 watt dan 78,2 watt; ketika MPPT diterapkan, angka tersebut meningkat menjadi 103,3 watt dan 94,4 watt. Dengan kapasitas 250 watt, daya yang dihasilkan sebesar 168 Watt untuk *monocrystalline* dan 126,1 watt untuk *polycrystalline*. Setelah diterapkan MPPT, dayanya naik menjadi 205,3 watt dan 155,3 watt. Oleh karena itu, diketahui bahwa perangkat *monocrystalline* memiliki daya keluaran yang lebih tinggi dan radiasi matahari memengaruhi seberapa besar daya yang dihasilkannya. Berdasarkan hasil penelitian, integrasi MPPT dengan algoritma P&O bertujuan untuk meningkatkan efisiensi sistem PV dengan memastikan bahwa daya yang dihasilkan selalu berada pada titik maksimal dengan meningkatkan daya rata-rata sebesar 11 % pada kapasitas 100 watt dan 20 % pada kapasitas 250 watt.

The utilization of renewable energy sources, like solar energy, is becoming more and more crucial in an effort to overcome the weaknesses of conventional energy and address global corners regarding climate change. The purpose of this study is to clarify how solar panels function in different temperature and radiation environments. The ideal output power will be generated by combining maximum power point tracking MPPT with mathematical modeling using Matlab Simulink. When MPPT was implemented, the power output of a solar panel with a 100 watts capacity climbed to 103.3 watts for monocrystalline systems and 94.4 watts for polycrystalline systems. 126.1 watts of polycrystalline power and 168 watts of monocrystalline power are produced by the 250 watts capacity. After implementing MPPT, the power increased to 205.3 watts and 155.3 watts respectively. Therefore, it is generally known that solar radiation impacts the power output of monocrystalline devices, which impacts their output power. Based on research findings, the integration of MPPT with the P&O algorithm seeks to optimize PV system efficiency by ensuring that the power produced is consistently at its peak, achieved with an average power increase of 11% at 100 watts capacity and 20% at 250 watts capacity.



Corresponding Author:

Hafidz Saeful Fikri,

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung
Jl. Kaligawe Raya Km. 4, Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah 50112

Email: *hafidzsaefulfikri01@std.unissula.ac.id

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan sumber energi terbarukan seperti energi surya, semakin penting sebagai upaya mengatasi keterbatasan energi konvensional dan kekhawatiran global terkait perubahan iklim. Salah satu teknologi umum untuk menghasilkan listrik dari energi matahari adalah penggunaan panel surya. Mengingat hal ini mempengaruhi efektivitas dan efisiensi konversi energi matahari menjadi energi listrik, pemilihan jenis panel surya yang tepat sangatlah penting dalam situasi ini [1]. Melalui RUPTL (Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik), pemerintah Republik Indonesia menargetkan 23% energinya berasal dari sumber baru dan terbarukan pada tahun 2025. Sementara itu, konsumsi energi surya diproyeksikan mencapai 45 GW pada tahun 2050, naik dari 6,5 GW pada tahun 2025. Sekitar 22% dari potensi energi surya sebesar 207,9 GW. Indonesia memiliki lokasi yang ideal untuk memanfaatkan energi surya karena letaknya yang melintasi garis khatulistiwa. Radiasi matahari dipengaruhi oleh garis lintang, kualitas udara, dan sudut matahari terhadap garis khatulistiwa [2].

Karena energi surya bermanfaat bagi lingkungan dan berkelanjutan, maka energi ini menjadi sumber energi terbarukan pilihan. Kemajuan teknologi memungkinkan energi surya diubah menjadi listrik dengan lebih efisien dan terjangkau, sehingga pembangkit listrik skala kecil hingga menengah lebih menyukainya. Dua jenis panel surya yang paling umum pada skala ini adalah *monocrystalline* dan *polycrystalline*. Pilihan antara keduanya sering kali dipengaruhi oleh berbagai elemen termasuk biaya, kinerja, dan lingkungan pengoperasian. Mereka berbeda dalam sifat fisik dan listriknya. Saat merancang sistem pembangkit listrik tenaga surya terbaik, penting untuk membandingkan kinerja panel surya *monocrystalline* dan *polycrystalline* [3].

Untuk meningkatkan produksi listrik dari panel surya, pendekatan Pelacakan Titik Daya Maksimum MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) biasanya digunakan. Algoritma *Perturb and Observe* (P&O) adalah teknik MPPT yang beroperasi dengan menghentikan operasi sistem PV dan melacak variasi keluaran daya. Permasalahan akan berlanjut ke arah yang sama jika perubahan daya positif. Arah gangguan akan bergeser jika terjadi perubahan daya negatif. Untuk meningkatkan efisiensi panel surya dalam berbagai aplikasi, penelitian ini membandingkan kinerja panel surya *monocrystalline* dan *polycrystalline* menggunakan MPPT berdasarkan algoritma P&O dalam kondisi radiasi dan suhu yang bervariasi [4].

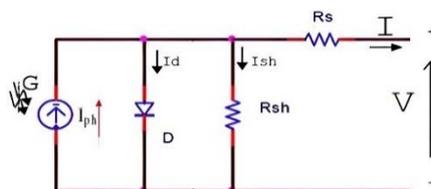
Selain itu, Matlab juga digunakan dalam penelitian ini untuk melakukan analisis data dan simulasi. Matlab digunakan sebagai platform studi desain sel surya untuk membantu penelitian ini. Simulasi kinerja panel surya dan pemodelan matematika yang akurat dimungkinkan oleh komputasi numerik dan lingkungan pemrograman Matlab. Matlab adalah alat yang sangat membantu untuk merancang dan mengoptimalkan panel surya karena menawarkan komponen dan kemampuan untuk analisis data dan visualisasi hasil [5].

2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, penulis menggunakan *Simulink* Matlab untuk mereplikasi pengaturan panel surya dan perangkat MPPT dengan tingkat radiasi dan suhu yang berbeda untuk menentukan nilai daya keluaran maksimum. Pemodelan panel surya menjadi rangkaian *Simulink* harus dilakukan terlebih dahulu. Ada dua jenis panel surya dalam set ini: satu *monocrystalline* dan lainnya *polycrystalline*. Keduanya mempunyai kapasitas yang berbeda-beda. Selain itu, penulis melakukan simulasi menggunakan sejumlah alat dan langkah dalam prosesnya.

2.1 Persamaan Eksponensial Untuk Pemodelan

Berdasarkan Gambar 1, arus foto (I_{ph}) keluaran dari sumber arus sama persis dengan jumlah cahaya yang mengenai sel surya. Aliran arus ini dihalangi di lapangan oleh bahan semikonduktor dan diblokir oleh kontak eksternal. Akibatnya bila terjadi kebocoran arus maka harus dipasang resistor seri (R_s) untuk menghentikan aliran arus dan resistor shunt (R_{sh}) harus dipasang paralel dengan dioda. Ide dasar rangkaian di atas yang dianalogikan dengan sel surya dijelaskan dengan persamaan (I_{pv}). Persamaan (1) menyatakan bahwa arus resistansi (I_{sh}), arus dioda (I_d), dan arus (I_{ph}) dikurangkan untuk menentukan arus sel surya (I_{pv}) [6].



Gambar 1. Rangkaian ekivalen sel surya [6]

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

dengan: I_{pv} = arus keluaran (A)
 I_d = arus saturasi dioda (A)
 I_{ph} = arus yang dibangkitkan (A)
 I_{sh} = arus resistansi (A)

Persamaan berikut dapat digunakan untuk menjelaskan persamaan sebelumnya.

$$I_{pv} = I_{SCO} \left\{ \frac{G}{G_0} \right\} (1 + \alpha_I(T - T_0)) - I_0 \left\{ e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{n(\eta) KT / q} \right)} \right\} - \frac{(V_{pv} + R_s I_{pv})}{R_{sh}} \quad (2)$$

dengan: K = konstanta Boltzman ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K)
 T = suhu sel surya (K)
 T_0 = koefisien suhu (K)
 q = muatan elektron ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
 G_0 = iradiasi referensi (W/m^2)
 G = iradiasi matahari saat ini (W/m^2)
 E = medan listrik (N/C)
 e = bilangan Euler (2,71828)
 η = efisiensi termodinamika
 I_0 = arus saturasi (awal) (A)
 V_{pv} = tegangan keluaran (V)
 R_s = hambatan seri dari dioda (Ω)
 I_{pv} = arus keluaran (A)
 I_d = arus saturasi dioda (A)
 I_{ph} = arus yang dibangkitkan (A)
 I_{sh} = arus resistansi (A)
 R_{sh} = hambatan paralel dari dioda (Ω)
 n = faktor *ideality*

Dari persamaan tersebut terlihat jelas bahwa masih terdapat sejumlah parameter yang belum diketahui. Variabel tersebut antara lain arus nol (I_0), arus dioda (I_d), arus fotovoltaik (I_{ph}), dan arus resistansi paralel (I_{sh}). Rumus yang diketahui berikut ini digunakan untuk menghitung parameter pencetakan sel surya [7]:

a. Arus hambatan paralel (I_{sh}) :

$$I_{sh} = \frac{(V_{pv} + R_s I_{pv})}{R_{sh}} \quad (3)$$

dengan: R_s = hambatan seri dari dioda (Ω)
 I_{pv} = arus keluaran (A)
 I_{sh} = arus resistansi (A)
 R_{sh} = hambatan paralel dari dioda (Ω)

b. Arus fotovoltaik (I_{ph}) :

$$I_{ph} = I_{SCO} \left\{ \frac{G}{G_0} \right\} (1 + \alpha_I(T - T_0)) \quad (4)$$

dengan: T = suhu sel surya (K)
 T_0 = koefisien suhu (K)
 G_0 = iradiasi referensi (W/m^2)
 G = iradiasi matahari saat ini (W/m^2)
 I_0 = arus saturasi (awal) (A)
 I_{ph} = arus yang dibangkitkan (A)

c. Arus dioda (I_d) :

$$I_d = I_0 \left\{ e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{n(\eta) KT / q} \right)} \right\} \quad (5)$$

dengan: K = konstanta Boltzman ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K)
 T = suhu sel surya (K)
 e = bilangan Euler (2,71828)
 η = efisiensi termodinamika
 I_0 = arus saturasi (awal) (A)
 V_{pv} = tegangan keluaran (V)
 R_s = hambatan seri dari dioda (Ω)
 I_{pv} = arus keluaran (A)
 I_d = arus saturasi dioda (A)
 n = faktor *ideality*

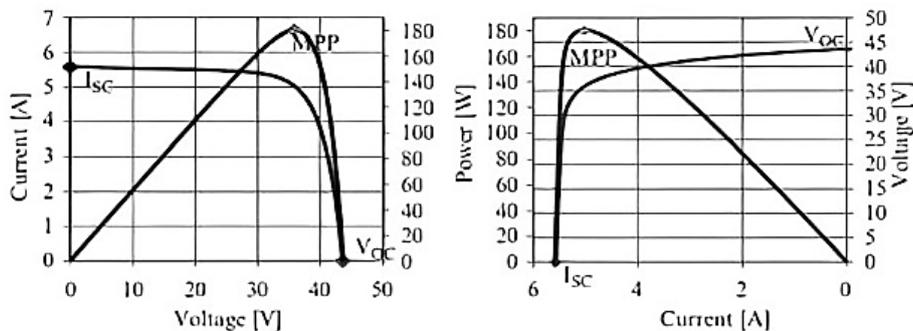
d. Arus saturasi (I_0) :

$$I_0 = I_{0ref} \left(\frac{T}{T_0} \right) e^{-\frac{qE}{\eta KT/q}} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (6)$$

dengan: K = konstanta Boltzman ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K)
 T = suhu sel surya (K)
 T_0 = koefisien suhu (K)
 q = muatan elektron ($1,602 \times 10^{-19}$ C)
 E = medan listrik (N/C)
 e = bilangan Euler (2,71828)
 η = efisiensi termodinamika
 I_0 = arus saturasi (awal) (A)

Modul surya diatur menggunakan pelacakan titik daya maksimum, atau MPPT, untuk memungkinkannya menghasilkan semua daya yang mampu disediakan. Meskipun MPPT bukan sistem pemrosesan mekanis, MPPT dapat digunakan bersama dengannya. MPPT didasarkan pada algoritma pelacakan tertentu dan mekanisme kontrol. Teknik MPPT digunakan untuk menentukan tegangan daya puncak, atau tegangan di mana modul surya dapat menghasilkan daya maksimum. Radiasi matahari, suhu luar, dan suhu sel surya semuanya mempengaruhi daya maksimum [8]. Tujuan utama dari MPPT adalah untuk memaksimalkan keluaran daya modul surya sekaligus mengoptimalkan tegangannya untuk efisiensi optimal. Algoritma MPPT menggunakan logika sederhana untuk menentukan daya terbaik yang dapat dihasilkan modul surya untuk mengisi daya baterai.

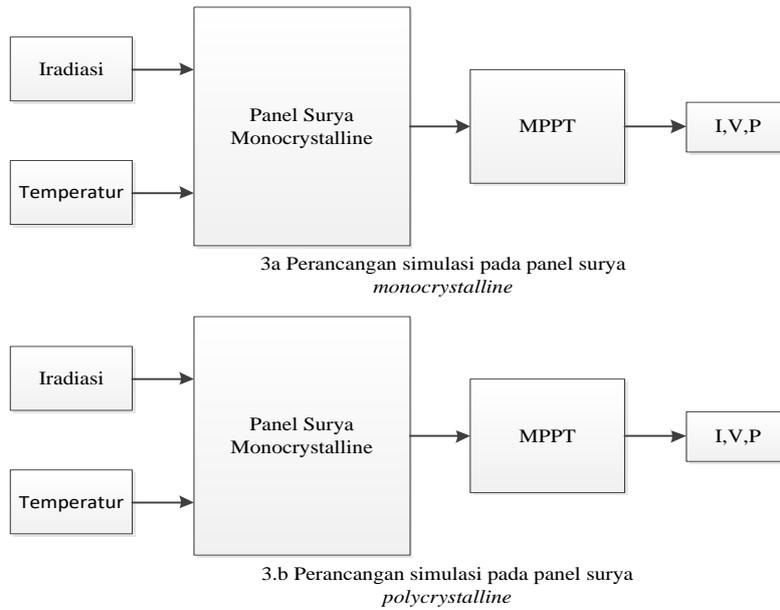
Tujuan dari algoritma P&O adalah untuk secara konstan memindahkan titik kerja lereng positif dan negatif ke titik maksimum. Dengan mengubah siklus penggunaan fotovoltaik dan memantau daya fotovoltaik untuk menyesuaikan tegangan pada siklus berikutnya, algoritma ini mengenali gangguan periodik pada tegangan fotovoltaik. Nilai parameter daya, tegangan, dan arus tata surya harus dimasukkan ke dalam algoritma P&O. Gambar 2. mengilustrasikan bagaimana daya meningkat dengan meningkatnya tegangan di sisi kiri titik tegangan tengah (MPP) dan menurun dengan penurunan tegangan di sisi kanan. Gangguan berikutnya harus dijaga pada arah yang berlawanan dari arah terjadinya gangguan sebelumnya jika terjadi penurunan kekuatan [9].



Gambar 2. Kurva karakteristik panel surya [10]

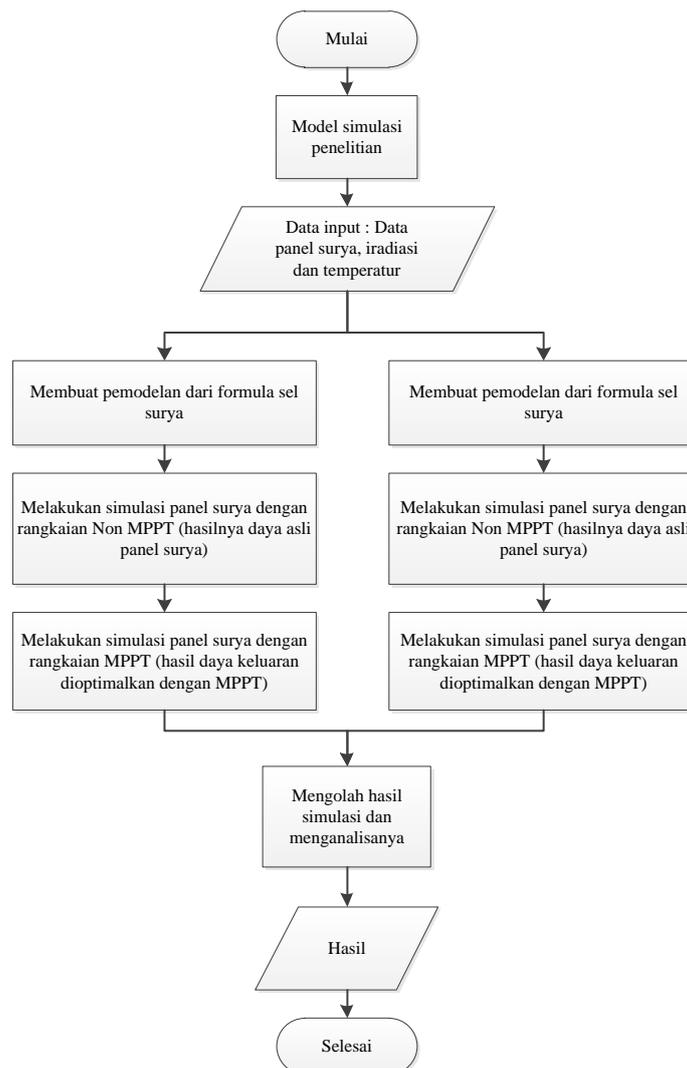
2.2 Diagram Blok Perancangan Sistem

Pembangunan sistem simulasi panel surya melibatkan pelacakan titik daya maksimum dan pemodelan matematis panel surya. Perangkat lunak digunakan untuk mereplikasi setiap aspek arsitektur sistem ini, termasuk melacak titik daya maksimum dan mensimulasikan panel surya. Kemampuan simulink Matlab R2018a digunakan dalam desain simulasi. Model diagram blok perancangan sistem simulasi penelitian terlihat seperti Gambar 3.



Gambar 3 Diagram blok perancangan simulasi panel surya

Selanjutnya pada Gambar 4 di bawah ini merupakan *flowchart* yang menjelaskan mengenai langkah-langkah dari penelitian yang akan dilakukan untuk mewujudkan penelitian ini.



Gambar 4. Diagram alur penelitian (*flowchart*)

2.3 Data Penelitian

Untuk lokasi pengambilan data di Kota Semarang, penelitian ini menggunakan pengukuran suhu dan radiasi sebagai masukan untuk percobaan yang akan dilakukan. Pengambilan data nilai suhu dilakukan melalui aplikasi *smartphone* pada Minggu, 19 November 2023 di lokasi pengumpulan di Kota Semarang. Data suhu dikumpulkan melalui situs *Indonesia Solar Maps* [11]. Hasilnya ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data iradiasi dan temperatur

No.	Waktu (Jam)	Temperatur (°C)	Iradiasi (W/m ²)
1.	07.00	29	189,5
2.	08.00	30	347,1
3.	09.00	32	485,7
4.	10.00	33	564,5
5.	11.00	35	699,3
6.	12.00	34	606,3
7.	13.00	33	558,5
8.	14.00	32	411,4
9.	15.00	31	251,8
10.	16.00	30	116,7
11.	17.00	29	29,1

Berikut ini data parameter dari panel surya yang akan digunakan dalam penelitian ini antara lain dapat dilihat dalam Tabel 2.

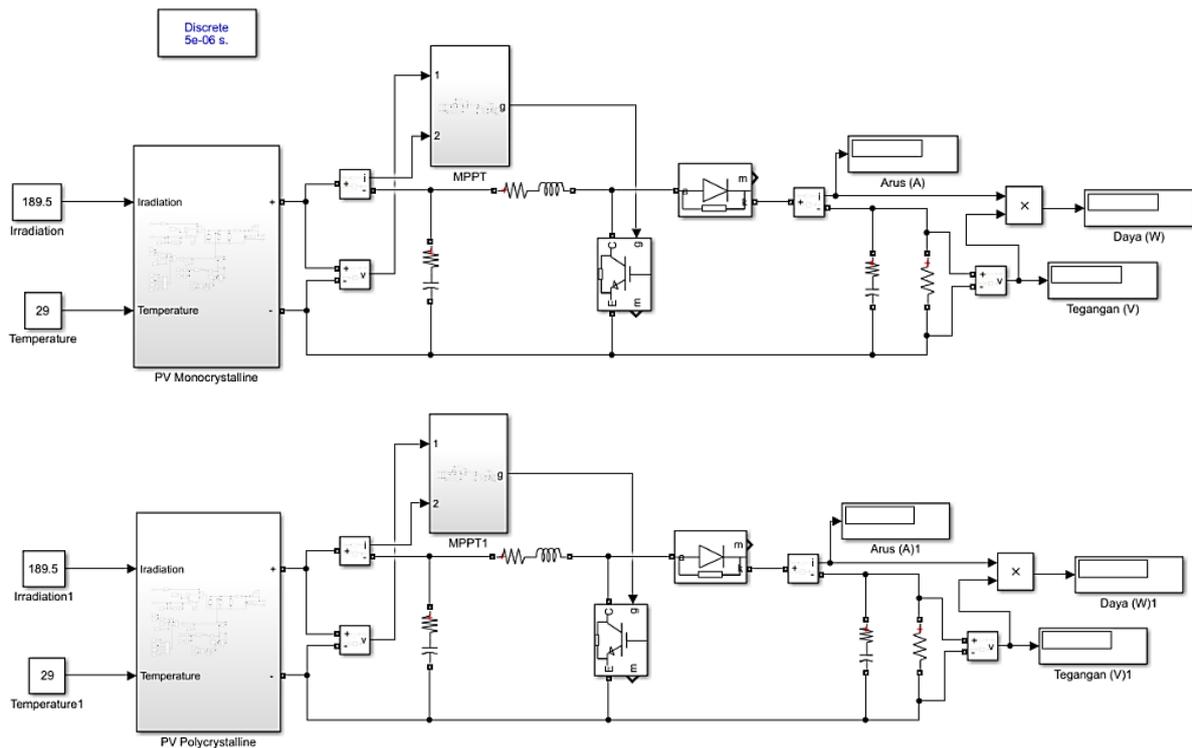
Tabel 2. Parameter dari *data sheet* panel surya

No.	Parameter	Panel Surya <i>Monocrystalline</i>		Panel Surya <i>Polycrystalline</i>	
1.	Daya maksimal (P_{max})	100 W	250 W	100 W	250 W
2.	Tegangan maksimal (V_{mp})	18.1 V	30.3 V	17.8 V	36,4 V
3.	Arus maksimal (I_{mp})	5.54 A	8.25 A	5.62 A	6,88 A
4.	Tegangan <i>open circuit</i> (V_{oc})	22.2 V	36.3 A	22.4 V	44,8 V
5.	Arus <i>short circuit</i> (I_{sc})	6.00 A	8.75 A	5.95 A	7,35 A
6.	Jumlah sel	72 Sel	60 Sel	36 Sel	72 Sel
7.	Koefisien temperature	0.065	0.06	0.06	0.065

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan persamaan 3 sampai 6 yang sudah dibahas pada halaman sebelumnya dibuat menjadi subsistem pada *simulink* Matlab dengan menggunakan blok-blok yang tersedia pada *library* Matlab maka dihasilkan rangkaian keseluruhan sistem yang dapat dilihat pada Gambar 5.

Untuk memaksimalkan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya, peneliti akan membahas hasil simulasi panel surya pada bab ini. Empat kumpulan data dari dua jenis panel surya *polycrystalline* dan *monocrystalline* dengan kapasitas masing-masing 100W dan 250W digunakan dalam pengujian ini. pengujian menyeluruh terhadap sistem yang dibangun dengan panel surya yang dimasukkan sesuai dengan standar yang telah ditentukan. Eksperimen dengan suhu dan jumlah radiasi yang bervariasi dilakukan di wilayah Kota Semarang selama 11 jam sehari dengan paparan sinar matahari konstan. Informasi tersebut diperoleh dari situs *Indonesia Solar Maps* yang menunjukkan besaran radiasi matahari di suatu wilayah Indonesia [11].



Gambar 5. Rangkaian keseluruhan sistem

3.1 Hasil Simulasi Panel Surya Berkapasitas 100 W

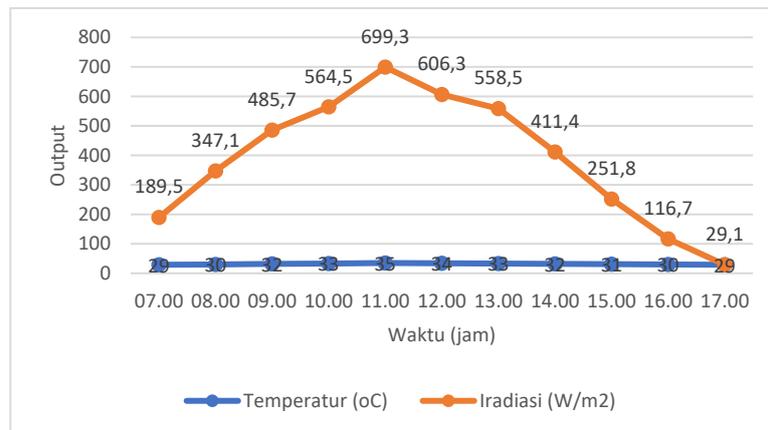
Pada pengujian pertama ini menggunakan panel surya jenis *monocrystalline* dan *polycrystalline* dengan kapasitas daya masing-masing adalah 100 watt, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil simulasi panel surya berkapasitas 100 W

Waktu (Jam)	<i>Monocrystalline</i> 100W			<i>Polycrystalline</i> 100W		
	Ppv Non MPPT(W)	P MPPT (W)	Persen (%)	Ppv Non MPPT(W)	P MPPT (W)	Persen (%)
07.00	3,6	4	11%	3,5	3,8	9%
08.00	13,5	15,8	17%	12,8	15	17%
09.00	31,9	38,2	20%	29,9	35,6	19%
10.00	47	56,7	21%	43,8	50,9	16%
11.00	85	103,3	22%	78,2	94,4	21%
12.00	58,9	71,3	21%	54,7	63,4	16%
13.00	46	55,5	21%	42,9	50	17%
14.00	22,9	27,2	19%	21,4	25,4	19%
15.00	7,8	9	15%	7,4	8,5	15%
16.00	1,5	1,6	7%	1,4	1,5	7%
17.00	0,09	0,04	-56%	0,08	0,03	-63%
Total	318,19	382,64		296,08	348,53	
X	28,9	34,78	11%	26,9	31,7	8%

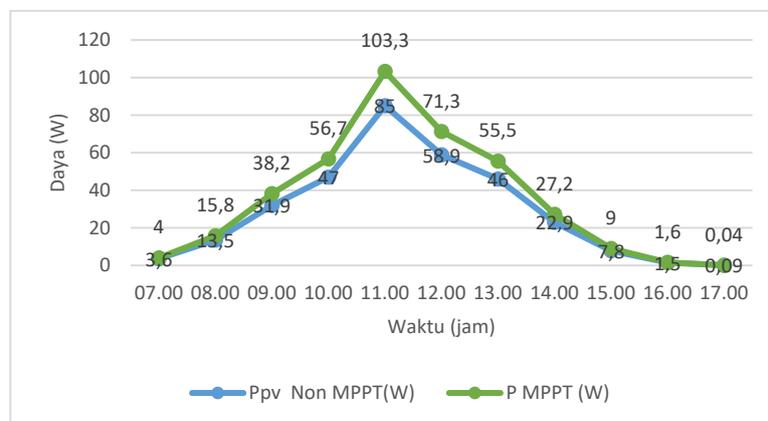
Berdasarkan Tabel 3 ditampilkan perbandingan persentase kenaikan hasil pengukuran daya sebelum dan setelah menggunakan MPPT yang dihasilkan oleh panel surya *monocrystalline* dengan *polycrystalline*. Hasil tersebut adalah sebagai berikut pada panel surya *monocrystalline* dengan kapasitas 100Watt, rata-rata daya yang dihasilkan pada waktu kurang lebih satu hari yaitu 28,9 Watt dan 26,9 Watt untuk *polycrystalline*. Kemudian pada saat panel surya menggunakan MPPT terdapat kenaikan jumlah rata-rata daya yang dihasilkan yakni menjadi 34,78 Watt untuk *monocrystalline* dan 31,7 Watt untuk *polycrystalline*. Dengan rata-rata persentase

peningkatan daya sebesar 11% untuk *monocrystalline* dan 8 % untuk *polycrystalline*, hasil ini menjelaskan bahwa persentase peningkatan daya untuk panel *monocrystalline* lebih unggul 3 % dibanding *polycrystalline*.

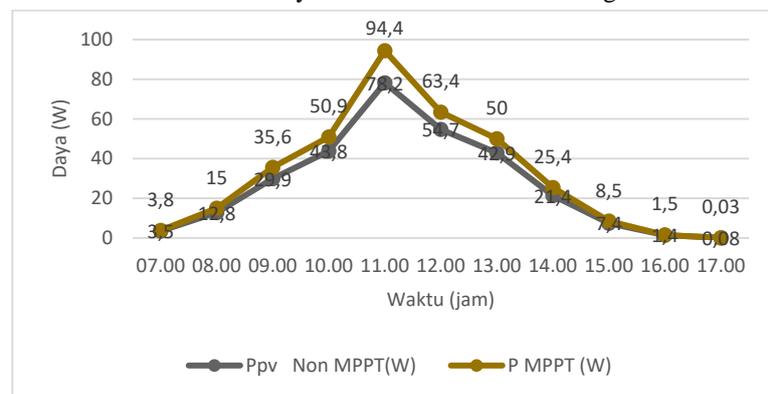


Gambar 5. Grafik waktu terhadap *output* (iradiasi dan temperatur)

Dalam pengujian ini menggunakan nilai iradiasi dan temperatur sebagai nilai inputan dalam program atau pengujian panel surya. Pada spesifikasi *name plate* panel surya untuk nilai iradiasi maksimum sebesar 1.000 W/m² dengan suhu dititik 25 °C [12]. Oleh karena itu dilakukan pengamatan data tingkat iradiasi sinar matahari dan juga temperatur yang diambil dari *website* Indonesia *solar maps* berdasarkan tenggat waktu dalam jam, dari Gambar 5 bisa dilihat bahwasanya pada kondisi pagi hari di jam 07.00 dengan tingkat temperatur dititik 29°C dan iradiasi sinar matahari yang terpancar sebesar 189,5 W/m². Nilai iradiasi ini terus naik setiap jamnya bersamaan dengan naiknya nilai temperatur lingkungan sekitar, dimana pada pengukuran kali ini nilai puncak iradiasi berada dititik 699,3 W/m² dengan temperatur 35°C di jam 11.00. Seiring dengan berputarnya angka jarum jam mengarah pada waktu siang menjelang sore hari, nilai iradiasi pun berangsur-angsur turun diikuti dengan temperatur lingkungan. Pada jam 17.00 merupakan titik terendah dari pancaran iradiasi matahari yang mana besarnya nilainya 29,1 W/m² dengan temperatur sebesar 29°C.



Gambar 6. Grafik daya mono non MPPT dan dengan MPPT



Gambar 7. Grafik daya *poly* non-MPPT dan dengan MPPT

Pada Gambar 6 dan 7 hasil pengukuran daya yang dihasilkan panel surya *monocrystalline* dan *polycrystalline* sebelum menggunakan MPPT, di mana daya keluarannya lebih rendah dibandingkan daya setelah MPPT. Nilai pengukuran daya maksimum untuk panel surya *monocrystalline* dan *polycrystalline* yang diukur tanpa menggunakan MPPT masing-masing adalah 85 W dan 78,2 W, hasil ini merupakan daya keluaran langsung dari panel surya. Kemudian, setelah serangkaian panel surya menggunakan MPPT, pada pukul 11 siang, dengan tingkat penyinaran 699,3 W/m² dan suhu 35°C, temuan menunjukkan bahwa panel surya *monocrystalline* menghasilkan 103,3 W dan panel surya *polycrystalline* menghasilkan 94,4 W. Hasil ini meningkat karena kerja dari MPPT yang dipasangkan pada rangkaian daya keluaran yang dioptimalkan oleh MPPT sehingga daya keluaran panel mencapai titik optimumnya.

Output daya terendah yang dapat dihasilkan panel surya tanpa menggunakan MPPT adalah 0,08 W untuk panel surya *polycrystalline* dan 0,09 W untuk panel surya *monocrystalline*. Setelah suksesi panel surya menggunakan MPPT, hasil ini menurun. Pada pukul 17.00 dengan tingkat penyinaran 29,1 W/m² dan suhu 29 °C diperoleh hasil 0,04 W untuk panel surya *monocrystalline* dan 0,03 W untuk panel surya *polycrystalline*. Jelas dari temuan perbandingan bahwa panel surya *monocrystalline* jauh lebih baik daripada panel surya *polycrystalline*. Listrik yang dihasilkan oleh panel surya dapat mencapai nilai maksimalnya, sesuai dengan temuan simulasi panel surya menggunakan MPPT dengan algoritma P&O.

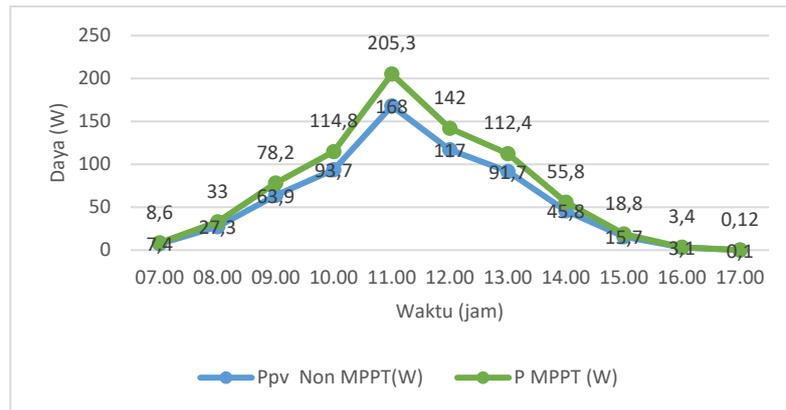
3.2 Hasil Simulasi Panel Surya Berkapasitas 250 W

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4, panel surya *monocrystalline* dan *polycrystalline* 250 watt digunakan dalam pengujian kedua ini.

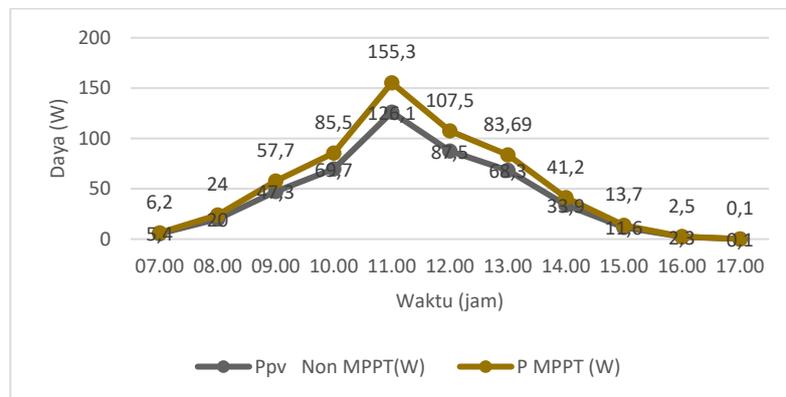
Tabel 4. Hasil simulasi panel surya berkapasitas 250 W

Waktu (Jam)	<i>Monocrystalline</i> 250W			<i>Polycrystalline</i> 250W		
	Ppv Non MPPT (W)	P MPPT (W)	Persen (%)	Ppv Non MPPT (W)	P MPPT (W)	Persen (%)
07.00	7,4	8,6	16%	5,4	6,2	15%
08.00	27,3	33	21%	20	24	20%
09.00	63,9	78,2	22%	47,3	57,7	22%
10.00	93,7	114,8	23%	69,7	85,5	23%
11.00	168	205,3	22%	126,1	155,3	23%
12.00	117	142	21%	87,5	107,5	23%
13.00	91,7	112,4	23%	68,3	83,69	23%
14.00	45,8	55,8	22%	33,9	41,2	22%
15.00	15,7	18,8	20%	11,6	13,7	18%
16.00	3,1	3,4	10%	2,3	2,5	9%
17.00	0,1	0,12	20%	0,1	0,1	0%
Total	633,7	772,42		472,2	577,39	
X	57,6	70,2	20%	42,9	52,5	18%

Berdasarkan Tabel 4 ditampilkan perbandingan persentase kenaikan hasil pengukuran daya sebelum dan setelah menggunakan MPPT yang dihasilkan oleh panel surya *monocrystalline* dengan *polycrystalline*. Hasil tersebut adalah sebagai berikut pada panel surya *monocrystalline* dengan kapasitas 250Watt, rata-rata daya yang dihasilkan pada waktu kurang lebih satu hari yaitu 57,6 Watt dan 42,9 Watt untuk *polycrystalline*. Kemudian pada saat masing-masing panel surya menggunakan MPPT terdapat kenaikan jumlah rata-rata daya yang dihasilkan yakni menjadi 70,2 Watt untuk *monocrystalline* dan 52,5 Watt untuk *polycrystalline*. Dengan rata-rata persentase peningkatan daya sebesar 20% untuk *monocrystalline* dan 18% untuk *polycrystalline*, hasil ini menjelaskan bahwa persentase peningkatan daya untuk panel *monocrystalline* dan *polycrystalline* sama namun lebih unggul *monocrystalline* keluaran dayanya dibanding *polycrystalline*.



Gambar 8. Grafik daya mono non-MPPT dan dengan MPPT



Gambar 9. Grafik daya poly non-MPPT dan dengan MPPT

Temuan pengukuran daya panel surya tanpa menggunakan MPPT ditampilkan pada Gambar 8 dan 9, di mana daya keluarannya lebih kecil 22,2% dibandingkan dengan panel surya yang menggunakan MPPT. Nilai pengukuran daya maksimum panel surya *monocrystalline* dan *polycrystalline* yang diukur tanpa menggunakan MPPT masing-masing adalah 168 dan 126,1 watt. Setelah suksesi panel surya menggunakan MPPT, temuan ini meningkat pada pukul 11.00 dengan tingkat penyinaran $699,3 \text{ W/m}^2$ diperoleh panel surya *monocrystalline* menghasilkan daya 205,3 Watt dan panel surya *polycrystalline* menghasilkan daya 155,3 Watt.

Untuk panel surya *monocrystalline* dan *polycrystalline* masing-masing nilai daya terendah yang dihasilkan panel surya tanpa penggunaan MPPT adalah 0,1 Watt. Menyusul serangkaian panel surya yang menggunakan MPPT, temuan ini meningkat. Pada pukul 17.00 dengan tingkat penyinaran $29,1 \text{ W/m}^2$, panel surya *monocrystalline* memberikan hasil sebesar 0,12 Watt dan panel surya *polycrystalline* menghasilkan 0,1 Watt. Terlihat jelas dari temuan perbandingan bahwa panel surya *monocrystalline* memiliki kinerja yang jauh lebih baik yaitu sekitar 24,36% dibandingkan panel surya *polycrystalline* dalam skenario langit mendung dan cerah. Selain itu, daya yang dihasilkan panel surya dapat dioptimalkan dengan menggunakan MPPT bersama dengan algoritma P&O.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang diambil dari seluruh hasil simulasi yang dijalankan, berdasarkan hasil yang diperoleh pada analisis dan pembahasan bab sebelumnya adalah panel surya dapat menghasilkan daya sebesar 85 watt pada nilai iradiasi $699,2 \text{ W/m}^2$, dan 0,09 watt dengan nilai iradiasi $29,1 \text{ W/m}^2$. Oleh karena itu, daya yang dihasilkan oleh panel surya meningkat seiring dengan meningkatnya nilai iradiasi dan sebaliknya. Kemudian berdasarkan hasil pengujian bahwa penggunaan MPPT dengan algoritma P&O dapat meningkatkan daya rata-rata sebesar 11 % untuk kapasitas 100 watt dan 20% untuk kapasitas 250 watt dibandingkan dengan tanpa menggunakan MPPT. Hasil keluaran daya panel surya dengan kapasitas 100 watt jenis *monocrystalline* menghasilkan daya rata-rata sebesar 28,9 watt sementara dengan kapasitas 250 watt menghasilkan daya rata-rata 57,6 watt, sedangkan untuk *polycrystalline* menghasilkan daya rata-rata sebesar 26,9 watt dan 42,9 watt. Dengan demikian dapat diketahui bahwa *monocrystalline* lebih tinggi dalam menghasilkan daya keluaran yaitu sekitar 25% dibandingkan *polycrystalline*.

REFERENSI

- [1] I. N. Suastaka, I. G. Mahardika, M. S. Mahendra, "Analisis Perputaran Radiasi Surya Terhadap Kinerja Sel Fotolistrik Sebagai Energi Ramah Lingkungan Di Nusa Penida Kabupaten Klungkung Provinsi Bali," *ECOTROPIC Jurnal Ilmu Lingkungan (Journal Environment Science)*, vol. 9, no. 1, hal. 46, 2018. <http://dx.doi.org/10.24843/ejes.2018.v09.i01.p06>
- [2] W. Nugroho, A. Nugroho, "Listrik Tenaga Surya Di Gedung Fakultas Psikologi Universitas Diponegoro," *Transient*, vol. 9, no. 2, hal. 181–188, 2019. <https://doi.org/10.14710/transient.v9i2.181-188>
- [3] M. Gradella Villalva, J. Rafael Gazoli, E. Ruppert Filho, "Modeling and Circuit-based Simulation Of Photovoltaic Arrays," *Eletrônica de Potência*, vol. 14, no. 1, hal. 35–45, 2018. <https://doi.org/10.18618/rep.2018.1.035045>
- [4] M. Z. Rois, R. F. Lestari, B. S. Kaloko, A. Mulyadi, "Maximum Power Point Tracking (MPPT) sebagai Pelacak Daya Puncak pada Panel Surya untuk Optimasi Pengisian Baterai," *Jurnal Arus Elektro Indonesia*, vol. 8, no. 2, hal. 56, 2022. <https://doi.org/10.19184/jaei.v8i2.32586>
- [5] Usman, A. R. Idris, Sofyan, I. Syamsuddin, "Pemodelan dan Simulasi Photovoltaic Menggunakan Pendekatan Model Tiga Diode," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 9, no. 4, hal. 423–429, 2020. <http://dx.doi.org/10.22146/jnteti.v9i4.688>
- [6] A. R. Olawale, S. Shodiya, Y. H. Ngadda, "Mathematical Modeling of Solar Photovoltaic Module to generate Maximum Power Using Matlab/Simulink," *The International Journal of Applied Technology Research (IJATR)*, vol. 2, no. 1, hal. 1–11, 2021. <http://dx.doi.org/10.35313/ijatr.v2i1.46>
- [7] U. Muhammadiyah Sidoarjo, A. Junaidi, D. Keumala Sari, "Model and Analysis of Photovoltaic Modules with Irradiation and Temperature Variations using Simulation Technology Model dan Analisis Modul Photovoltaic dengan Variasi Iradiasi dan Temperatur menggunakan Teknologi Simulasi," *Seminar Nasional Fakultas Sains dan Teknologi*, vol. 4, hal. 1–7, 2023.
- [8] G. B. Sitanggang, T. Andromeda, E. W. Sinuraya, "Perancangan Kontrol Mppt Dengan Metode P&O Pada Sistem Pv Di Gedung Teknik Sipil Universitas Diponegoro," *Transient*, vol. 10, no. 1, hal. 222–228, 2021. <https://doi.org/10.14710/transient.v10i1.222-228>
- [9] A. H. Sangaji, T. Rijanto, "Maximum Power Point Tracking (MPPT) Menggunakan Metode Artificial Neural Network untuk Panel Surya," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 7, hal. 85–92, 2018.
- [10] M. Anggara, W. Saputra, "Analisis Kinerja Sel Surya Monocrystalline dan Polycrystalline di Kabupaten Sumbawa NTB," *Jurnal Flywheel*, vol. 14, no. 1, hal. 7–12, 2023. <http://dx.doi.org/10.36040/flywheel.v14i1.6521>
- [11] H. Mariana, "Asosiasi Energi Surya Indonesia (AESI) meluncurkan platform data radiasi matahari. Peluncuran dikemas dalam kajian bertajuk 'Hosting Capacity PLTS di Jawa-Madura-Bali,'" *KOMPAS.com*, 17 Juni 2022, diakses 19 November 2023.
- [12] M. Syahwil, N. Kadir, "Rancang Bangun Modul Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Sistem Off-grid Sebagai Alat Penunjang Praktikum di Laboratorium," *Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pendidikan*, vol. 3, no. 1, hal. 26–35, 2021. <http://dx.doi.org/10.14710/jplp.3.1.26-35>