

Prototipe Emulator Panel Surya Menggunakan Buck converter Berbasis Arduino dan *Graphical User Interface* Matlab

Silvi Anggraini^{1*} dan Krismadinata^{1,2}

¹Teknik Elektro Industri, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang
Jl.Prof. Dr hamka, Kampus UNP Air Tawar Padang Indonesia

²CEPER, Centre for Energy and Power Electronics Research
Jl.Prof. Dr hamka, Kampus UNP Air Tawar Padang Indonesia

*e-mail: silvianggraini181@gmail.com

(Diajukan: 04 September 2023, direvisi: 05 Oktober 2023, disetujui: 17 Oktober 2023, dipublikasikan: 18 Oktober 2023)

Abstrak

Tulisan ini membahas perancangan perangkat keras emulator sel surya, memonitoring keluaran emulator menggunakan MATLAB GUI, dan membandingkan karakteristik hasil pengukuran langsung dengan karakteristik hasil simulasi untuk mengetahui unjuk kerja sistem panel surya. Emulator panel surya ini akan dimodelkan dengan persamaan matematis di Arduino Uno dengan menginputkan nilai iradiasi, suhu, arus dan tegangan keluaran *buck converter* yang diberikan sebagai umpan balik dan menghasilkan arus referensi yang kemudian dibandingkan dengan arus keluaran *buck converter* dimana kesalahan perbandingan akan di kontrol oleh kendali PID. Hasil uji coba dengan *hardware* emulator sel surya menunjukkan karakteristik yang mirip dengan modul Solkar 36, dengan tingkat kesalahan rerata sekitar 5,16% untuk daya maksimum, 2,08% untuk arus *short circuit*, dan 0,28% untuk tegangan *open circuit*. Penurunan nilai iradiasi mengakibatkan penurunan rata-rata pada arus *short circuit*, tegangan *open circuit*, dan daya maksimum sekitar 0,761 A, 0,558 V, dan 17,034 W. Selain itu, rata-rata penurunan Voc dan daya maksimum akibat kenaikan suhu 10 °C yaitu 0,26 V dan 1,11182 W, sedangkan Isc mengalami peningkatan sekitar 0,015 A.

Kata Kunci: emulator, *buck converter*, karakteristik.

Abstract

This study discusses the hardware design of a solar cell emulator, monitoring the emulator's output using a MATLAB GUI, and comparing the characteristics of direct measurements with the characteristics of simulation results to determine the solar panel system's performance. This solar panel emulator will be modeled with mathematical equations on an Arduino Uno by inputting values such as irradiance, temperature, current, and output voltage of the buck converter as feedback and generating a reference current, which is then compared with the buck converter's output current. The comparison error will be controlled by a PID controller. Experimental results with the solar cell emulator hardware show characteristics similar to the Solkar 36 module, with an average error rate of about 5.16% for maximum power, 2.08% for short-circuit current, and 0.28% for open-circuit voltage. A decrease in irradiance results in an average decrease in short-circuit current, open-circuit voltage, and maximum power by about 0.761 A, 0.558 V, and 17.034 W, respectively. In addition, the average decrease in Voc and maximum power due to a 10 °C temperature increase is 0.26 V and 1.11182 W, while Isc increases by approximately 0.015 A.

Keywords: emulator, *buck converter*, characteristic.

PENDAHULUAN

Semakin berkembangnya teknologi dan ilmu pengetahuan mengakibatkan penggunaan akan energi terbarukan semakin meningkat terlebih jumlah yang tersedia di alam sangat melimpah[1], dimana penggunaan energi terbarukan di Indonesia pada tahun 2023 mencapai 12.736,7 MW dan PLT Surya berkontribusi sebesar 322,6 MW[2][3]. Energi listrik yang dihasilkan dari konversi energi menggunakan sel surya menghasilkan emisi karbondioksida yang rendah dan tidak ada konsumsi bahan bakar fosil. Pertumbuhan energi panel surya yang tinggi karena manfaat yang dimiliki panel surya seperti biaya operasional yang lebih sedikit, dan jumlah bahan baku yang melimpah[4]. Sebaliknya pada eksperimen *real-time* energi panel surya seringkali memerlukan pengujian berulang pada kondisi iklim yang diinginkan untuk memvalidasi, misalnya algoritma Pelacakan Titik Daya Maksimum (MPPT)[5], biaya panel surya yang mana juga membutuhkan biaya awal tinggi, area pemasangan yang luas karena memerlukan beberapa modul dari panel surya [6], memakan waktu untuk menghubungkan modul secara berbeda, dan ketergantungan pada kondisi cuaca[7][8].

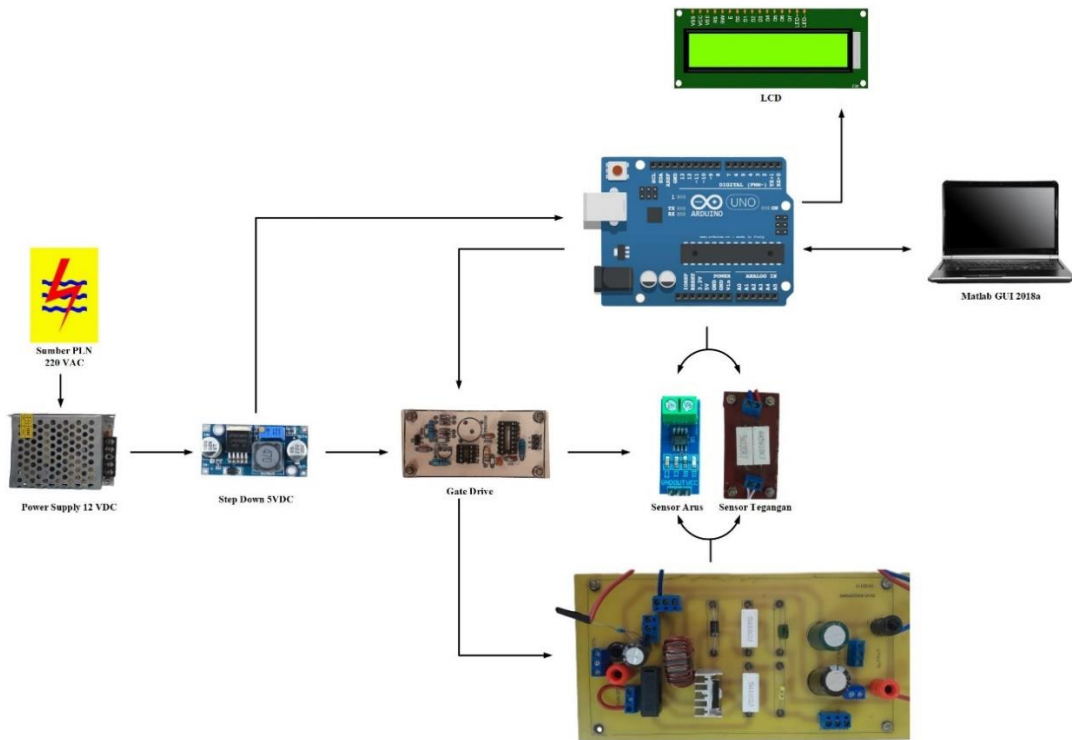
Maka diperlukanlah alat uji labor yang mampu menghasilkan karakteristik yang sama dengan panel surya untuk mengetahui efektivitas pemasangan panel surya, yang salah satunya dengan menggunakan *Photovoltaic Emulator* (PVE). PVE adalah sumber tegangan atau arus yang menghasilkan karakteristik arus-tegangan (I-V) yang sama sebagaimana modul PV tanpa bergantung pada kondisi cuaca. [4]. Salah satu komponen yang perlu dipertimbangkan dalam PVE adalah strategi pengendalian. Tujuan dari strategi pengendalian adalah untuk mendapatkan titik acuan bagi PVE. Strategi pengendalian menentukan input referensi dari pengontrol loop tertutup untuk konverter daya di PVE berdasarkan beban, *irradiance*, dan *temperature* modul[9].

Penelitian mengenai emulator panel surya ini sebelumnya juga telah dilakukan oleh Nanang Hadi Sodikin (2015) dengan judul penelitian “Rancang Bangun Prototipe Emulator Sel Surya Menggunakan *Buck converter* Berbasis Arduino” dimana penelitian sebelumnya mengalami kelemahan dalam mencapai setpoint arus dari awal (saat pertama kali terhubung dengan beban) hingga mencapai setpoint karena proses yang lambat.

Berdasarkan hal di atas. Pada penelitian ini menggunakan *buck converter*[10] yang dikendalikan oleh kontrol PID, sehingga dapat menghasilkan arus dan tegangan keluaran yang serupa dengan karakteristik sel surya sebenarnya berdasarkan perubahan resistansi yang terpasang. *Output* dari PVE akan dimonitoring menggunakan *Graphical User Interface Matlab*[11][12]. Pengembangan penelitian ini terletak pada penambahan *Interface* pada *Graphical User Interface Matlab* untuk menampilkan kurva karakteristik PVE.

METODE

Dalam tulisan ini digunakan sebagai acuan dalam proses perancangan alat yang dapat bekerja pada pengendalian arus keluaran *buck converter* dengan pengendali PID untuk mendapatkan nilai arus dan tegangan yang menyerupai karakteristik panel surya.

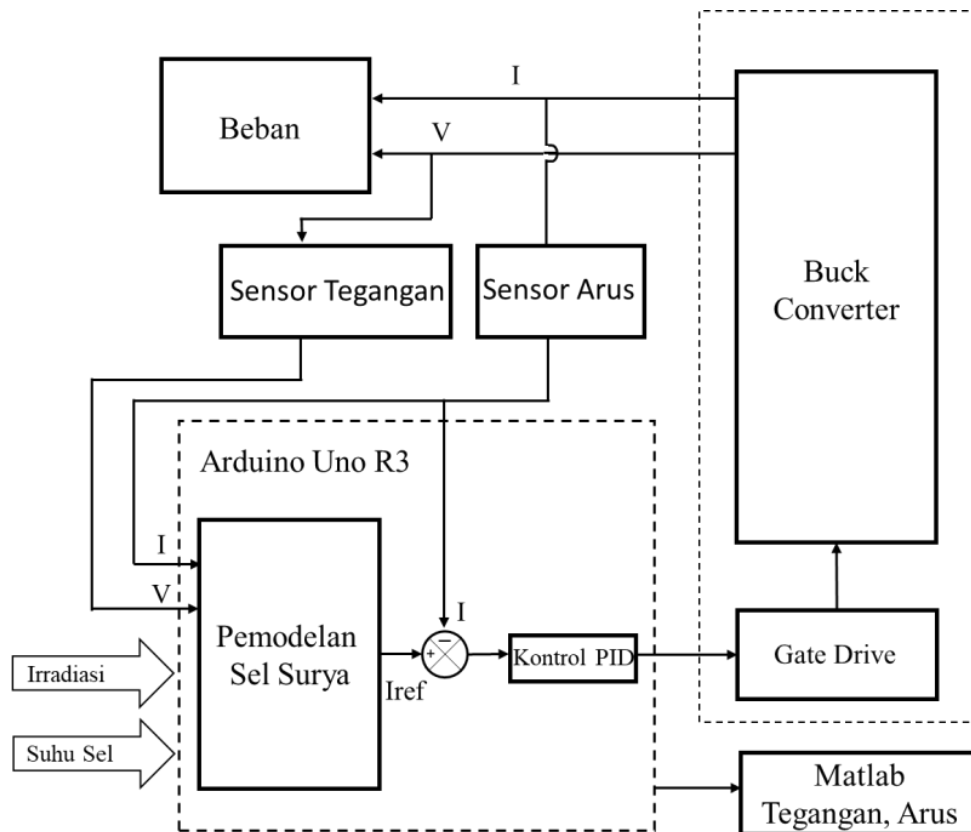


Gambar 1. Konfigurasi Sistem Emulator Panel Surya

Konfigurasi sistem yang digunakan terdiri dari adaptor yang mengubah tegangan 220 VAC menjadi 12 VDC, satu buah *step down* untuk menurunkan tegangan menjadi 5 VDC, rangkaian *buck converter*, rangkaian *gate drive*, sensor arus dan sensor tegangan. Pada rangkaian ini Arduino Uno digunakan untuk melakukan pemodelan persamaan matematis panel surya, dimana *gate drive* berfungsi menciptakan sinyal kontrol yang memengaruhi saklar pada *buck converter* untuk melakukan pembukaan atau penutupan. Dampaknya adalah menghasilkan arus yang sesuai dengan arus referensi, yang mencerminkan karakteristik dari sel surya serta LCD yang berfungsi untuk menampilkan nilai arus dan tegangan. Data monitoring akan ditampilkan pada PC menggunakan perangkat lunak Matlab GUI versi 2018a.

Blok Diagram

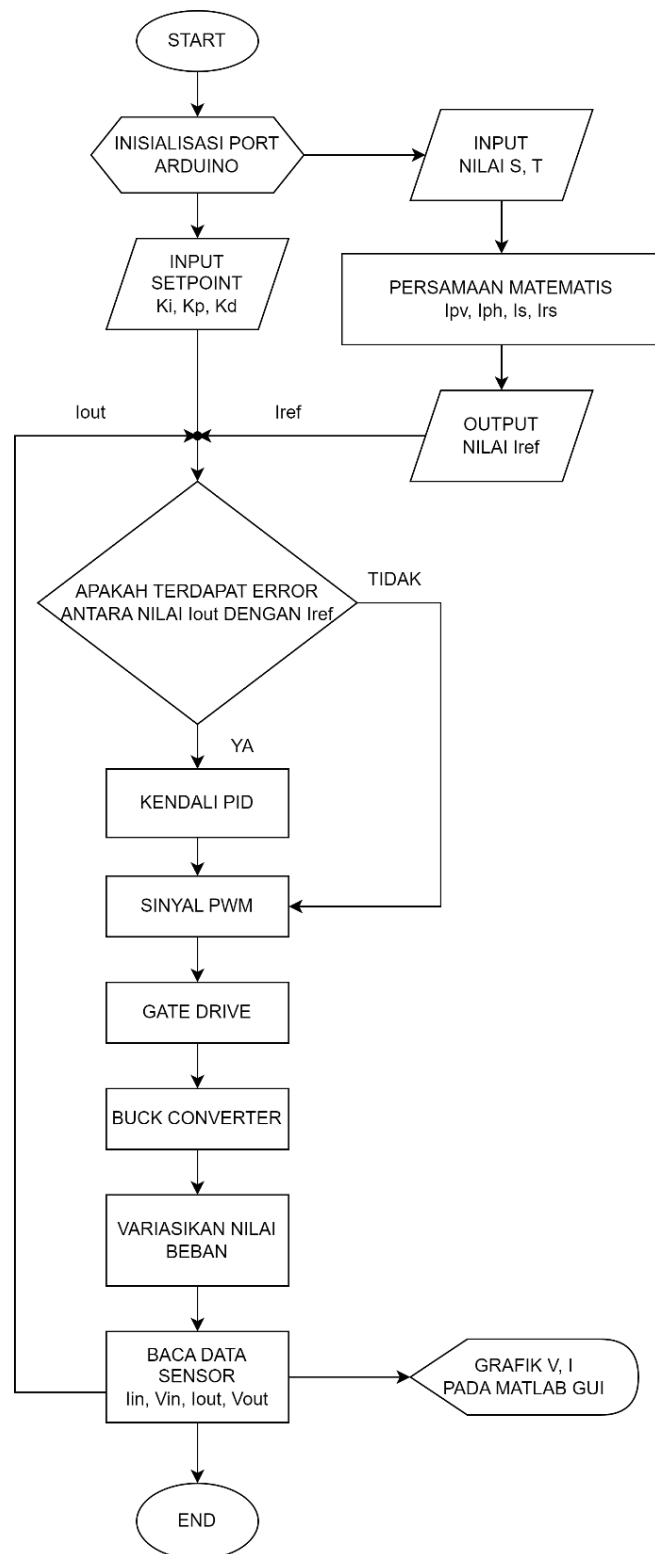
Pada gambar 2, *Photovoltaic Emulator* (PVE) yaitu panel surya akan dimodelkan dengan persamaan matematis panel surya di Arduino Uno yang kemudian dikontrol dengan kendali PID. Dengan memasukkan nilai *irradiance*, suhu, serta arus dan tegangan keluaran dari *buck converter* yang diberikan sebagai umpan balik, arus referensi dihitung berdasarkan persamaan matematis tersebut. Arus referensi ini kemudian dibandingkan dengan arus yang dihasilkan oleh *buck converter*, dan kesalahan perbandingan ini diatur menggunakan kendali PID.



Gambar 2. Blok Diagram

Generator PWM menciptakan sinyal kontrol yang memengaruhi saklar pada *buck converter* untuk melakukan pembukaan atau penutupan. Dampaknya adalah menghasilkan arus yang sesuai dengan arus referensi, yang mencerminkan karakteristik dari sel surya. Output dari PVE adalah tegangan dan arus yang dihasilkan oleh *buck converter*. Selanjutnya, arus output ini dibandingkan dengan arus referensi yang sudah dibuat. Ketika nilai beban mengalami perubahan, arus dan tegangan akan berubah, sehingga mengakibatkan perubahan pada arus referensi yang dihasilkan dalam proses pengolahan di Arduino, sesuai dengan karakteristik sel surya[13]. Nilai tegangan dan arus dari keluaran PVE ini akan dimonitor menggunakan antarmuka pengguna Matlab untuk menampilkan kurva karakteristik secara *real-time*.

Konfigurasi yang diterapkan dalam sistem ini mencakup catu daya 35 V, regulator turun tegangan untuk mengubah tegangan 12 VDC menjadi 5 VDC, sirkuit penurun tegangan *buck converter*, sistem rangkaian *gate drive*, serta sensor arus dan tegangan. Arduino Uno digunakan sebagai otak pengendali dalam rangkaian ini. Informasi pemantauan akan tampil di komputer melalui perangkat lunak Matlab GUI versi 2018a.



Gambar 3. Flowchart Kerja Photovoltaic Emulator Menggunakan Buck Converter

Setelah pembuatan konfigurasi sistem, *flowchart* juga diperlukan dalam perancangan PVE. *Flowchart* kerja PVE Menggunakan *buck converter* dapat dilihat pada Gambar 3. *Flowchart* berfungsi sebagai acuan dalam membuat *listing* program serta berisi penentuan instruksi dari program yang akan dibuat.

Parameter Pemodelan Sel Surya

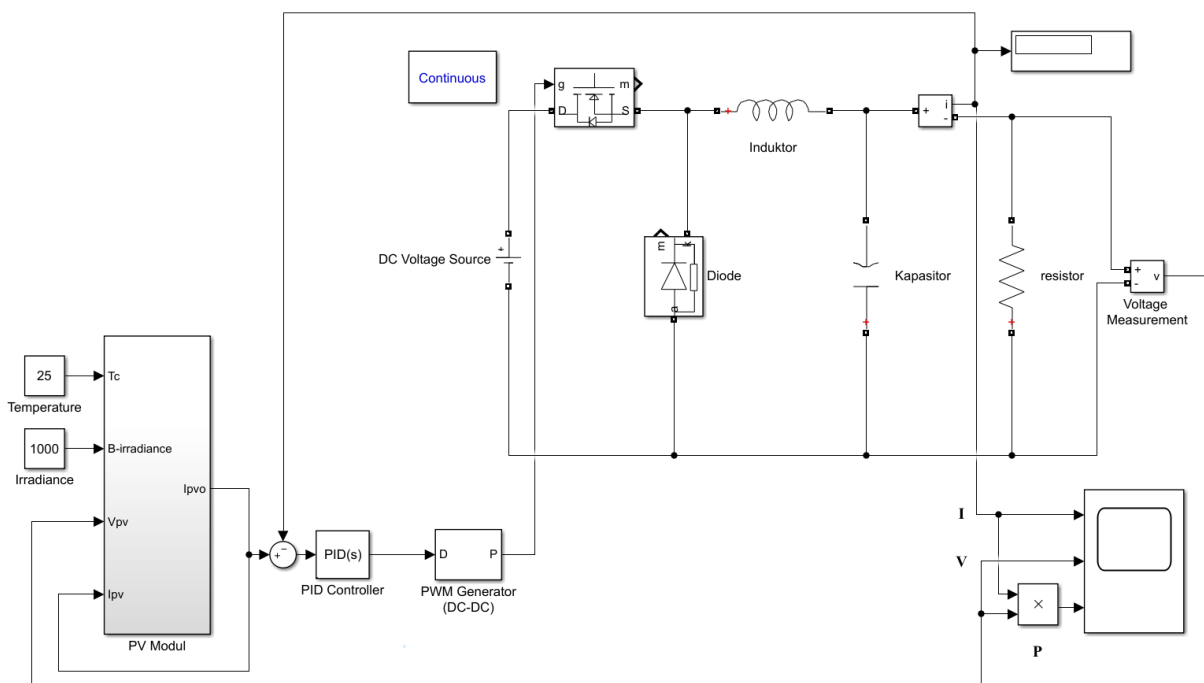
Pemetaan karakteristik sel surya mengandalkan pada penerapan persamaan matematika yang menggambarkan sifat-sifat intrinsik sel surya[14]. Dalam penelitian ini, modul referensi yang digunakan adalah sel surya Solkar 36 Watt

Tabel 1 Parameter Module Solkar 36 Watt pada uji coba keadaan standar

No	Parameter	Nilai
1	Daya Maksimum (P_m)	37.08 W
2	Tegangan pada Daya Maksimum (V_m)	16.56 V
3	Arus pada Daya Maksimum (I_m)	2.25 A
4	Tegangan <i>Open circuit</i> (V_{oc})	21.24 V
5	Arus <i>Short circuit</i> (I_{sc})	2.55 A
6	Jumlah Sel Seri (N_s)	36
7	Resistansi Seri (R_s)	0.1
8	Resistansi Paralel (R_{sh})	10620
9	Faktor Ideal (n)	1.6

Perancangan Emulator Sel Surya

Rancangan pembuatan PVE meliputi beberapa komponen, termasuk mikrokontroler Arduino Uno, rangkaian pengendali gerbang (*gate drive*), rangkaian penurun tegangan (*buck converter*), sensor tegangan, sensor arus ACS712, dan beban. Setiap komponen tersebut memiliki peran tersendiri dan saling terkoneksi dengan komponen lainnya.[15].



Gambar 4 Pemodelan Emulator Panel Surya

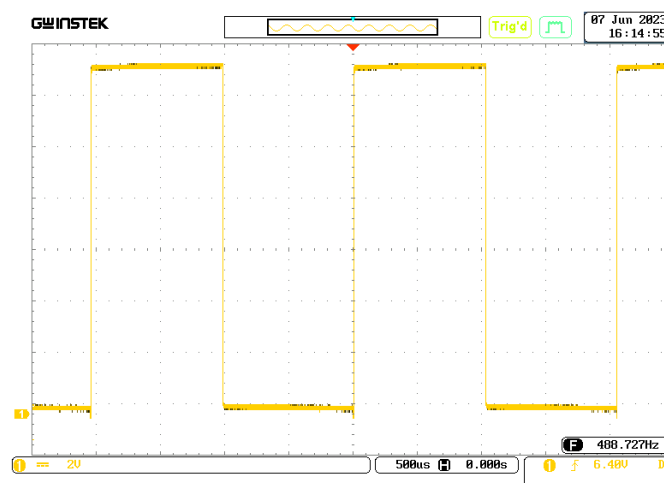
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian *photovoltaic emulator* menggunakan *buck converter* dilakukan dengan memberikan tegangan masukan ke rangkaian *power* sebesar 35 VDC. Nilai *duty* sebesar 61% dan diberikan beban yang bervariasi untuk mendapatkan nilai arus dan tegangan yang menyerupai karakteristik panel surya referensi (Solkar 36 Watt). Pengujian dilakukan dalam *standard test condition* (suhu sel 25°C dan radiasi 1000 W/m²), di mana PVE menghasilkan karakteristik yang serupa terhadap modul Solkar 36 Watt. Simulasi

menghasilkan daya maksimum sekitar 38,1539 W dengan tegangan sekitar 16,34 V dan arus sekitar 2,335 A. Hasil pengujian dengan perangkat keras PVE menghasilkan daya maksimum sekitar 38,99427 W dengan tegangan sekitar 16,53 V dan arus sekitar 2,359 A. Dibandingkan dengan karakteristik modul Solkar 36 Watt, daya maksimumnya adalah 37,08 W dengan tegangan sekitar 16,56 V dan arus sekitar 2,25 A.

Pengujian Gate drive

Pengukuran tegangan hasil keluaran dari rangkaian *gate drive* dilakukan dengan menggunakan multimeter, dan gelombang keluaran yang dihasilkan oleh rangkaian *gate drive* diamati dengan menggunakan *oscilloscope*. Titik pengukuran untuk menguji rangkaian *gate drive* terletak pada *output* rangkaian *gate drive*. Gambaran dari sinyal PWM yang dihasilkan oleh rangkaian *gate drive*, dengan *duty cycle* sebesar 61%, dapat dilihat pada Gambar 5 [8].



Gambar 5 Duty Cycle 61%

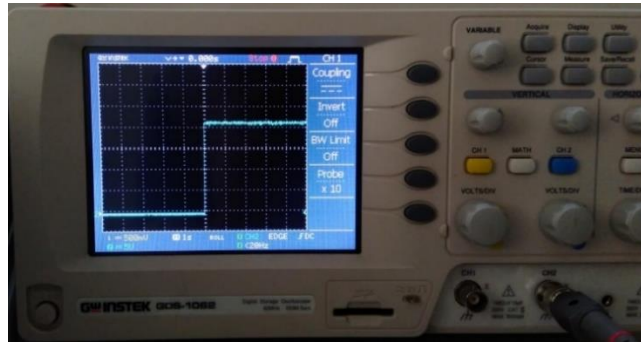
Tabel 2 Hasil Pengujian Rangkaian Gate drive

Duty Cycle	Tegangan Output
10%	4,17 VDC
20%	7,19 VDC
30%	10,36 VDC
40%	13,76 VDC
50%	17,31 VDC
60%	20,79 VDC
70%	24,35 VDC
80%	27,92 VDC
90%	31,61 VDC

Pada Tabel 2 dapat dilihat data hasil pengujian rangkaian *gate drive* dari *duty cycle* 10% hingga 90%. Nilai tegangan keluaran rangkaian *gate drive* diukur menggunakan multimeter. Pada *duty cycle* 10% nilai tegangan keluaran *gate drive* terukur sebesar 4,17 VDC dan pada *duty cycle* 90% tegangan terukur sebesar 31,61 VDC. PWM (Modulasi Lebar Pulsa) adalah suatu cara merubah lebar sinyal atau tegangan yang dinyatakan dengan gelombang pulsa dalam suatu perioda. PWM merupakan sinyal digital berupa gelombang petak dimana *duty cycle* dari gelombang dapat diatur untuk menghasilkan keluaran sesuai dengan kebutuhan. Semakin besar lebar pulsa maka akan semakin besar pula keluarannya [16].

Pengujian Buck converter

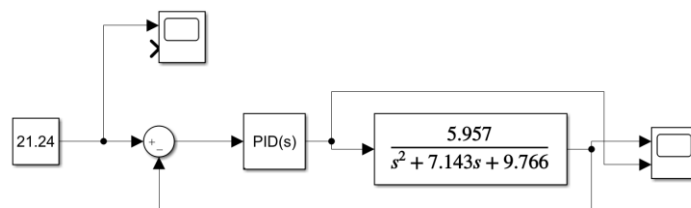
Gambar 6 berikut merupakan grafik respon tegangan *output buck converter* tanpa pengendali, di dapatkan tegangan *output* tanpa *overshoot* dan waktu naik (*rise time*) yang cepat tetapi tegangan keluaran tidak dapat dikendalikan. Dan untuk memaksimalkan tegangan *output* agar dapat dikendalikan maka digunakan kontrol PID[17][18]. untuk mendapatkan nilai *proportional*, *integral*, *derivative* digunakan *Automatically Tuning PID Controller* menggunakan Matlab Simulink.



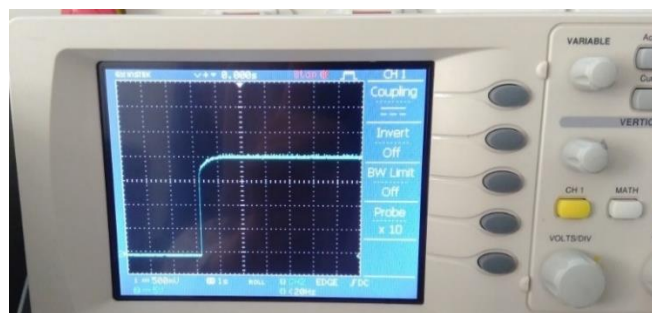
Gambar 6. Grafik Respon Tegangan Buck converter Tanpa Pengendali

Pengujian Kontrol PID

Penentuan konstanta PID adalah hal penting yang harus dilakukan karena mempengaruhi kinerja dari sebuah sistem. Metode ini mengidentifikasi *model plant* dari data uji *input-output*. Pemodelan pengontrol PID dilakukan dengan blok pengontrol PID di Simulink. Selanjutnya secara otomatis didapatkan nilai P, I, D dan dapat disesuaikan untuk mendapatkan nilai yang lebih baik[19].



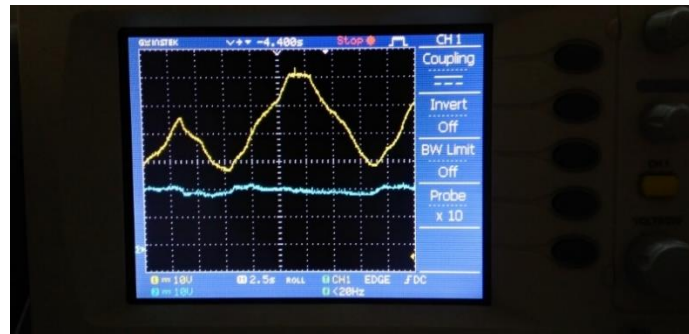
Gambar 7. *Automatically Tuning PID Controller* di Matlab Simulink



Gambar 8. Grafik Respon Tegangan Buck converter dengan Kontrol PID

Berdasarkan pengontrolan di atas didapatkan hasil PID dengan *automatically tuning PID controller* yaitu $P = 48.58656$, $I = 29.91813093$ dan $D = 0.55059$. Sehingga didapatkan grafik respon tegangan *output buck converter* seperti Gambar 8 dengan setpoint 21.24 V. *Rise time* pada grafik respon PID yang sedikit lambat dari pada *buck*

converter tanpa control tetapi tegangan sudah dapat dikendalikan seperti gambar 9 berikut [20].



Gambar 9. Grafik Respon Tegangan Buck converter dengan Input Bervariasi dan Kontrol PID

Pengujian Emulator Sel Surya Secara Keseluruhan

Pengujian ini melibatkan variasi nilai masukan, termasuk *irradiance* dan *temperature* sel surya, pada berbagai tingkat beban yang berbeda. Nilai *irradiance* bervariasi antara 500 W/m², 700 W/m², dan 1000 W/m², sedangkan nilai *temperature* bervariasi dari 30°C hingga 50°C dengan kenaikan 10°C setiap interval, serta variasi beban dari 1Ω hingga 320 Ω. Selama penelitian ini, modul Solkar 36 Watt digunakan sebagai referensi. Untuk memastikan bahwa hasil uji coba PVE mampu mencerminkan karakteristik sel surya yang sebenarnya, dilakukan perbandingan antara hasil uji coba *hotovoltaic mulator* dengan modul sel surya Solkar 36 Watt, sebagaimana tercantum pada Tabel 1 di atas.

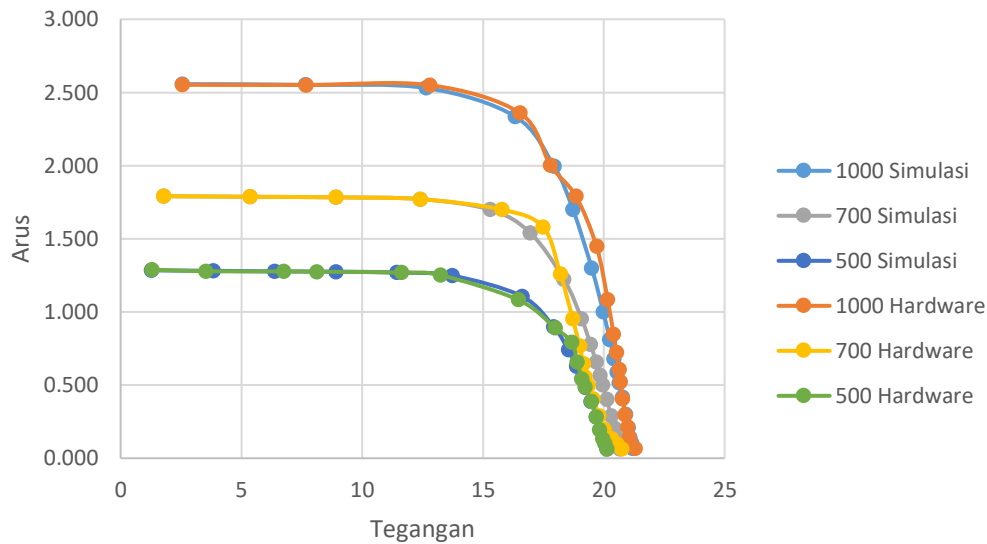
Tabel 3 Modul Referensi Arus Solkar 36 Watt pada Iradiasi dan suhu yang Bervariasi

No	Insol W/m ²	Temperature (°C)				
		25°C	30°C	40°C	50°C	90°C
		Arus (A)				
1	1000	2.55	2.559	2.575	2.592	2.66
2	700	1.785	1.791	1.803	1.815	1.862
3	500	1.275	1.279	1.288	1.296	1.33
4	250	0.6375	0.6396	0.6489	0.6481	0.6651
5	100	0.255	0.2559	0.2576	0.2592	0.2661

Pengujian dilakukan dalam *standard test condition* (suhu sel 25°C dan radiasi 1000 W/m²), di mana PVE menghasilkan karakteristik yang serupa terhadap modul Solkar 36 Watt. Simulasi menghasilkan daya maksimum sekitar 38,1539 W dengan tegangan sekitar 16,34 V dan arus sekitar 2,335 A. Hasil pengujian dengan perangkat keras PVE menghasilkan daya maksimum sekitar 38,99427 W dengan tegangan sekitar 16,53 V dan arus sekitar 2,359 A. Dibandingkan dengan karakteristik modul Solkar 36 Watt yang tertera dalam Tabel 1, daya maksimumnya adalah 37,08 W dengan tegangan sekitar 16,56 V dan arus sekitar 2,25 A. Terlihat adanya perbedaan antara hasil simulasi dan hasil pengujian perangkat keras sel surya. Simulasi PVE memiliki *error* rata-rata sekitar 2,89% untuk daya, 1,32% untuk tegangan, dan 3,77% untuk arus. Di sisi lain, perangkat keras PVE memiliki rata-rata *error* sekitar 5,16% untuk daya, 4,84% untuk arus, dan 0,18% untuk tegangan.

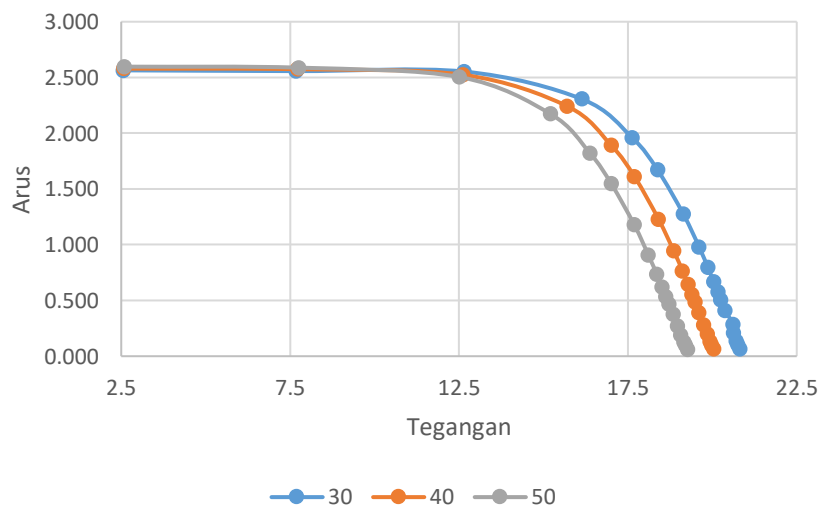
Selain mempertimbangkan parameter-parameter tersebut, analisis juga dilakukan untuk mengevaluasi kurva karakteristik yang didapatkan dari simulasi dan pengujian

hardware PVE menggunakan modul Solkar 36 Watt. Perbandingan ini dapat dilihat pada Gambar 10 dan 11 yang disajikan di bawah ini:

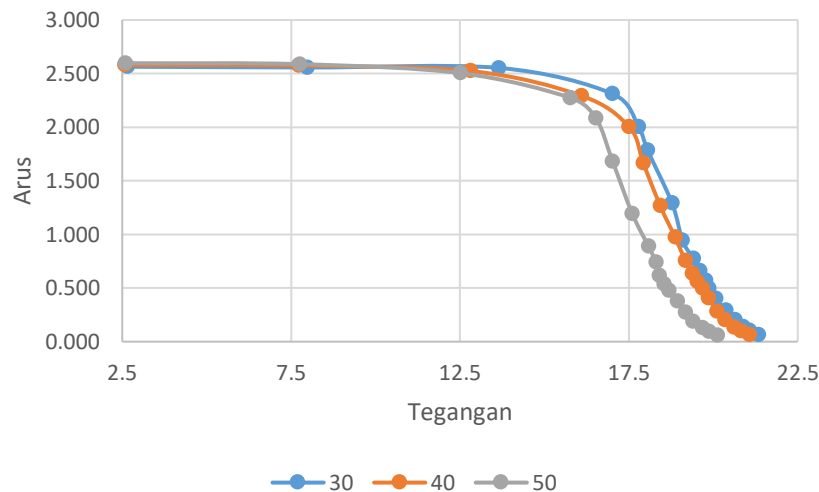


Gambar 10 Perbandingan Kurva Karakteristik I-V Photovoltaic Emulator Simulasi dan Perangkat Keras pada Irradiance yang Bervariasi

Perbandingan kurva I-V yang menunjukkan keterkaitan antara arus dan tegangan saat terjadi perubahan nilai *irradiance* pada beban yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 10. Begitu juga, perbandingan kurva I-V yang menunjukkan keterkaitan antara arus dan tegangan saat terjadi perubahan nilai suhu sel pada berbagai nilai beban dapat dilihat pada Gambar 11.



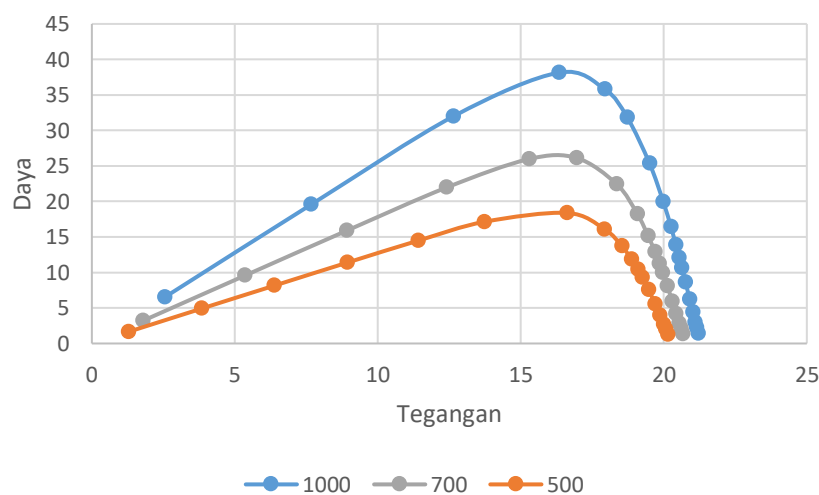
a)



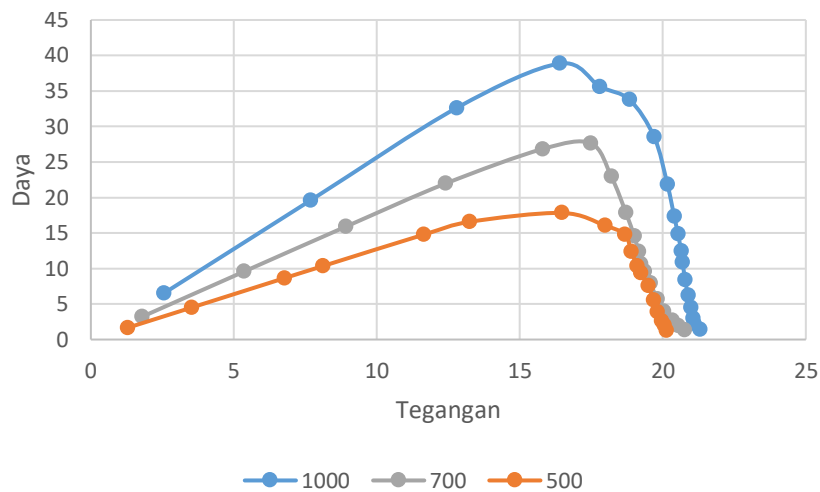
b)

Gambar 11. Perbandingan Kurva Karakteristik I-V Photovoltaic Emulator a) Simulasi dan b) Perangkat Keras pada Temperature yang Bervariasi

Seperti yang terlihat pada Gambar 10 dan 11 di atas, Kurva karakteristik yang didapatkan dari eksperimen dengan PVE menunjukkan kemiripan dengan kurva karakteristik modul Solkar 36. Ketika terjadi perubahan pada nilai radiasi dan suhu sel, kurva karakteristik yang didapatkan mampu mencerminkan karakteristik sel surya yang sesungguhnya. Di samping kurva I-V, hasil simulasi pengujian sel surya juga bisa direpresentasikan dalam bentuk kurva yang memperlihatkan keterkaitan antara tegangan dan daya (kurva P-V). Tujuannya adalah untuk memahami pengaruh dari radiasi masukan dan suhu terhadap daya yang dihasilkan.. Kurva P-V dapat dilihat pada Gambar 12 dan 13, di mana Gambar 11 menggambarkan karakteristik P-V saat terjadi perubahan nilai irradiansi, sedangkan Gambar 13 menggambarkan karakteristik P-V saat terjadi perubahan nilai temperatur sel.

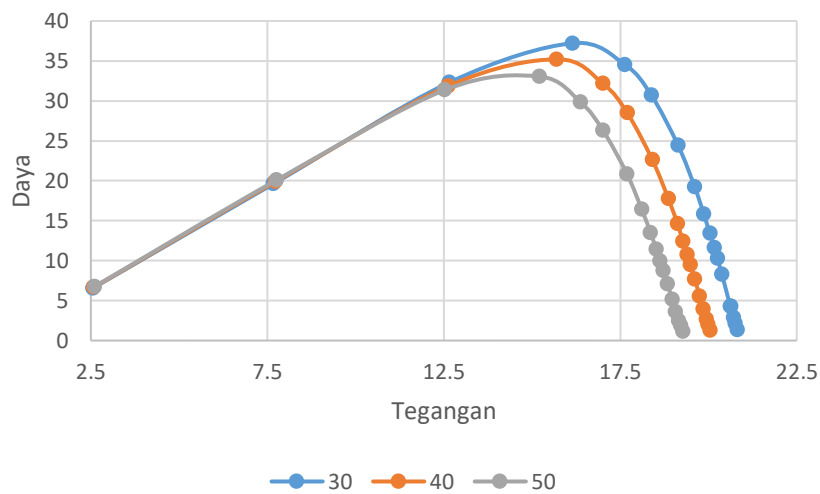


a)

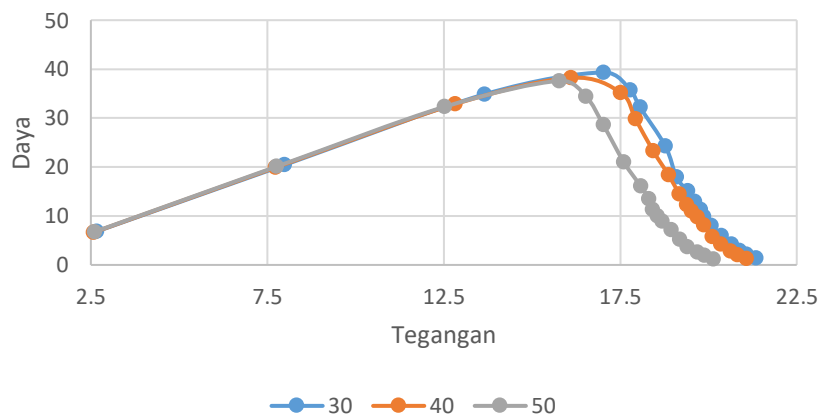


b)

Gambar 12 Kurva Karakteristik P-V saat Nilai Irradiance Divariasikan pada a) Simulasi dan b) Perangkat Keras Emulator Sel Surya



a)



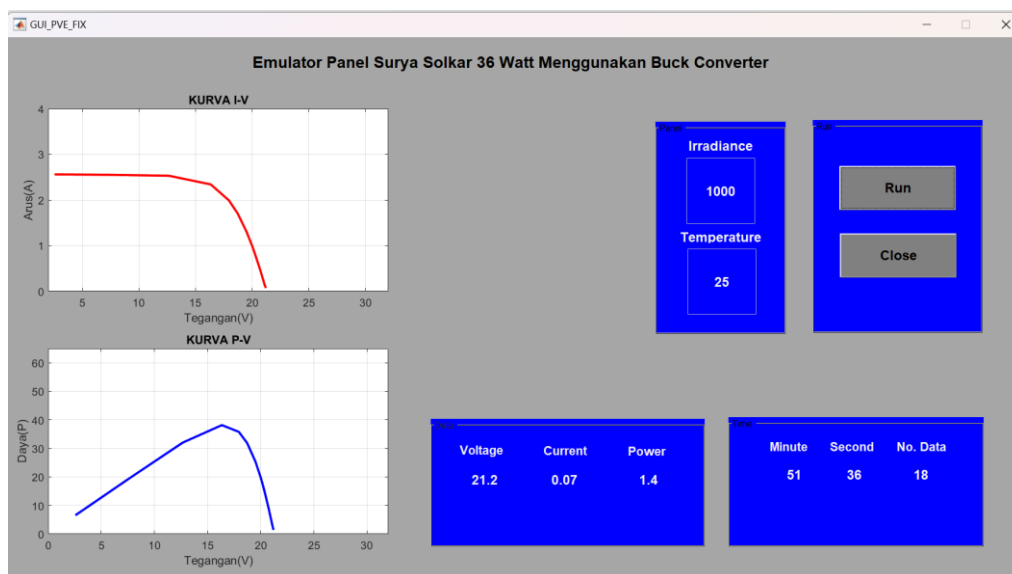
b)

Gambar 13 Kurva Karakteristik P-V saat Nilai Suhu Sel Divariasikan pada a) Simulasi b) Perangkat Keras Emulator Sel Surya

Kurva karakteristik yang ditampilkan pada Gambar 12 hingga Gambar 13 di atas mengindikasikan bahwa perubahan nilai irradiansi dan suhu sel berpengaruh pada keluaran PVE, seperti arus, tegangan, dan daya. Hal ini mengakibatkan bahwa semakin rendah tingkat pencahayaan, arus *short circuit* pada PVE juga menurun. Meskipun demikian, nilai tegangan pada rangkaian terbuka juga mengalami penurunan, namun tidak signifikan. Perubahan nilai irradiansi dapat dijelaskan dari segi besarnya arus I_{ph} yang dihasilkan yang sejalan dengan tingkat radiasi. Fenomena ini terjadi dalam modul sel surya yang sebenarnya, di mana semakin berkurangnya radiasi, semakin sedikit elektron yang terlepas, sehingga arus juga mengalami penurunan.

Pemberian suhu yang bervariasi pada sel surya juga berdampak pada keluaran dari PVE, terutama pada nilai tegangan *open circuit* dan daya keluaran maksimum yang akan menurun seiring dengan meningkatnya suhu sel. Sementara itu, arus *short circuit* akan meningkat, meskipun tidak signifikan. Penurunan tegangan ini disebabkan oleh energi *gap* yang menyusut seiring dengan peningkatan suhu, sehingga perbedaan potensial juga ikut menurun. Terlebih lagi, karena penyusutan energi *gap* ini, elektron lebih mudah melompati daerah energi *gap*, sehingga arus sel sedikit meningkat. Dari grafik di atas, terlihat bahwa saat radiasi turun dari 1000 W/m² ke 700 W/m², arus *short circuit*, tegangan *open circuit*, dan daya maksimum juga mengalami penurunan. Penurunan tersebut sekitar 0,761 A untuk arus *short circuit*, 0,55 V untuk tegangan *open circuit*, dan 11,35839 W untuk daya maksimum. Selain itu, rata-rata penurunan tegangan *open circuit* dan daya maksimum akibat kenaikan suhu 10 °C yaitu 0,26 V dan 1,11182 W, sedangkan arus *short circuit* mengalami peningkatan sekitar 0,015 A [21].

Monitoring data dari rangkaian *photovoltaic emulator* akan ditampilkan pada Matlab GUI 2018a. Pada Matlab GUI telah dirancang tampilan data monitoring dari *Photovoltaic Emulator* seperti *axes* untuk menampilkan kurva karakteristik PVE melalui nilai arus, tegangan dan daya yang dihasilkan, *button* untuk memulai tampilan program. Untuk data dari GUI dapat disimpan langsung ke excel secara *real-time*. [12][22]



Gambar 14. Tampilan Monitoring Emulator Panel Surya di GUI Matlab

KESIMPULAN DAN SARAN

PVE yang diusulkan berhasil mereplikasi karakteristik sel surya sesungguhnya. Uji coba dilakukan pada keadaan STC (25 °C dan 1000 W/m²), emulator ini mencapai karakteristik yang mirip dengan modul Solkar 36, dengan tingkat kesalahan pengukuran rata-rata sekitar 5,16% untuk daya maksimum, 2,08% untuk arus hubung singkat, dan 0,28% untuk tegangan *open circuit*. Ketika nilai iradiasi mengalami penurunan, arus *short circuit* dan tegangan *open circuit* juga turun, sehingga menyebabkan penurunan daya maksimum yang dihasilkan oleh PVE. Di sisi lain, ketika suhu sel meningkat, tegangan hubung terbuka (Voc) akan berkurang, meskipun arus hubung singkat (Isc) mengalami peningkatan, meskipun tidak signifikan. Hal ini juga menyebabkan penurunan nilai daya maksimum yang didapatkan oleh PVE. Penurunan iradiasi mengakibatkan penurunan rata-rata pada arus *short circuit* (Isc), tegangan *open circuit* (Voc), dan daya maksimum sekitar 0,761 A, 0,558 V, dan 17,034 W. Di sisi lain, Kenaikan suhu sel sekitar 10°C menyebabkan rata-rata tegangan *open circuit* dan daya maksimum terdapat penurunan sekitar 0,92 V dan 1,11182 W, sedangkan arus *short circuit* mengalami peningkatan sekitar 0,0015 A.

Berdasarkan simulasi dan pengujian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa emulator panel surya menggunakan *buck converter* telah berhasil mengeluarkan tegangan dan arus keluaran menyerupai karakteristik panel surya referensi yaitu Solkar 36 W dengan pengaturan pulsa kontrol oleh *gate drive* dan kendali PID serta pemodelan persamaan matematis panel surya di Arduino Uno.

Adapun saran sebagai pengembangan dari tulisan ini dapat dilakukan dengan pengendalian PWM pada emulator panel surya menggunakan *buck converter* dengan metode lainnya seperti metode algoritma MPPT atau metode lainnya yang dapat menstabilkan tegangan dan arus keluaran menjadi lebih baik.

REFERENSI

- [1] N. H. Sodikin *et al.*, “Rancang Bangun Prototipe Emulator Sel Surya Menggunakan *Buck converter* Berbasis Arduino,” *J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 9, no. 3, pp. 171–180, 2015, doi: <https://doi.org/10.23960/elc.v9n3.182>.
- [2] V. N. Setiawan, “Semester I-2023, Pemanfaatan EBT RI Capai 12,7 GW,” Jul. 2023. [Online]. Available: <https://www.cnbcindonesia.com/news/20230724085552-4-456641/semester-i-2023-pemanfaatan-ebt-ri-capai-127-gw#:~:text=Jakarta%2C> CNBC Indonesia %2D Kementerian Energi,%2C7 Megawatt (MW).
- [3] M. Ervin, dan Jamaaluddin, and M. Sidoarjo Jl Raya Gelam, “Pemanfaatan Solar Cell Sebagai Alternatif Energi Listrik Skala Rumah Tangga,” *Repos. Univ. Muhammadiyah Sidoarjo*, 2020, doi: <http://eprints.umsida.ac.id/id/eprint/7230>.
- [4] D. Joshi and S. Sharma, “.,” *Springer Link*, Jun. 01, 2019. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-6772-4_55
- [5] M. Alaoui, H. Maker, A. Mouhsen, and H. Hihi, “Photovoltaic Emulator of Different Solar Array Configurations Under Partial Shading Conditions Using Damping Injection Controller,” *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 11, no. 2, pp. 1019–1030, Jun. 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11.i2.pp1019-1030.
- [6] N. Amna, I. D. Sara, and T. Tarmizi, “Performa Konfigurasi Modul Surya Seri dan Seri Paralel pada Kondisi Mismatch Karakteristik Arus-Tegangan (I-V) terhadap

- Daya Output,” *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 17, no. 4, pp. 204–211, 2021, doi: 10.17529/jre.v17i4.22467.
- [7] V. Shashank, R. T. Srinivas, and P. S. Kulkarni, “Photovoltaic Emulator,” *J. CPRI*, vol. 11, no. 2, pp. 375–382, 2015, Accessed: Aug. 04, 2023. [Online]. Available: <https://cprijournal.in/index.php/pr/article/view/733>
- [8] R. Pido, S. Himran, and Mahmuiddin, “Analisa Pengaruh Pendinginan Sel Surya Terhadap Daya Keluaran dan Efisiensi,” *J. Tek. Mesin Teknol.*, vol. 19, no. 1, pp. 31–38, 2018, Accessed: Aug. 04, 2023. [Online]. Available: <https://ojs.unm.ac.id/teknologi/article/view/7858/4578>
- [9] R. Ayop, C. W. Tan, S. M. Ayob, N. D. Muhamad, J. J. Jamian, and Z. A. Noorden, “Photovoltaic Emulator Using Error Adjustment Fuzzy Logic Proportional-Integral Controller,” *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 1111–1118, Jun. 2022, doi: 10.11591/ijpeds.v13.i2.pp1111-1118.
- [10] T. Armaliany, “Rancang Bangun Instrumentasi Konverter Buck dengan Graphical User Interface,” *MSI Trans. Educ.*, vol. 03, no. 3, pp. 141–152, 2022, doi: <https://doi.org/10.46574/mted.v3i3.94>.
- [11] A. Anggawan and M. Yuhendri, “Implementasi Kendali Tegangan Output *Buck converter* Berbasis Simulink Matlab,” *J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 2, no. 1, pp. 34–39, 2020, doi: <https://doi.org/10.24036/jtein.v2i1.110>.
- [12] M. Jannah, “Perancangan Sistem Kendali Level Cairan Menggunakan Graphical User Interface (GUI) Matlab Berbasis Mikrokontroler,” Universitas Negeri Padang, 2022.
- [13] F. Yusivar, M. Y. Farabi, R. Suryadiningrat, W. W. Ananduta, and Y. Syaifudin, “Buck-Converter Photovoltaic Simulator,” *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 1, no. 2, pp. 156–167, 2011.
- [14] Krismadinata, N. A. Rahim, H. W. Ping, and J. Selvaraj, “Photovoltaic Module Modeling using Simulink/Matlab,” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 17, pp. 537–546, 2013, doi: 10.1016/j.proenv.2013.02.069.
- [15] A. V. Rana and H. H. Patel, “Current Controlled *Buck converter* based Photovoltaic Emulator,” *J. Ind. Intell. Inf.*, vol. 1, no. 2, pp. 91–96, 2013, doi: 10.12720/jiii.1.2.91-96.
- [16] S. Badri and K. Krismadinata, “Design of Boost Converter Integrated with Graphical User Interface,” *Motiv. J. Mech. Electr. Ind. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 31–42, 2020, doi: 10.46574/motivection.v2i1.40.
- [17] B. R. Ananda, *Implementasi Desain Buck converter dengan PID Controller Menggunakan Metode Tuning Genetic Algorithm (GA)*, Skripsi. Semarang: Universitas Negeri Semarang, 2020.
- [18] A. B. Pulungan, Sukardi, and T. Ramadhani, “*Buck converter* Sebagai Regulator Aliran Daya Pada Pengereman Regeneratif,” *J. EECCIS*, vol. 12, no. 2, pp. 93–97, 2018, [Online]. Available: <https://jurnaleeccis.ub.ac.id/index.php/eccis/article/view/551>
- [19] E. E. Wibowo, “Rancang Bangun *Buck converter* Sebagai Charging Baterai pada Sistem PLTS,” Padang, 2022. Accessed: Aug. 04, 2023. [Online]. Available: <http://repository.unp.ac.id/id/eprint/43838>
- [20] A. F. Rifai, W. Purnomo, and R. E. Putri, “Rancang Bangun Dc To Dc *Buck converter* Dengan Sistem Kendali Pi Pada Ni Elvis Ii Dan Antarmuka Berbasis Labview,” *JTT (Jurnal Teknol. Ter.*, vol. 7, no. 2, p. 129, 2021, doi:

- 10.31884/jtt.v7i2.333.
- [21] P. Harahap, “Implementasi karakteristik arus dan tegangan plts terhadap peralatan trainer energi baru terbarukan,” *Semin. Nas. Tek. UISU*, vol. 2, no. 1, pp. 152–157, 2019.
- [22] A. Kurniawan, “Perancangan Model dan Simulasi Modul Sel Surya Paralel Menggunakan MATLAB,” *J. Tek. Mesin, Ind. Elektro ...*, vol. 1, no. 3, 2022, [Online]. Available: <https://ejurnal.politeknikpratama.ac.id/index.php/jtmei/article/view/1249><https://ejurnal.politeknikpratama.ac.id/index.php/jtmei/article/download/1249/1217>