

ANALISIS PENGARUH KENAIKAN TEMPERATUR DAN VARIASI IRRADIASI PADA TEGANGAN, ARUS DAN DAYA KELUARAN PHOTOVOLTAIC JENIS MONOCRYSTALLINE

Faishal Fuad Rahman Soeharto^{*)}, Hermawan, and Agung Nugroho

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: faishalfuadr@gmail.com

Abstrak

Sel photovoltaic membutuhkan energi foton dalam cahaya untuk melakukan proses konversi energi, energi foton tersebut dapat berasal dari irradiasi sinar matahari. Energi foton dari sinar matahari tersebut datangnya bersamaan dengan panas yang dapat menyebabkan kenaikan temperatur dari sel photovoltaic. Untuk setiap kenaikan 1° C dapat menyebabkan sel photovoltaic mengalami penurunan tegangan setiap selnya. Pada penelitian kali ini, akan dibahas mengenai analisis pengaruh kenaikan temperatur dan variasi irradiasi pada photovoltaic jenis monocrystalline dengan membuat simulasi dan modul percobaan. Hasil pengujian membuktikan bahwa kenaikan temperatur sel dari 27 °C sampai 80 °C dapat menurunkan tegangan keluaran dari sel photovoltaic sebesar 4,21 V, sehingga mempengaruhi daya keluaran sel, yang turun sampai 0,7523 Watt. Semakin besar nilai irradiasi yang diterima sel yaitu pada 1000 W/m², dapat menghasilkan daya keluaran sel yang semakin besar pada temperatur yang sama, karena mendapatkan energi foton yang lebih banyak.

Kata kunci: sel photovoltaic, monocrystalline, temperatur sel, irradiasi

Abstract

Photovoltaic cell requires energy photons in light for energy conversion process, the photon energy comes from solar irradiation. Energy photons absorbed from sunlight along with heat that can lead to increasing temperature of photovoltaic cells. For every increment of 1 ° C causes photovoltaic cell decreasing voltage of each cell. This study demonstrates the analysis from the effect of rising temperatures and variations of irradiation on the photovoltaic type monocrystalline modules to create simulations and module experiments. The test result proves that the increment cell temperature of 27° C to 80 ° C can reduce the output voltage of the photovoltaic cell at 4,21 V, thereby affecting the power output of the cell, which decreases up to 0,7523 Watt. Greater value of irradiation received cell at 1000W / m², can produce greater output power cells growing at the same temperature, because it gets more energy photons.

Keywords: photovoltaic cells, monocrystalline, temperature cell, irradiance

1. Pendahuluan

Teknologi sel *photovoltaic* sudah saatnya dikembangkan untuk memenuhi target bauran Energi Baru Terbarukan tahun 2025 sebesar 17% sesuai dengan PP No. 5 tahun 2006 [1]. Sel *photovoltaic* terbuat dari bahan semikonduktor yaitu silikon atau germanium (*p-n junction*). Sel ini membutuhkan cahaya yang berasal dari irradiasi matahari yang membawa energi foton untuk merubah energi cahaya menjadi energi listrik. Hal tersebut berbeda dengan *solar heater* yang membutuhkan energi panas/termal dari sinar matahari yang biasanya digunakan untuk proses pengeringan atau memanaskan air [2]. Untuk setiap kenaikan 1° C dapat menyebabkan

tegangan sel *photovoltaic* turun sebesar 2,3 mV untuk setiap sel [3].

Matahari sebagai benda hitam, didalamnya terjadi proses fusi atom hidrogen menjadi helium yang menghasilkan energi kalor [4]. Jika dipanaskan terus, benda hitam akan memancarkan radiasi kalor yang puncak spektrumnya memberikan warna cahaya. Warna cahaya ini bergantung pada panjang gelombang yang akan bergeser sesuai suhu benda [5]. Sehingga dapat dipastikan adanya cahaya bersamaan dengan adanya panas. Panas tersebut yang dapat menyebabkan kenaikan temperatur dari sel, selain itu kondisi lingkungan yang panas juga dapat menaikkan temperatur dari sel *photovoltaic*. Kondisi negara dengan letak di jalur khatulistiwa dengan 2 musim membawa

manfaat maupun kerugian, manfaat yang didapat adalah energi matahari bersinar sepanjang tahun, sehingga didapatkan energi yang lebih besar, tetapi dengan nilai temperatur lingkungan rata-rata akan lebih tinggi, dibandingkan dengan negara 4 musim [6], yang dapat menaikkan temperatur sel *photovoltaic*.

2. Metode

2.1. Simulasi

Langkah pertama dalam simulasi ini adalah menghitung nilai *bandgap* (celah antara pita valensi an pita konduksi) terhadap kenaikan temperatur, dengan persamaan [7]:

$$E_g(T) = E_g(300K) + \frac{dE_g}{dT}(T - 300K) \quad (1.1)$$

dengan :

$E_g(300K)$ = *bandgap* saat temperatur 300 K (1,1 eV)

T = temperatur sel *photovoltaic* (K)

Setelah menghitung nilai *bandgap*, kemudian diteruskan dengan menghitung nilai I_{sc} , I_o serta V_{oc} dai setiap sel *photovoltaic* dengan membuat simulink software MATLAB [8].

$$I_{sc} = \frac{G}{1000} [(I_{SCR} + K_i(T_c - T_r))] \quad (1.2)$$

$$I_{or} = \frac{I_{scr}}{[Exp(\frac{qV_{oc}}{nKT_r}) - 1]} \quad (1.3)$$

$$I_o = I_{or} \left[\frac{T_c}{T_r} \right]^3 exp \left[\frac{qE_g}{nK} \left\{ \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right\} \right] \quad (1.4)$$

$$V_{oc} = \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1 \right) \left(\frac{nKT_c}{q} \right) \quad (1.5)$$

dengan :

G = irradiansi yang diterima sel *photovoltaic* (W/m²)

I_{scr} = arus hubung singkat sel saat T referensi (A)

K_i = temperatur *coefficient* (A/K)

n = faktor ideal diode (antara 1 dan 2)

T_r = temperatur referensi, 298.15 (°K)

V_{ocr} = tegangan *open circuit* saat T_r (V)

I_{scr} = arus *short circuit* saat T_r (A)

E_g = *bandgap* (eV)

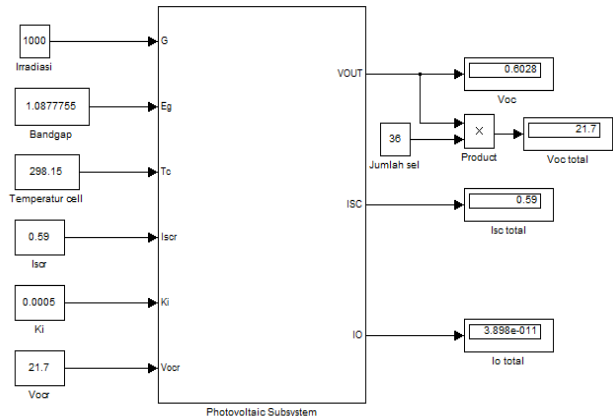
I_{or} = arus saturasi saat T_r (A)

T_c = temperatur sel (°K)

Pada tabel 1 dapat dilihat bahwa ketika temperatur mengalami kenaikan, membuat nilai *bandgap* menurun, *bandgap* yang menurun tersebut menyebabkan jarak antara pita valensi dan konduksi menyempit, yang menyebabkan nilai dari arus saturasi diode (I_o) meningkat akibat dari banyaknya elektron yang dapat melewati *bandgap* yang mengecil [7].

Selain itu juga terjadi kenaikan eksitasi termal yang berpengaruh pada pembawa muatan elektron intrinsik (ni) yang meningkat [9][10]. Sedangkan kenaikan arus *short*

circuit (I_{sc}) disebabkan oleh kenaikan dari temperatur sel (T_c) [8]. Karena kenaikan arus saturasi diode (I_o) dan kenaikan arus *short circuit* (I_{sc}) tersebut menyebabkan penurunan tegangan V_{oc} karena V_{oc} dengan I_{sc} dan I_o berbanding terbalik [11]. Penurunan V_{oc} ini menyebabkan penurunan daya maksimum dari sel *photovoltaic* (P_m) karena penurunan V_{oc} terjadi lebih besar daripada kenaikan I_{sc} dan I_o [12].



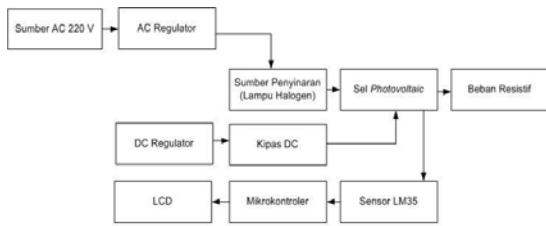
Gambar 1. Simulasi matlab untuk sistem *photovoltaic*

Tabel 1. Data sistem sel *photovoltaic* hasil simulasi

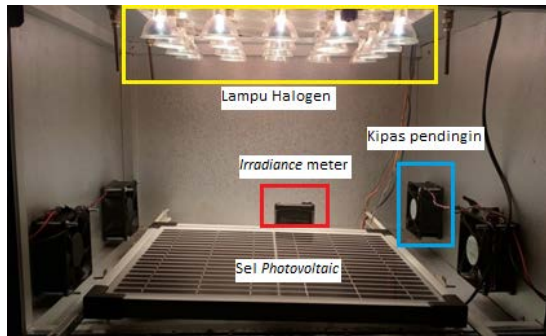
T (°C)	Eg (Ev)	Voc (V)	Voc	Isc (A)	Io (A)	Pm
25	1,100	0,603	21,70	0,590	3,89800E-11	10,08
27	1,100	0,599	21,56	0,591	5,28900E-11	10,03
30	1,099	0,593	21,36	0,593	8,29300E-11	9,96
35	1,098	0,584	21,02	0,595	1,72100E-10	9,84
40	1,097	0,574	20,67	0,598	3,48500E-10	9,72
45	1,096	0,565	20,33	0,600	6,90000E-10	9,60
50	1,095	0,555	19,99	0,603	1,35400E-09	9,48
55	1,094	0,546	19,66	0,605	2,53600E-09	9,36
60	1,092	0,537	19,32	0,608	4,71700E-09	9,24
65	1,091	0,527	18,98	0,610	8,60700E-09	9,11
70	1,090	0,518	18,64	0,613	1,54200E-08	8,99
75	1,089	0,509	18,31	0,615	2,71600E-08	8,86
80	1,088	0,499	17,97	0,618	4,70500E-08	8,73

2.2. Perancangan perangkat keras

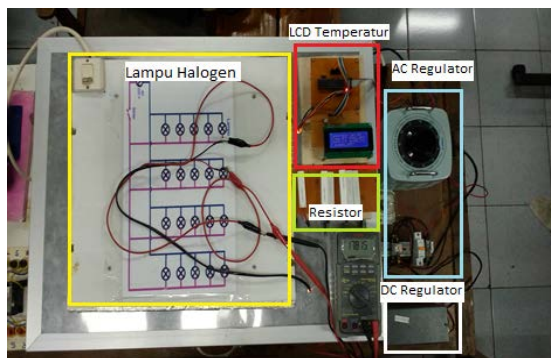
Pada penelitian ini, modul percobaan digunakan untuk melakukan pengambilan data. Modul ini terdiri dari satu buah sel *photovoltaic*, kemudian rangkaian mikrokontroler dan sensor LM35 yang digunakan untuk mengukur temperatur. Lampu halogen digunakan sebagai simulasi matahari, karena memiliki spektrum yang hamper sama [13] [14], kipas DC 2 A sebagai pendingin, beban resistif, AC regulator untuk mengatur tingkat irradiansi dari lampu peninaran, dan DC regulator untuk menyalakan kipas pendingin. Alat pengukuran berupa multimeter dan tangampere, semua komponen alat tersebut kemudian dirakit ke dalam sebuah *box* alumunium sebagai tempat ujicoba.



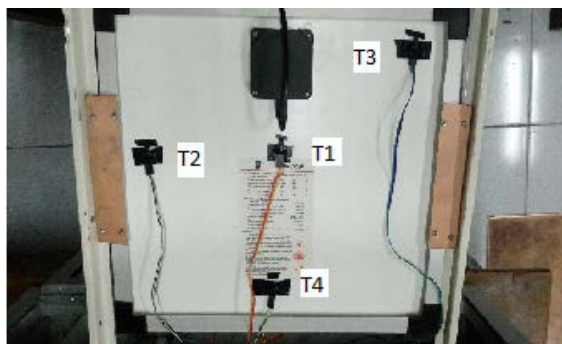
Gambar 2. Blok diagram perangkat keras



Gambar 3. Modul tampak dari dalam



Gambar 4. Modul tampak dari luar



Gambar 5. Pemasangan sensor temperatur sesuai IEC 60891:2009 [15]

3. Hasil dan Analisa

Pengujian yang dilakukan adalah pengujian tanpa beban dan dengan beban, dimana yang akan diukur adalah nilai

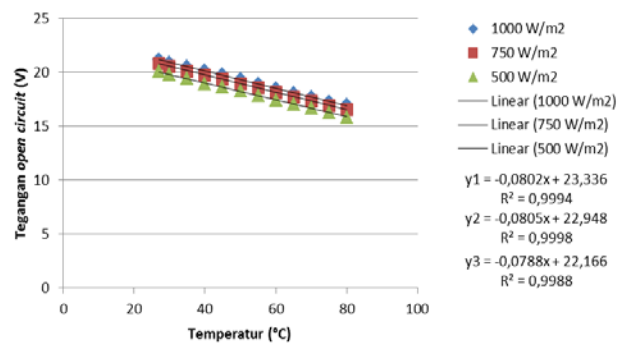
tegangan *open circuit* (V_{oc}), arus *short circuit* (I_{sc}), tegangan (V), arus (A) dan temperatur sel *photovoltaic* ($^{\circ}C$). Hasil perkalian V_{oc} dan I_{sc} disebut daya maksimum (P_m), daya maksimum yaitu daya maksimal yang dapat dikeluarkan sel *photovoltaic*.

Pengukuran menggunakan multimeter dan tangampere, dengan variasi irradiansi yaitu sebesar 1000 W/m^2 , 750 W/m^2 , dan 500 W/m^2 . Pengambilan data tegangan dan arus dilakukan pada nilai temperatur yaitu mulai $27 \text{ }^{\circ}C$ sampai $80 \text{ }^{\circ}C$, dengan selisih 3 atau $5 \text{ }^{\circ}C$ setiap kenaikannya. Spesifikasi sel *photovoltaic* yang digunakan adalah P: 10 Watt, V_{oc} : 21,7 V, I_{sc} : 0,59 A, V_{mp} : 18 V, I_{mp} : 0,56 A, dalam kondisi STC (*standar test condition*) 1000 W/m^2 , dan temperatur sel sebesar $25 \text{ }^{\circ}C$. Pengujian dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Listrik dan Sistem Tenaga. Pada percobaan pertama dilakukan dalam kondisi tidak berbeban dengan variasi irradiansi dan temperatur.

3.1. Percobaan tanpa beban dan *short circuit*

Tabel 2. Data hasil percobaan tegangan *open circuit* (V_{oc})

Temperatur ($^{\circ}C$)	V_{oc} (V) pada irradiansi 1000 W/m^2	V_{oc} (V) pada irradiansi 750 W/m^2	V_{oc} (V) pada irradiansi 500 W/m^2
27	21,16	20,81	20,08
30	20,89	20,52	19,78
35	20,53	20,1	19,41
40	20,14	19,7	18,89
45	19,76	19,33	18,66
50	19,38	18,93	18,28
55	18,96	18,55	17,87
60	18,52	18,12	17,42
65	18,06	17,73	17,07
70	17,73	17,31	16,65
75	17,29	16,89	16,25
80	16,95	16,51	15,84



Gambar 6. Grafik V_{oc} terhadap irradiansi dan temperatur

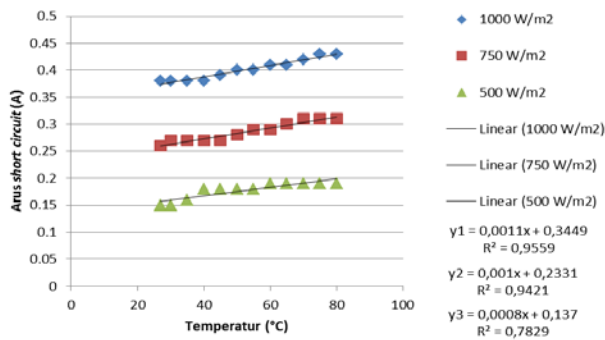
Pada kondisi tanpa beban nilai tegangan yang diukur adalah tegangan *open circuit* (V_{oc}) yang memungkinkan tegangan mencapai nilai puncak yaitu sebesar 21,16 V pada irradiansi 1000 W/m^2 , kemudian 20,81 V pada irradiansi 750 W/m^2 , dan 20,08 V pada irradiansi 500 W/m^2

W/m². Pada temperatur tertinggi yaitu 80 °C nilai tegangan turun, yaitu 16,95 V pada irradiansi 1000 W/m², kemudian 16,51 V pada irradiansi 750 W/m², dan 15,84 V pada irradiansi 500 W/m². Kondisi puncak terjadi pada kondisi dimulainya variasi yaitu pada temperatur 27 °C irradiansi 1000 W/m².

Penurunan nilai tegangan tersebut sudah sesuai dengan teori, diakibatkan oleh nilai dari *bandgap* yang menurun akibat dari kenaikan temperatur, penurunan nilai *bandgap* ini menyebabkan jarak antara pita valensi (*n-type*) dan konduksi (*p-type*) menyempit, memungkinkan lebih banyak elektron untuk bergerak ke arah pita konduksi menyebabkan naiknya arus saturasi dioda (*I_o*). Kenaikan temperatur juga menyebabkan eksitasi termal yang membuat pembawa muatan intrinsik meningkat sehingga arus saturasi (*I_o*) naik, ketika *I_o* naik, menyebabkan tegangan *open circuit* (*V_{oc}*) turun.

Tabel 3. Data hasil percobaan arus *short circuit* (*I_{sc}*)

Temperatur (°C)	Isc (V) pada irradiansi 1000W/m2	Isc (V) pada irradiansi 750W/m2	Isc (V) pada irradiansi 500W/m2
27	0,38	0,26	0,15
30	0,38	0,27	0,15
35	0,38	0,27	0,16
40	0,38	0,27	0,18
45	0,39	0,27	0,18
50	0,4	0,28	0,18
55	0,4	0,29	0,18
60	0,41	0,29	0,19
65	0,41	0,3	0,19
70	0,42	0,31	0,19
75	0,43	0,31	0,19
80	0,43	0,31	0,19



Gambar 7. Grafik *I_{sc}* terhadap irradiansi dan temperatur

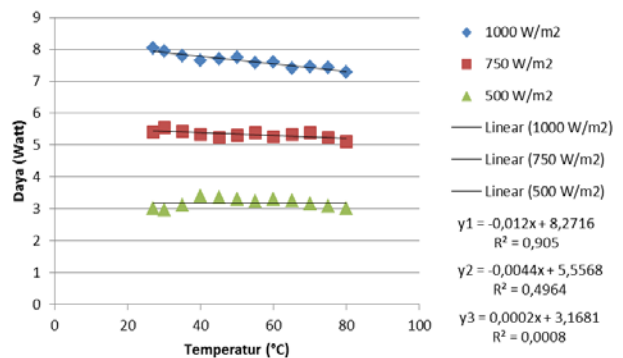
Nilai arus meningkat bersamaan dengan nilai temperatur yang meningkat, pada kondisi tanpa beban nilai arus yang diukur adalah arus *short circuit* (*I_{sc}*) yaitu dengan menghubungkan probe positif dengan negatif secara singkat. Pada temperatur terendah 27 °C, arus yang didapat adalah 0,38 A pada irradiansi 1000 W/m², kemudian 0,25 A pada irradiansi 750 W/m² dan 0,15 A

pada irradiansi 500 W/m², nilai arus meningkat seiring dengan kenaikan nilai temperatur.

Pada temperatur tertinggi yaitu 80 °C nilai arus naik, yaitu 0,43 A pada irradiansi 1000 W/m², kemudian 0,31 A pada irradiansi 750 W/m², dan 0,19 A pada irradiansi 500 W/m². Kenaikan nilai arus tersebut sudah sesuai dengan teori diakibatkan oleh kenaikan dari temperatur sel (*T_c*), dengan melihat persamaan dari rangkaian ekuivalen sel *photovoltaic* [10], dapat dilihat bahwa semakin tinggi nilai temperatur sel (*T_c*) maka nilai arus *short circuit* (*I_{sc}*) akan semakin meningkat.

Tabel 4. Data hasil percobaan daya maksimum (*P_m*)

Temperatur (°C)	Pm (W) pada irradiansi 1000W/m2	Pm (W) pada irradiansi 750W/m2	Pm (W) pada irradiansi 500W/m2
27	8,0408	5,4106	3,012
30	7,9382	5,5404	2,967
35	7,8014	5,427	3,1056
40	7,6532	5,319	3,4002
45	7,7064	5,2191	3,3588
50	7,752	5,3004	3,2904
55	7,584	5,3795	3,2166
60	7,5932	5,2548	3,3098
65	7,4046	5,319	3,2433
70	7,4466	5,3661	3,1635
75	7,4347	5,2359	3,0875
80	7,2885	5,1181	3,0096



Gambar 8. Grafik *P_m* terhadap irradiansi dan temperatur

Pada daya maksimum (*P_m*) ini, dicari dengan mengalikan antara tegangan *open circuit* (*V_{oc}*) dan arus *short circuit* (*I_{sc}*), pada hasil percobaan daya maksimum ini didapati bahwa semakin tinggi nilai temperatur maka nilai daya akan semakin menurun. Titik tertinggi daya maksimum yang dihasilkan yaitu pada temperatur 27 °C yaitu 8,0408 W pada irradiansi 1000 W/m², kemudian 5,2025 W pada irradiansi 750 W/m², dan 3,0120 W pada irradiansi 500 W/m². Pada temperatur 80 °C daya yang dihasilkan menurun, yaitu 7,2885 W pada irradiansi 1000 W/m², kemudian 5,1181 W pada irradiansi 750 W/m², dan 3,0096 W pada irradiansi 500 W/m².

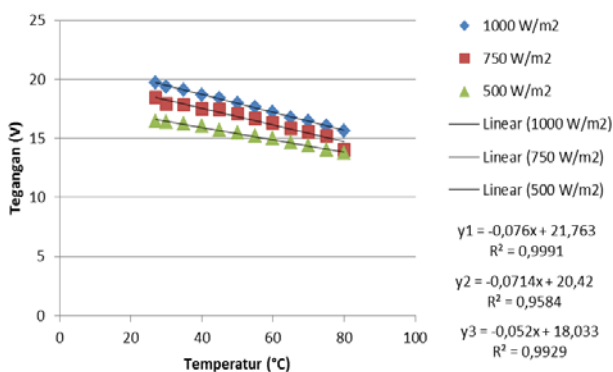
Penurunan daya tersebut diakibatkan nilai tegangan *open circuit* (V_{oc}) lebih besar mengalami penurunan daripada kenaikan arus *short circuit* (I_{sc}), kenaikan arus tidak terlalu signifikan maksimum hanya 0,05 A, berbeda dengan tegangan yang penurunannya dapat mencapai 4,21 V. Menyebabkan daya maksimum secara keseluruhan mengalami penurunan hingga 0,7523 Watt antara daya pada titik T terendah dengan daya di titik T tertinggi pada irradiansi maksimal (1000 W/m^2).

3.2. Percobaan dengan beban
3.2.1. Percobaan dengan beban 140 Ω

Pada percobaan kedua dilakukan dalam kondisi tidak berbeban dengan variasi irradiansi dan temperatur. Pengujian yang pertama dilakukan adalah pengujian dengan beban resistif sebesar 140Ω , kemudian 100Ω , dimana yang akan diukur adalah nilai tegangan (V) dan arus (I). Nilai resistansi tersebut dipilih agar tegangan keluaran cukup besar sehingga mudah diamati.

Tabel 5. Data hasil percobaan V dengan R 140 Ω

Temperatur (°C)	Tegangan (V) pada irradiansi 1000W/m ²	Tegangan (V) pada irradiansi 750W/m ²	Tegangan (V) pada irradiansi 500W/m ²
27	19,73	18,48	16,48
30	19,4	17,94	16,41
35	19,12	17,82	16,25
40	18,71	17,47	16,02
45	18,38	17,41	15,72
50	17,97	17,12	15,52
55	17,63	16,65	15,23
60	17,25	16,31	15,02
65	16,77	15,87	14,65
70	16,45	15,59	14,36
75	16,05	15,21	14,07
80	15,66	14,07	13,79



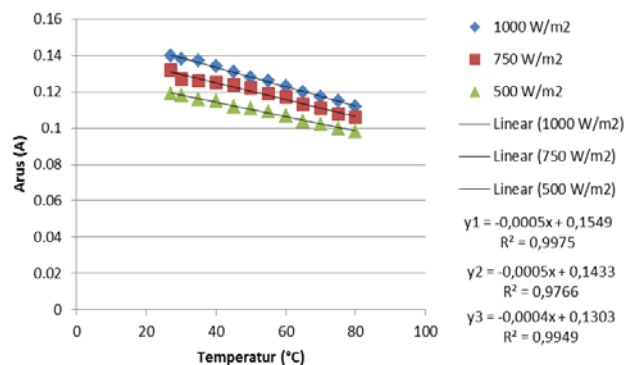
Gambar 9. Grafik V terhadap irradiansi dan temperatur

Pada kondisi dengan beban 140Ω nilai tegangan yang diukur mencapai nilai 19,73 V pada irradiansi 1000 W/m^2 , kemudian 18,48 V pada irradiansi 750 W/m^2 , dan 16,48 V pada irradiansi 500 W/m^2 . Kondisi tersebut terjadi pada kondisi temperatur terendah mulainya variasi, yaitu pada temperatur $27 \text{ }^\circ\text{C}$.

Pada temperatur tertinggi yaitu $80 \text{ }^\circ\text{C}$ nilai tegangan turun mencapai 15,66 V pada irradiansi 1000 W/m^2 , kemudian 14,07 V pada irradiansi 750 W/m^2 , dan 13,79 V pada irradiansi 500 W/m^2 . Nilai tegangan dalam kondisi berbeban 140Ω lebih kecil daripada saat *open circuit*. Hal tersebut terjadi karena pada saat *open circuit* nilai hambatan hampir mendekati nol, sehingga nilai tegangan keluarannya maksimal. Apabila rangkaian diberi beban maka disitu terdapat tegangan yang masuk ke beban sehingga mengurangi nilai tegangan keluaran jika dibandingkan kondisi tanpa beban.

Tabel 6. Data hasil percobaan I dengan R 140 Ω

Temperature (°C)	Arus (A) pada irradiansi 1000W/m ²	Arus (A) pada irradiansi 750W/m ²	Arus (A) pada irradiansi 500W/m ²
27	0,14	0,132	0,119
30	0,138	0,127	0,118
35	0,137	0,126	0,116
40	0,134	0,125	0,115
45	0,131	0,124	0,112
50	0,128	0,122	0,111
55	0,126	0,119	0,109
60	0,123	0,117	0,107
65	0,12	0,113	0,104
70	0,117	0,111	0,102
75	0,115	0,108	0,1
80	0,112	0,106	0,098



Gambar 10. Grafik I terhadap irradiansi dan temperatur

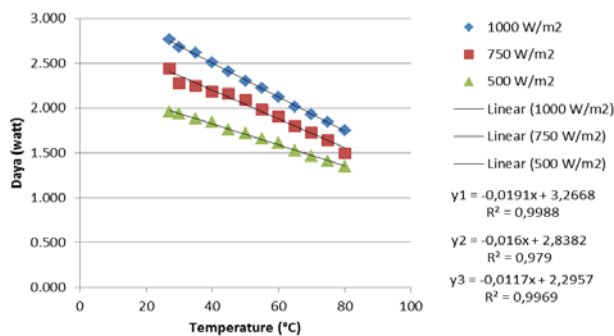
Pada kondisi berbeban nilai arus juga menurun bersamaan dengan nilai temperatur yang meningkat, hal ini disebabkan nilai tegangan yang lebih dahulu turun akibat temperatur, menyebabkan arus juga ikut turun karena hubungan $V = I R$, dimana nilai arus dan tegangan akan berbanding lurus dengan nilai R yang tetap, sehingga jika nilai tegangan turun maka nilai arus juga akan turun. Pada kondisi berbeban nilai arus yang diukur adalah arus pada beban yaitu dengan menghubungkan seri antara multimeter dan beban.

Pada temperatur terendah $27 \text{ }^\circ\text{C}$, arus yang didapat pada irradiansi 1000 W/m^2 adalah 0,14 A, pada irradiansi 750 W/m^2 adalah 0,132 A dan pada irradiansi 500 W/m^2 sebesar 0,119 A. Nilai arus menurun seiring dengan

kenaikan nilai temperatur. Pada temperatur tertinggi yaitu 80 °C nilai arus turun yaitu 0,112 A pada irradiansi 1000 W/m², kemudian 0,106 A pada irradiansi 750 W/m², dan 0,098 A pada irradiansi 500 W/m². Penurunan nilai arus tersebut sudah sesuai dengan teori yaitu hukum $V= I R$, Dimana jika tegangan turun maka arus juga akan turun dengan nilai R yang tetap.

Tabel 7. Data hasil percobaan P dengan R 140 Ω

Temperatur (°C)	Daya (Watt) pada irradiansi 1000W/m ²	Daya (Watt) pada irradiansi 750W/m ²	Daya (Watt) pada irradiansi 500W/m ²
27	2,762	2,439	1,961
30	2,677	2,278	1,936
35	2,619	2,245	1,885
40	2,507	2,184	1,842
45	2,408	2,159	1,761
50	2,300	2,089	1,723
55	2,221	1,981	1,660
60	2,122	1,908	1,607
65	2,012	1,793	1,524
70	1,925	1,730	1,465
75	1,846	1,643	1,407
80	1,754	1,491	1,351



Gambar 11. Grafik P terhadap irradiansi dan temperatur

Daya pada percobaan ini, dicari dengan mengalikan antara tegangan (V) dan arus (I), pada hasil percobaan ini didapati bahwa semakin tinggi nilai temperatur maka nilai daya akan semakin menurun. Titik tertinggi daya yang dihasilkan terjadi pada temperatur 27 °C yaitu 2,762 W dengan irradiansi 1000 W/m², kemudian 2,439 W dengan irradiansi 750 W/m², dan 1,961 W dengan irradiansi 500 W/m².

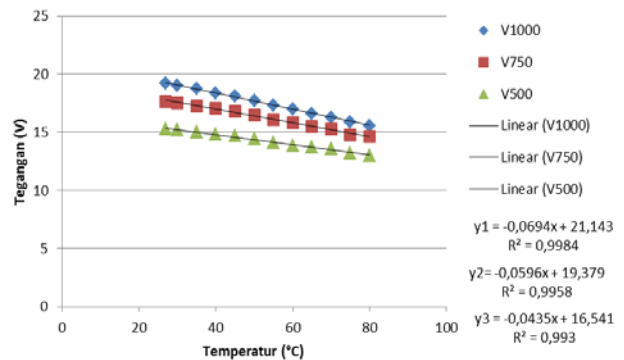
Pada temperatur 80 °C daya yang dihasilkan menurun yaitu 1,754 W pada irradiansi 1000 W/m², kemudian 1,491 W pada irradiansi 750 W/m², dan 1,351 W pada irradiansi 500 W/m². Karena daya merupakan perkalian antara tegangan dan arus maka ketika tegangan dan arus turun akibat kenaikan temperatur, maka daya juga akan ikut turun. Penurunan daya tersebut dapat mencapai titik 1,008 Watt, antara temperatur terendah dengan tertinggi pada irradiansi maksimal (1000 W/m²).

3.2.2. Percobaan dengan beban 100 Ω

Sama seperti percobaan dengan beban resistif 140 Ω, yang akan diukur pada percobaan beban 100 Ω adalah tegangan (V), arus (A) dan daya (P) terhadap kenaikan temperatur dengan variasi irradiansi.

Tabel 8. Data hasil percobaan V dengan R 100 Ω

Temperatur (°C)	Tegangan (V) pada irradiansi 1000W/m ²	Tegangan (V) pada irradiansi 750W/m ²	Tegangan (V) pada irradiansi 500W/m ²
27	19,2	17,68	15,31
30	19	17,55	15,21
35	18,73	17,27	15,01
40	18,37	17,07	14,81
45	18,11	16,77	14,72
50	17,74	16,48	14,42
55	17,35	16,09	14,09
60	17,01	15,85	13,88
65	16,62	15,48	13,7
70	16,28	15,27	13,6
75	15,9	14,78	13,23
80	15,55	14,61	13,03



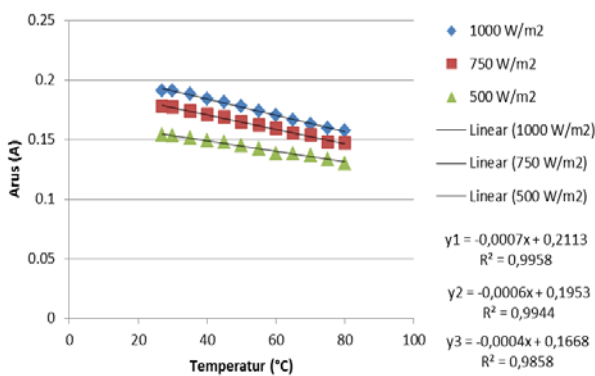
Gambar 12. Grafik V terhadap irradiansi dan temperatur

Pada kondisi dengan beban 100 Ohm nilai tegangan yang diukur mencapai nilai 19,2 V pada irradiansi 1000 W/m², kemudian 17,68 V pada irradiansi 750 W/m², dan 15,31 V pada irradiansi 500 W/m². Kondisi tersebut terjadi pada kondisi temperatur terendah dimulainya variasi yaitu pada temperatur 27 °C. Pada temperatur tertinggi yaitu 80 °C nilai tegangan turun, yaitu 15,55 V pada irradiansi 1000 W/m², kemudian 14,61 V pada irradiansi 750 W/m², dan 13,03 V pada irradiansi 500 W/m².

Nilai tegangan dalam kondisi berbeban 100 Ω lebih kecil daripada saat *open circuit* ataupun 140 Ω. Hal tersebut terjadi karena pada saat *open circuit* nilai hambatan hampir mendekati nol, sehingga nilai tegangan keluarannya maksimal. Apabila rangkaian diberi beban maka disitu terdapat tegangan yang masuk ke beban sehingga mengurangi nilai tegangan keluaran jika dibandingkan kondisi tanpa beban. Sedangkan dibandingkan dengan beban 140 Ω dalam hubungan $V=I R$ maka semakin besar nilai R, nilai V semakin besar.

Tabel 9. Data hasil percobaan I dengan R 100 Ω

Temperature (°C)	Arus (A) pada irradiansi 1000W/m ²	Arus (A) pada irradiansi 750W/m ²	Arus (A) pada irradiansi 500W/m ²
27	0,191	0,178	0,154
30	0,191	0,177	0,153
35	0,188	0,174	0,151
40	0,184	0,171	0,149
45	0,181	0,169	0,148
50	0,178	0,165	0,145
55	0,174	0,162	0,142
60	0,17	0,159	0,138
65	0,166	0,155	0,138
70	0,163	0,154	0,137
75	0,159	0,148	0,133
80	0,157	0,147	0,13



Gambar 13. Grafik I terhadap irradiansi dan temperatur

Pada kondisi berbeban nilai arus juga menurun bersamaan dengan nilai temperatur yang meningkat, hal ini disebabkan nilai tegangan yang lebih dahulu turun akibat temperatur, menyebabkan arus juga ikut turun karena hubungan $V = I R$, dimana nilai arus dan tegangan akan berbanding lurus dengan nilai R yang tetap, sehingga jika nilai tegangan turun maka nilai arus juga akan turun. Pada kondisi berbeban nilai arus yang diukur adalah arus pada beban yaitu dengan menghubungkan seri antara multimeter dan beban.

Pada temperatur terendah dimulainya variasi percobaan yaitu 27 °C, arus yang didapat adalah 0,191 A pada irradiansi 1000 W/m², kemudian 0,178 A pada irradiansi 750 W/m² dan 0,154 A pada irradiansi 500 W/m², nilai arus menurun seiring dengan kenaikan nilai temperatur. Pada temperatur tertinggi yaitu 80 °C nilai arus turun, yaitu 0,157 A pada irradiansi 1000 W/m², kemudian 0,147 A pada irradiansi 750 W/m², dan 0,13 A pada irradiansi 500 W/m². Penurunan nilai arus tersebut sudah sesuai dengan teori yaitu hukum $V = I R$. Dimana jika tegangan turun maka arus juga akan turun dengan nilai R yang tetap.

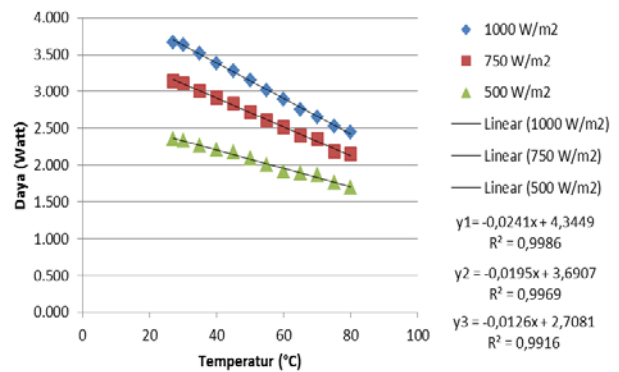
Daya pada percobaan ini, dicari dengan mengalikan antara tegangan (V) dan arus (I), pada hasil percobaan ini didapat bahwa semakin tinggi nilai temperatur maka nilai

daya akan semakin menurun. Titik tertinggi daya yang dihasilkan terjadi pada temperatur 27 °C yaitu 3,667 W dengan irradiansi 1000 W/m², 3,147 W dengan irradiansi 750 W/m², dan 2,358 W dengan irradiansi 500 W/m².

Pada temperatur 80 °C daya yang dihasilkan menurun yaitu 2,441 W pada irradiansi 1000 W/m², 2,148 W pada irradiansi 750 W/m², dan 1,694 W pada irradiansi 500 W/m². Karena daya merupakan perkalian antara tegangan dan arus maka ketika tegangan dan arus turun akibat kenaikan temperatur, maka daya juga akan ikut turun. Penurunan daya tersebut dapat mencapai 1,226 Watt antara temperatur terendah dengan tertinggi pada irradiansi maksimal (1000 W/m²).

Tabel 10. Data hasil percobaan P dengan R 100 Ω

Temperatur (°C)	Daya (Watt) pada irradiansi 1000W/m ²	Daya (Watt) pada irradiansi 750W/m ²	Daya (Watt) pada irradiansi 500W/m ²
27	3,667	3,147	2,358
30	3,629	3,106	2,327
35	3,521	3,005	2,267
40	3,380	2,919	2,207
45	3,278	2,834	2,179
50	3,158	2,719	2,091
55	3,019	2,607	2,001
60	2,892	2,520	1,915
65	2,759	2,399	1,891
70	2,654	2,352	1,863
75	2,528	2,187	1,760
80	2,441	2,148	1,694



Gambar 14. Grafik P terhadap irradiansi dan temperatur

4. Kesimpulan

Daya keluaran dari sel photovoltaic jenis *monocrystalline* dipengaruhi irradiansi, yaitu semakin tinggi nilai irradiansi (1000 W/m²) maka nilai daya (P) yang dihasilkan akan semakin besar dibandingkan dengan sel *photovoltaic* yang diberi irradiansi yang rendah pada temperatur yang sama. Pada percobaan tanpa beban dan *short circuit*, tegangan *open circuit* (Voc) akan mengalami penurunan sampai 4,21 V, sedangkan arus *short circuit* (Isc) akan mengalami kenaikan sampai 0,05 A, daya maksimum

(Pm) yang akan mengalami penurunan hingga 0,7523 Watt. Pada percobaan dengan beban 140 dan 100 Ω , tegangan (V) akan mengalami penurunan yaitu 4,07 V dan 3,65 V, arus juga mengalami penurunan sebesar 0,028 A dan 0,034 A seiring dengan kenaikan temperatur pada iradiasi maksimal, daya (P) yang juga mengalami penurunan sebesar 1,008 W dan 1,226 W.

Referensi

- [1]. Peraturan Presiden No. 5 tahun 2006, www.esdm.go.id
- [2]. Tan, David., *Handbook for Solar Photovoltaic (PV) Systems*, Energy Market Authority, Singapore, 2013.
- [3]. Makvart, Thomas., *Handbook of Photovoltaic*, John Wiley and Sons, University of Southampton, London, 2000.
- [4]. Messenger, Roger., Ventre, Jerry., *Photovoltaic System Engineering*, Florida, CRC Press, Florida, USA, 1999.
- [5]. Anggreni, Puti; *Makalah Fisika Kuantum, Radiasi Benda Hitam*, Jurusan Fisika, Universitas Udayana, 2012.
- [6]. S, Kurtz., D, Miller., *Evaluation of High-Temperature Exposure of Photovoltaic Modules*, NREL (National Renewable Energy Laboratory), Philadelphia, 2009.
- [7]. Yates, Tarn A., E Radziemska, Klugmann., *Thermally Affected Parameters of Current-Voltage Characterization of Silicon Photocell*, Department of Physics, University of California, Santa Cruz, 2003.
- [8]. Sutrisno, *Elektronika Dasar*, Penerbit ITB, 1986.
- [9]. Kurniawan, Heri., *Analisis Pengaruh Temperatur Operasional dalam Simulasi Karakteristik Arus Tegangan pada Dioda Si Menggunakan FEMLAB*, Jurusan Fisika, Universitas Jember, 2013.
- [10]. Nanjannavar, Viswanath., Gandhi, Palav., *LabVIEW Based PV Cell Characterization and MPPT Under Varying Temperatur and Irradiance Conditions*, NiuCONE, IEEE, India, 2013.
- [11]. A. Green, Martin., *Solar Cells, Operating Principles, Technology, and System Applications* (Prentice-Hall series in solid state physical electronics), Prentice Hall, New Jersey, 1981.
- [12]. Nelson, Jenny., *The Physics of Solar Cells*, London Imperial College, London, 2003.
- [13]. Zeiss Microscopy Online Campus, <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungsten>
- [14]. ASTM E-928, K. A. Emery, *Solar Energy Research Institute, Solar Simulators and I-V Measurement Methods*, NREL (National Renewable Energy Laboratory), California, USA, 1986.
- [15]. IEC 60891:2009, <https://law.resource.org>