

Rancang Bangun Sistem Kontrol Buck Converter Menggunakan PSO-PI Dan GWO-PI

Muhammad Julian Ghani, Wahyu Setyo Pambudi*, Yuliyanto Agung Prabowo,
Novian Patria Uman Putra, Misbahul Munir, Titiek Suheta

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya

*Email : wahyusp@itats.ac.id

Abstrak—Variasi tegangan photovoltaic menuntut pengaturan buck converter yang stabil pada kondisi lapangan. Penelitian ini membandingkan dua konfigurasi pengendali PI dengan gain akhir hasil PSO dan GWO pada perangkat keras yang sama, yaitu panel photovoltaic, LM2596, Arduino Uno, sensor tegangan, INA219, dan lampu DC dengan setpoint 14 V. Kontribusi penelitian terletak pada perbandingan terkendali PSO-PI dan GWO-PI pada platform berbiaya rendah, evaluasi transien, serta pengujian tracking berulang selama empat minggu. Gain yang diterapkan adalah $K_p = 0,85$ dan $K_i = 420,0$ untuk PSO-PI serta $K_p = 0,92$ dan $K_i = 520,0$ untuk GWO-PI. Pada satu rekaman transien, waktu pemulihan GWO-PI sebesar 34 ms dan PSO-PI 40 ms; selisih ini dilaporkan secara deskriptif karena pengujian transien tidak diulang secara independen dan frekuensi akuisisinya tidak tercatat dalam dokumentasi eksperimen. Pengujian tracking menghasilkan 308 pasangan observasi untuk setiap metode (28 hari $\times$ 11 waktu pengamatan). MAE PSO-PI dan GWO-PI masing-masing sebesar 0,173 V dan 0,110 V, sedangkan RMSE masing-masing sebesar 0,184 V dan 0,115 V. Analisis terhadap 28 rerata harian menunjukkan penurunan error absolut berpasangan sebesar 0,0636 V (95% CI: 0,0563–0,0709 V; $t(27) = 17,85$; $p < 0,001$). Hasil tersebut mendukung akurasi tracking GWO-PI yang lebih baik pada beban lampu tetap. Ketika $V_{in} < 14$ V, kedua konfigurasi tidak mampu mempertahankan setpoint karena buck converter hanya dapat menurunkan tegangan. Generalisasi terhadap variasi beban dan perbandingan konvergensi algoritma masih memerlukan dokumentasi parameter optimasi yang lengkap, pengulangan transien independen, dan pengujian beban terkontrol.

Kata kunci: Buck Converter; Grey Wolf Optimizer; Particle Swarm Optimization; Photovoltaic; PI.

DOI: 10.22441/jte.2026.v17i3.010

PENDAHULUAN

Energi surya melalui sistem photovoltaic (PV) menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang banyak dikembangkan karena dapat menghasilkan listrik DC secara langsung. Namun, tegangan dan daya keluaran panel PV berubah mengikuti intensitas radiasi matahari, suhu, cuaca, sudut pemasangan, dan kondisi beban [1]. Perubahan tersebut menyebabkan tegangan yang diterima beban tidak selalu sesuai kebutuhan sehingga diperlukan konverter DC-DC sebagai antarmuka pengatur tegangan [2][3]

Buck converter digunakan ketika tegangan keluaran yang dibutuhkan lebih rendah daripada tegangan sumber. Konverter bekerja dengan mengatur *duty cycle* PWM pada saklar

elektronik sehingga energi yang disimpan pada induktor dan kapasitor dapat menghasilkan tegangan keluaran yang lebih rendah dan relatif stabil. Struktur yang sederhana dan efisiensi yang tinggi membuat *buck converter* banyak diterapkan pada sistem energi surya dan beban DC [4][5][6]. Walaupun demikian, tegangan keluaran masih dapat menyimpang dari nilai referensi ketika V_{in} berubah secara cepat.

Pengendali *proportional-integral* (PI) dipilih karena mudah diimplementasikan pada mikrokontroler dan mampu mengurangi *steady-state error* melalui aksi integral. Besarnya aksi koreksi sangat bergantung pada parameter K_p dan K_i . Nilai K_p yang terlalu kecil menghasilkan respons lambat, sedangkan nilai yang terlalu besar dapat menimbulkan *overshoot* atau osilasi. Nilai K_i yang terlalu kecil membuat error keadaan tunak bertahan lebih lama, sedangkan nilai yang terlalu besar dapat meningkatkan *overshoot* dan memicu integral windup [7][8]. Berdasarkan hal tersebut maka penentuan K_p dan K_i menjadi bagian penting dalam perancangan sistem kontrol. Namun, tantangan muncul dalam proses tuning parameter K_p dan K_i , yang menentukan kinerja pengendali. Teknik konvensional seperti *Ziegler-Nichols* sering tidak cukup tangguh menghadapi dinamika sistem nonlinier atau ketidakpastian parameter [9].

Pengaturan parameter secara manual membutuhkan banyak percobaan dan belum tentu menghasilkan kombinasi parameter terbaik. Metode metaheuristik dapat digunakan untuk mengevaluasi ruang parameter secara lebih luas [10]. *Particle Swarm Optimization* (PSO) memperbarui kandidat berdasarkan pengalaman terbaik partikel dan solusi terbaik populasi, sedangkan *Grey Wolf Optimizer* (GWO) mengarahkan pencarian berdasarkan tiga kandidat terbaik, yaitu α , β , dan δ [11][12]. Perbedaan mekanisme tersebut dapat menghasilkan karakteristik konvergensi dan respons kendali yang berbeda.

PSO dan GWO banyak digunakan untuk penalaan pengendali karena menyediakan mekanisme pencarian global yang berbeda [11][12]. Penelitian mutakhir menerapkan GWO pada pengendali *adaptive backstepping buck converter* untuk meningkatkan penolakan gangguan [13] dan pada penalaan PI *buck converter* nonideal dengan variasi tegangan masukan serta resistansi beban [14]. Demir membandingkan PSO dan GWO untuk optimasi pengendali dan komponen DC-DC pada sistem quadrotor berbasis *fuel cell*, tetapi evaluasinya berfokus pada konsumsi energi dan tracking lintasan [15]. Studi-studi tersebut belum memberikan perbandingan lapangan berulang antara dua konfigurasi gain PI pada satu platform PV–LM2596–Arduino

berbiaya rendah dengan perangkat, setpoint, beban, jadwal pengamatan, dan indikator *error* yang sama.

Kebaruan penelitian ini bukan berupa algoritma optimasi baru. Kontribusi ilmiahnya adalah: (1) protokol perbandingan langsung yang mengisolasi perbedaan gain PSO-PI dan GWO-PI pada perangkat keras yang sama; (2) penggabungan indikator transien dengan 308 pasangan data tracking lapangan selama empat minggu dan analisis statistik berpasangan; serta (3) pemisahan yang eksplisit antara keterbatasan pengendali dan batas fisik topologi buck ketika V_{in} berada di bawah *setpoint*. Dengan posisi tersebut, penelitian ini memberikan bukti komparatif atas implementasi, bukan mengklaim pengembangan varian PSO atau GWO yang baru.

Permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini adalah bagaimana merancang sistem kontrol *buck converter* dengan sumber PV, bagaimana penerapan PSO-PI dan GWO-PI dalam mempertahankan tegangan keluaran pada setpoint 14 V, dan metode mana yang memberikan kinerja lebih baik. Evaluasi dilakukan berdasarkan waktu pemulihan, kedekatan rata-rata V_{out} terhadap *setpoint*, *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), error maksimum, bias, *Integral Absolute Error* (IAE), *Integral of Squared Error* (ISE), serta konsistensi tracking ketika tegangan masukan berubah.

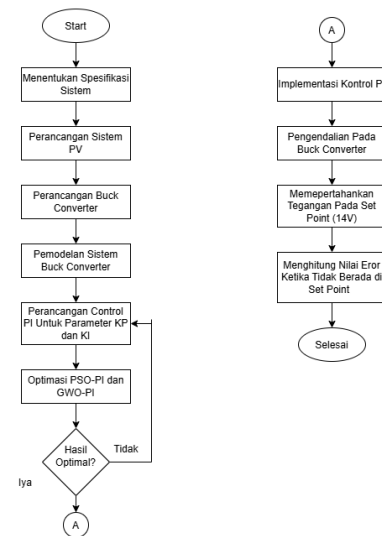
METODE PENELITIAN

A. Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Sidoarjo pada Mei sampai Juli 2026. Tahap perancangan dan realisasi menggunakan panel photovoltaic, *buck converter* LM2596, Arduino Uno, sensor tegangan, INA219, RTC DS3231, modul microSD, dan lampu DC. Pengujian tracking berulang dilakukan selama empat minggu berturut-turut; setiap minggu mencakup tujuh hari dan setiap hari dicatat 11 kali pada pukul 07.00-17.00 dengan interval satu jam. Dengan demikian, setiap metode menghasilkan 308 observasi yang dipasangkan berdasarkan minggu, hari, dan waktu pengukuran. Beban lampu DC dipertahankan tetap sehingga penelitian ini tidak mengevaluasi *robustness* terhadap variasi beban terkontrol. Pengujian transien menghasilkan satu rekaman untuk setiap metode. Frekuensi akuisisi rekaman transien tidak tercatat dalam dokumentasi eksperimen sehingga hasil waktu pemulihan hanya dianalisis secara deskriptif.

B. Tahapan Penelitian

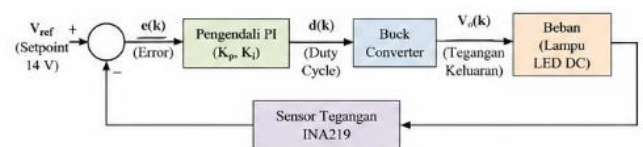
II. Penelitian dimulai dengan studi literatur mengenai PV, *buck converter*, pengendali PI, PSO, dan GWO. Selanjutnya dilakukan perencanaan sistem, perakitan perangkat keras, pemodelan plant, penentuan batas pencarian K_p dan K_i , penerapan gain akhir hasil PSO dan GWO, implementasi parameter pada Arduino, pengujian komponen, pengujian terhadap perubahan V_{in} , pencatatan data, serta analisis perbandingan kinerja. Jika respons belum memenuhi kriteria kestabilan, pemodelan dan penalaan perlu diulang sebelum implementasi. Diagram alir perancangan sistem ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir perancangan sistem.

A. Perancangan Sistem

Sistem dirancang dalam bentuk loop tertutup. Panel PV menghasilkan V_{in} yang berubah sesuai kondisi lingkungan. Sensor tegangan membaca V_{in} , sedangkan INA219 mengukur V_{out} , arus, dan daya pada sisi keluaran. Arduino Uno membandingkan V_{out} dengan tegangan referensi 14 V untuk memperoleh error. Nilai error diproses oleh pengendali PI dan dikonversi menjadi *duty cycle* PWM yang mengatur *buck converter*. RTC dan microSD digunakan untuk menyimpan data pengujian berdasarkan waktu pengambilan. Diagram blok sistem kontrol *buck converter* ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram blok sistem kontrol *buck converter*.

B. Perancangan Buck Converter dan Pengendali PI

Buck converter yang digunakan adalah LM2596 dengan rentang tegangan masukan 4,5-40 V, arus keluaran hingga 3 A, frekuensi switching sekitar 150 kHz, serta tegangan keluaran yang dapat diatur. Pada kondisi ideal, *duty cycle* menentukan perbandingan tegangan keluaran terhadap masukan. Dalam implementasi *closed-loop*, *duty cycle* tidak ditetapkan tetap, tetapi dikoreksi oleh pengendali PI berdasarkan error tegangan.

$$e(k) = V_{ref} - V_{out}(k) \quad (1)$$

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T_s \sum_{i=0}^k e(i) \quad (2)$$

Persamaan (1) menunjukkan *error* pada setiap waktu sampling, sedangkan (2) merupakan bentuk diskrit pengendali PI. Komponen proporsional memberikan aksi berdasarkan error saat ini dan komponen integral mengakumulasi *error* untuk mengurangi penyimpangan keadaan tunak. Keluaran $u(k)$ digunakan sebagai dasar perubahan PWM dengan batas operasi yang disesuaikan terhadap rangkaian.

C. Optimasi Parameter PI Menggunakan PSO dan GWO

Setiap kandidat solusi dari PSO dan GWO direpresentasikan sebagai $x = [Kp, Ki]$ dengan batas $Kp = [0,001-0,05]$ $Ki = [1-200]$ dan dievaluasi pada model buck converter yang sama. Fungsi objektif yang dapat diverifikasi dari skrip pendukung adalah IAE, sehingga solusi dengan JIAE terkecil dipilih menggunakan persamaan (3). Kedua algoritma menggunakan 30 partikel/agen dan 50 iterasi. Parameter PSO adalah $\omega = 0,7$ dan $c_1 = c_2 = 1,5$, sedangkan parameter GWO menurun secara linier menurut $a = 2(1 - r/R_{max})$. Posisi kandidat dibatasi sesuai rentang pencarian. Optimasi dihentikan setelah 50 iterasi tanpa kriteria penghentian dini. Masing-masing algoritma dijalankan satu kali tanpa penetapan random seed, sehingga hasil dapat sedikit berbeda pada pengulangan berikutnya. Pada PSO, kecepatan dan posisi partikel diperbarui dari bobot inersia, personal best, dan global best. Pada GWO, posisi agen diarahkan oleh solusi alpha, beta, dan delta, sedangkan koefisien a menurun secara linier dari 2 menuju 0. Gain akhir yang diterapkan pada perangkat keras ditunjukkan pada Tabel 1.

$$JIAE = IAE = \sum_{k=1}^N |V_{ref} - V_{out}(k)| T_s \quad (3)$$

$$v_i(r+1) = \omega v_i(r) - c_1 r_1 [pbest_i - x_i(r)] + c_2 r_2 [gbest - x_i(r)] \quad (4)$$

$$x_i(r+1) = x_i(r) + v_i(r+1) \quad (5)$$

$$x_i(r+1) = \min\{\max[x_i(r+1), Xmin], Xmax\} \quad (6)$$

$$A_j = 2ar_{1,j} - a, C_j = 2r_{2,j} \quad (7)$$

$$a = 2(1 - r/R_{max}) \quad (8)$$

$$D\alpha = |C1X\alpha - x_i(r)| \quad (9)$$

$$D\beta = |C2X\beta - x_i(r)| \quad (10)$$

$$D\delta = |C3X\delta - x_i(r)| \quad (11)$$

$$X1 = X\alpha - A1D\alpha \quad (12)$$

$$X2 = X\beta - A2D\beta \quad (13)$$

$$X3 = X\delta - A3D\delta \quad (14)$$

$$x_i(r+1) = \frac{X1+X2+X3}{3} \quad (15)$$

Pada Persamaan (4), v_i adalah kecepatan partikel, x_i adalah kandidat $[Kp, Ki]$, ω adalah bobot inersia, c_1 dan c_2 adalah koefisien kognitif dan sosial, r_1 dan r_2 adalah bilangan acak $[0,1]$, sedangkan pbest dan gbest menyatakan solusi terbaik partikel dan populasi. Persamaan (5) memperbarui posisi partikel dan Persamaan (6) membatasi kandidat pada Xmin dan Xmax. Pada GWO, Persamaan (7)–(8) membentuk koefisien pencarian, Persamaan (9)–(11) menghitung jarak agen terhadap alpha, beta, dan delta, Persamaan (12)–(14) menghasilkan tiga posisi kandidat, dan Persamaan (15) menentukan posisi baru dari rata-rata ketiganya.

Reproduksi penuh tahap penalaan memerlukan protokol prospektif yang menyimpan seluruh konfigurasi optimasi dan riwayat setiap run.

Tabel 1. Parameter PI Hasil Optimasi.

Metode	Kp	Ki	Dasar pembaruan
PSO-PI	0,85	420,0	pbest dan gbest
GWO-PI	0,92	520,0	alpha, beta, delta

D. Teknik Analisis Kinerja

Kinerja sistem dibandingkan menggunakan waktu pemulihan, rata-rata V_{out} , MAE, RMSE, error maksimum, bias, IAE, ISE, dan simpangan baku. Waktu pemulihan diukur sejak Vin kembali pada rentang yang memungkinkan *buck converter* mencapai 14 V hingga V_{out} masuk dan bertahan dalam batas toleransi $\pm 2\%$, yaitu 13,72–14,28 V. MAE dan RMSE pada Persamaan (16) dan (17) mengukur besar *error tracking*, sedangkan bias menunjukkan arah *offset* terhadap *setpoint*. ISE dan IAE pada Persamaan (18) dan (19) mengukur akumulasi error selama jendela evaluasi.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^2(k) \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^2(k)} \quad (17)$$

$$ISE = \sum_{k=1}^N e^2(k) T_s \quad (18)$$

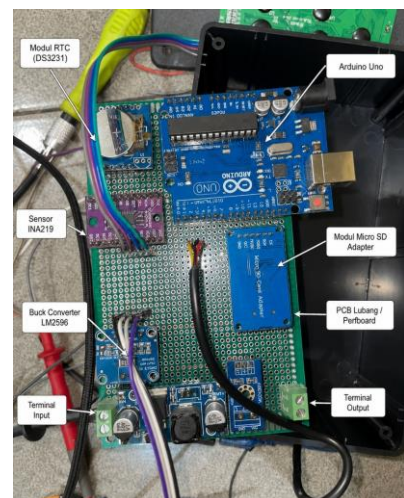
$$IAE = \sum_{k=1}^N |e(k)| T_s \quad (19)$$

Untuk validasi empat minggu, 11 pengamatan per hari dipasangkan berdasarkan minggu, hari, dan jam pengukuran. Agar pengukuran berulang dalam hari yang sama tidak diperlakukan sebagai replikasi independen, analisis inferensial menggunakan 28 rata-rata error absolut harian sebagai unit analisis. Perbedaan berpasangan dievaluasi dengan paired t-test dua sisi pada $\alpha = 0,05$ dan interval kepercayaan 95%; Wilcoxon signed-rank test digunakan sebagai pemeriksaan nonparametrik, sedangkan Cohen's dz melaporkan besar efek. Metrik dari rekaman transien tunggal dilaporkan secara deskriptif dan tidak dimasukkan ke dalam pengujian signifikansi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Implementasi Sistem Pengujian

Realisasi perangkat keras terdiri dari Arduino Uno sebagai pusat pengendali, *buck converter* LM2596, INA219, sensor tegangan DC, RTC DS3231, modul microSD, serta terminal input dan output. Sistem berhasil melakukan pembacaan sensor, pengolahan *error*, pembangkitan PWM, pemantauan parameter, dan penyimpanan data. Integrasi perangkat keras ditunjukkan pada Gambar 3.



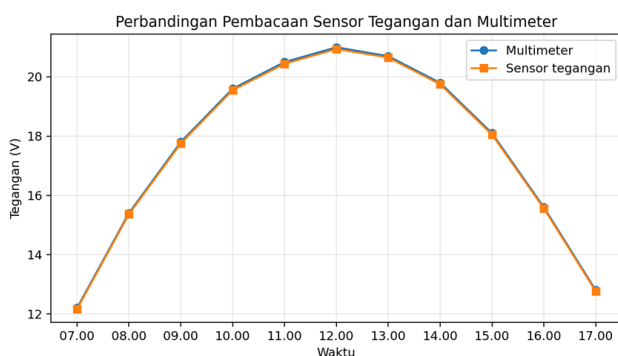
Gambar 3. Realisasi perangkat keras sistem kontrol *buck converter*.

B. Uji Sensor Tegangan

Tabel 2. Hasil Uji Sensor Tegangan PV.

Waktu	Multimeter (V)	Sensor (V)	Error (%)
07.00	12,20	12,16	0,32
12.00	21,00	20,94	0,28
14.00	19,80	19,75	0,25
17.00	12,80	12,76	0,31

Sensor tegangan diuji pada 11 titik waktu antara pukul 07.00 dan 17.00 dengan membandingkan pembacaan sensor terhadap multimeter digital. Pada rentang 12,20–21,00 V, selisih pembacaan berada pada 0,04–0,06 V dan rata-rata *error* sebesar 0,298%. Tabel 2 menampilkan empat titik representatif, sedangkan Gambar 4 menunjukkan seluruh 11 titik. Hasil tersebut menunjukkan sensor mampu mengikuti perubahan tegangan sumber dengan penyimpangan kecil sehingga layak digunakan sebagai data monitoring dan umpan balik pengendali.



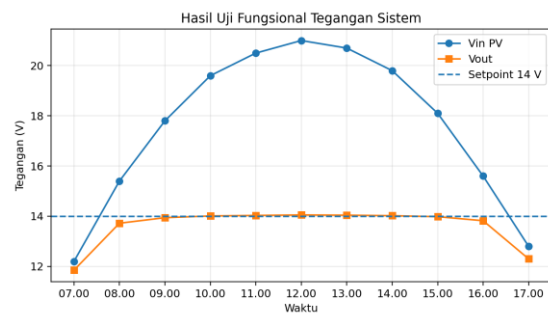
Gambar 4. Perbandingan pembacaan sensor tegangan dan multimeter.

C. Uji Buck Converter dan INA219

Pengujian *buck converter* dan INA219 dilakukan untuk memastikan tegangan keluaran, arus, dan daya dapat dibaca secara konsisten. Ketika V_{in} meningkat dari 12,20 V menjadi 21,00 V, V_{out} bergerak dari 11,85 V menuju sekitar 14,05 V. Setelah V_{in} mencukupi, *error* terhadap setpoint berada pada rentang kecil. Daya keluaran meningkat mengikuti perubahan tegangan dan arus beban. Hasil ini menunjukkan plant dan sensor arus-tegangan bekerja sesuai fungsi sebelum dibandingkan menggunakan parameter PSO-PI dan GWO-PI, hasil uji *buck converter* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 5.

Tabel 3. Hasil Uji *Buck Converter* dan INA219.

Waktu	V_{in} (V)	V_{out} (V)	Arus (A)	Daya (W)
07.00	12,20	11,85	0,32	3,79
10.00	19,60	14,01	0,46	6,44
12.00	21,00	14,05	0,50	7,02
15.00	18,10	13,98	0,44	6,15
17.00	12,80	12,30	0,31	3,81



Gambar 5. Hasil uji fungsional tegangan sistem.

D. Implementasi Parameter PSO-PI dan GWO-PI

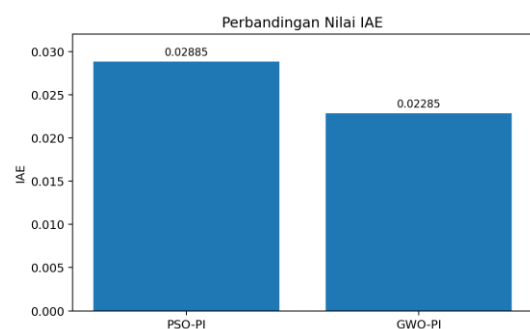
Parameter hasil optimasi diterapkan pada program Arduino secara bergantian (Gambar 6). PSO-PI menggunakan $K_p = 0,85$ dan $K_i = 420,0$, sedangkan GWO-PI menggunakan $K_p = 0,92$ dan $K_i = 520,0$. Nilai PWM yang dihasilkan berubah mengikuti *error* tegangan. Tampilan pemantauan digunakan untuk memastikan metode aktif dan parameter pengendali telah diterapkan sebelum pengambilan data.



Gambar 6. Implementasi parameter PSO-PI dan GWO-PI pada Arduino.

E. Perbandingan Nilai IAE PSO-PI dan GWO-PI

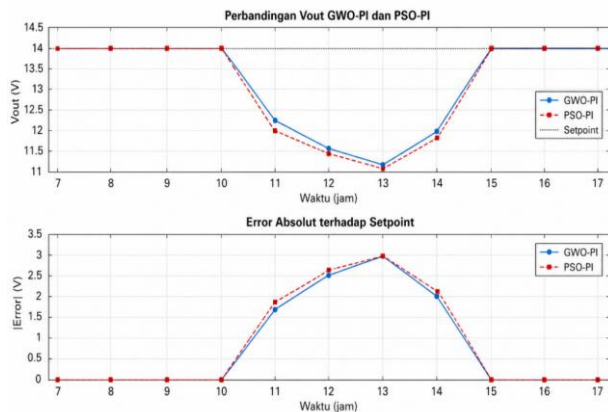
Pada rekaman evaluasi yang digunakan, IAE konfigurasi PSO-PI sebesar 0,02885 dan konfigurasi GWO-PI sebesar 0,02285 (Gambar 7). Nilai yang lebih kecil menunjukkan akumulasi *error* terhadap setpoint yang lebih rendah pada jendela evaluasi tersebut. Secara deskriptif, konfigurasi gain GWO-PI menurunkan IAE sekitar 21,57% terhadap PSO-PI. Hasil ini merupakan perbandingan dua konfigurasi gain yang diterapkan dan bukan bukti perbedaan konvergensi stokastik kedua algoritma.



Gambar 7. Perbandingan nilai IAE PSO-PI dan GWO-PI.

F. Perbandingan Respons Tegangan PSO-PI dan GWO-PI

Pada rekaman pengujian yang ditampilkan, kedua konfigurasi mampu mempertahankan tegangan keluaran mendekati setpoint 14 V ketika tegangan masukan mencukupi. Selama penurunan V_{in} , kurva GWO-PI cenderung sedikit lebih dekat terhadap referensi dibandingkan PSO-PI (Gambar 8). Setelah V_{in} kembali ke rentang kerja *buck converter*, kedua konfigurasi kembali mencapai sekitar 14 V. Perbedaan ini selanjutnya dilaporkan melalui waktu pemulihan dan metrik error dengan pemisahan antara hasil transien tunggal dan pengamatan tracking empat minggu.

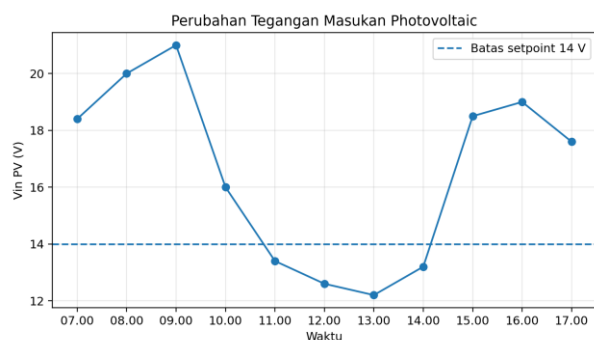


Gambar 8. Perbandingan Vout dan error PSO-PI serta GWO-PI.

G. Respons terhadap Perubahan Tegangan Masukan PV

Tabel 4. Respons Sistem terhadap Perubahan V_{in} PV.

Waktu	V_{in} (V)	Vout PSO (V)	Vout GWO (V)
07.00	18,4	14,00	14,00
09.00	21,0	14,00	14,00
11.00	13,4	12,08	12,08
12.00	12,6	11,36	11,36
13.00	12,2	11,00	11,00
14.00	13,2	11,90	11,90
15.00	18,5	14,00	14,00
17.00	17,6	14,00	14,00



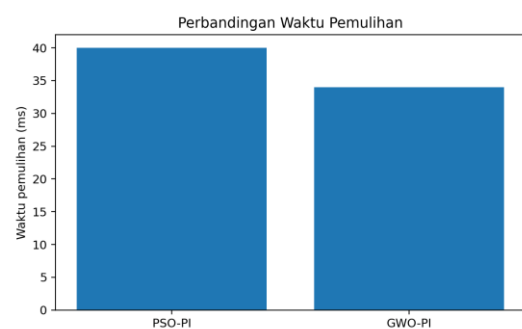
Gambar 9. Perubahan tegangan masukan photovoltaic.

Perubahan kondisi cuaca menyebabkan V_{in} berubah sepanjang pengujian. Tegangan masukan meningkat hingga sekitar 21 V pada pagi hari dan turun hingga 12,2 V pada siang hari sebelum kembali meningkat. Ketika V_{in} berada di atas kebutuhan setpoint, PSO-PI dan GWO-PI mampu

mempertahankan V_{out} pada 14 V. Ketika V_{in} turun di bawah 14 V, V_{out} ikut menurun karena *buck converter* tidak memiliki kemampuan menaikkan tegangan. Respons Sistem terhadap Perubahan V_{in} PV seperti pada Tabel 4.

Penurunan tegangan keluaran pada periode V_{in} di bawah 14 V tidak menunjukkan ketidakstabilan pengendali (Gambar 9). Kondisi tersebut berasal dari batas topologi plant. Walaupun *duty cycle* telah dikoreksi oleh pengendali, *buck converter* hanya dapat menghasilkan keluaran lebih rendah daripada tegangan masukan. Oleh karena itu, apabila keluaran 14 V harus dipertahankan pada seluruh kondisi sumber, sistem perlu dikembangkan menggunakan *buck-boost converter* atau penyimpanan energi.

H. Analisis Waktu Pemulihan



Gambar 10. Perbandingan waktu pemulihan PSO-PI dan GWO-PI.

Pada satu rekaman transien untuk setiap konfigurasi, waktu pemulihan PSO-PI sekitar 40 ms dan GWO-PI sekitar 34 ms (Gambar 10). Dengan acuan PSO-PI, selisih deskriptifnya adalah 6 ms atau sekitar 15%. Karena pengujian transien tidak diulang secara independen dan frekuensi akuisisinya tidak tersimpan dalam dokumentasi eksperimen, selisih tersebut tidak digunakan untuk menyimpulkan signifikansi statistik atau keunggulan umum algoritma. Hasil hanya menunjukkan bahwa pada rekaman yang diamati, konfigurasi gain GWO-PI mencapai kembali batas toleransi lebih cepat tanpa osilasi berlebihan.

I. Perbandingan Metrik Tracking

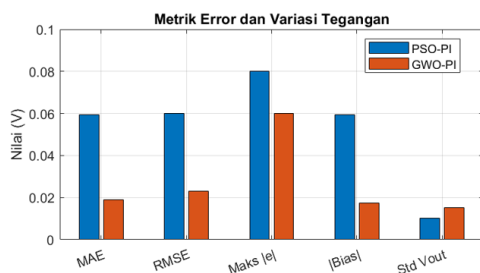
Matriks pada Tabel 5 dihitung dari rekaman tracking transien yang sama sehingga diperlakukan sebagai hasil deskriptif. Rata-rata V_{out} konfigurasi GWO-PI sebesar 14,017 V, lebih dekat terhadap 14 V dibandingkan PSO-PI sebesar 14,059 V. MAE GWO-PI sebesar 0,019 V dan RMSE 0,023 V, sedangkan PSO-PI menghasilkan MAE 0,059 V dan RMSE 0,060 V. Error maksimum dan bias GWO-PI juga lebih rendah, sementara PSO-PI memiliki simpangan baku yang sedikit lebih kecil terhadap rata-ratanya. Konsistensi jangka panjang dan signifikansi perbedaan dievaluasi terpisah menggunakan data empat minggu pada Tabel 7.

Simpangan baku PSO-PI sebesar 0,010 V menunjukkan data lebih rapat terhadap rata-rata dibandingkan GWO-PI sebesar 0,015 V. Namun, rata-rata PSO-PI memiliki *offset* yang lebih besar dari *setpoint*. Dengan demikian, kestabilan tidak dapat dinilai hanya dari simpangan baku; kedekatan terhadap referensi perlu dinilai bersama MAE, RMSE, bias, dan error maksimum

(Gambar 11). Berdasarkan indikator tersebut, GWO-PI memberikan akurasi tracking yang lebih baik.

Tabel 5. Perbandingan Metrik Kinerja PSO-PI dan GWO-PI.

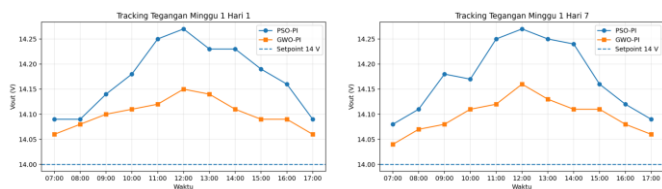
Parameter	PSO-PI	GWO-PI
Waktu pemulihan	40 ms	34 ms
Rata-rata Vout	14,059 V	14,017 V
MAE	0,059 V	0,019 V
RMSE	0,060 V	0,023 V
Maksimum e	0,080 V	0,060 V
Bias	0,059 V	0,017 V
Simpangan baku	0,010 V	0,015 V
IAE relatif	100%	32%
ISE relatif	100%	15%



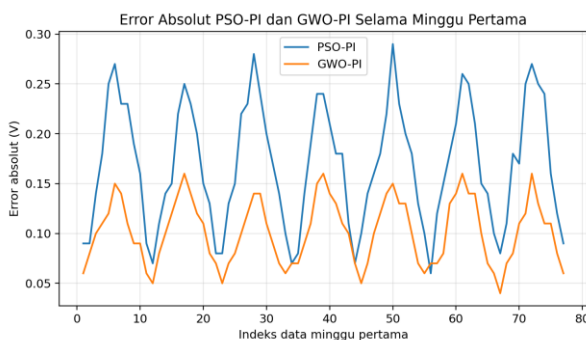
Gambar 11. Perbandingan MAE, RMSE, error maksimum, bias, dan simpangan baku.

J. Tracking Minggu Pertama

Pengujian harian selama minggu pertama memperlihatkan kedua metode tetap berada dekat setpoint ketika Vin mencukupi. Kurva PSO-PI dan GWO-PI pada beberapa hari hampir berhimpit, tetapi GWO-PI cenderung memiliki deviasi awal dan *error* absolut yang lebih rendah. Contoh tracking pada hari pertama dan hari ketujuh ditunjukkan pada Gambar 12. Setelah fase transien, error kedua metode membentuk riak kecil dan tidak berkembang menjadi osilasi berkelanjutan.



Gambar 12. Tracking Vout pada hari pertama dan hari ketujuh.



Gambar 13. Error absolut PSO-PI dan GWO-PI selama minggu pertama.

Error absolut gabungan selama tujuh hari menunjukkan PSO-PI memiliki deviasi awal sekitar 0,06 V, sedangkan GWO-PI sekitar 0,04 V (Gambar 13). Setelah fase awal, kedua metode tetap menghasilkan error yang kecil, tetapi amplitudo GWO-PI cenderung lebih rendah. Pola tersebut mendukung hasil MAE, RMSE, dan bias yang menunjukkan bahwa GWO-PI lebih dekat dengan setpoint.

K. Ringkasan Hasil Pengujian

Pada rekaman transien yang dievaluasi, konfigurasi gain GWO-PI menghasilkan waktu pemulihan, MAE, RMSE, error maksimum, bias, IAE, dan ISE yang lebih rendah, sedangkan PSO-PI memiliki simpangan baku yang sedikit lebih kecil terhadap rata-ratanya. Ketika Vin berada di bawah setpoint, kedua konfigurasi memiliki keterbatasan yang sama karena plant berupa buck converter. Ringkasan deskriptif pada Tabel 6 harus dibaca bersama analisis repetabilitas empat minggu pada Tabel 7 dan tidak digunakan untuk menyatakan keunggulan konvergensi algoritma optimasi.

Tabel 6. Ringkasan Hasil Pengujian.

Peringkat	Metode	Keunggulan utama	Keterbatasan utama
1	GWO-PI	Recovery, MAE, RMSE, bias, IAE, ISE lebih baik	Simpangan baku sedikit lebih besar
2	PSO-PI	Respons stabil dan variasi terhadap rata-rata kecil	Offset dan error lebih besar dari GWO-PI

L. Analisis Repetabilitas Empat Minggu

Tabel 7. Analisis Repetabilitas Tracking Empat Minggu.

Parameter	PSO-PI	GWO-PI	Interpretasi statistik
Jumlah observasi	308	308	28 hari $\times$ 11 waktu pengamatan
Rata-rata Vout $\pm$ SD	14,173 $\pm$ 0,061 V	14,110 $\pm$ 0,033 V	GWO-PI lebih dekat ke 14 V
MAE	0,173 V	0,110 V	Turun 36,7%
RMSE	0,184 V	0,115 V	Turun 37,7%
Pasangan lebih baik	7/308	292/308	9 pasangan sama
Selisih MAE harian	—	0,0636 V	95% CI 0,0563–0,0709 V; $t(27)=17,85$; $p<0,001$

Pengujian tracking empat minggu menghasilkan 308 pasangan tegangan keluaran untuk setiap metode (4 minggu $\times$ 7 hari $\times$ 11 waktu pengamatan). Rata-rata Vout PSO-PI adalah $14,173 \pm 0,061$ V dan GWO-PI $14,110 \pm 0,033$ V. Dibandingkan setpoint 14 V, MAE turun dari 0,173 V menjadi 0,110 V (36,7%), sedangkan RMSE turun dari 0,184 V menjadi 0,115 V (37,7%). GWO-PI menghasilkan error absolut lebih kecil pada 292 dari 308 pasangan (94,8%), sama pada 9 pasangan, dan lebih besar pada 7 pasangan. Pada 28 rata-rata harian, penurunan error absolut berpasangan sebesar 0,0636 V dengan 95% CI 0,0563–0,0709 V; paired t-test menghasilkan $t(27) = 17,85$, $p < 0,001$, dan effect size Cohen's $d_z = 3,37$. Wilcoxon signed-rank test juga menghasilkan $p < 0,001$. Hasil ini menunjukkan bahwa tracking GWO-PI lebih dekat terhadap setpoint dan konsisten

selama periode pengamatan pada beban lampu tetap, semua hasil dirangkum pada tabel 7.

KESIMPULAN

Sistem kontrol *buck converter* berbasis photovoltaic dengan dua konfigurasi gain PI berhasil direalisasikan pada setpoint 14 V. PSO-PI menggunakan $K_p = 0,85$ dan $K_i = 420,0$, sedangkan GWO-PI menggunakan $K_p = 0,92$ dan $K_i = 520,0$. Pada satu rekaman transien, waktu pemulihan GWO-PI sebesar 34 ms dan PSO-PI 40 ms; hasil ini bersifat deskriptif. Pada 308 pasangan pengamatan tracking empat minggu, konfigurasi GWO-PI menurunkan MAE dari 0,173 V menjadi 0,110 V dan RMSE dari 0,184 V menjadi 0,115 V. Analisis terhadap 28 rata-rata harian menunjukkan penurunan *error* absolut berpasangan 0,0636 V (95% CI 0,0563–0,0709 V; $p < 0,001$), sehingga konfigurasi gain GWO-PI dinilai lebih akurat pada beban lampu tetap dan kondisi pengujian yang digunakan. Ketika V_{in} turun di bawah 14 V, kedua konfigurasi tidak dapat mempertahankan setpoint karena batas fisik *buck converter*. Kesimpulan tidak mencakup keunggulan konvergensi stokastik PSO terhadap GWO, dan generalisasi terhadap variasi beban memerlukan pengujian prospektif dengan konfigurasi optimasi yang terdokumentasi serta pengulangan transien independen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, dosen pembimbing, serta seluruh pihak yang telah membantu proses perancangan, pengujian, pengolahan data, dan penyusunan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. S. Abid, W. S. Pambudi, T. Suheta, T. Wati, and M. Munir, "Analisa Efisiensi Daya Solarcell dengan Integrasi Sistem Pendingin," *BEES Bull. Electr. Electron. Eng.*, vol. 4, no. 3, pp. 123–132, 2024.
- [2] D. H. Sinaga, R. R. O. Sasue, and H. D. Hutahaean, "Pemanfaatan Energi Terbarukan Dengan Menerapkan Smart Grid Sebagai Jaringan Listrik Masa Depan," *J. Zetroem*, vol. 3, no. 1, pp. 11–17, 2021.
- [3] R. M. Rizki and I. A. Bangsa, "Pemanfaatan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) pada gedung UPHB PT Pembangkit Jawa Bali Unit Muara Karang," *Aisyah J. Informatics Electr. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 67–75, 2023.
- [4] D. M. Dharmawan, "Rancang Bangun DC/DC Buck Converter Satu Fasa untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya." 2022.
- [5] S. M. Ilman, U. S. Septiani, and N. M. Mulyono, "Desain dan Implementasi Konverter DC-DC Buck dengan Daya Keluaran 50W," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 13, no. 3S1, 2025.
- [6] C. F. Ardhani *et al.*, "DENGAN SOLAR CELL," vol. 14, no. 2, pp. 230–239.
- [7] M. A. Şen and M. Kalyoncu, "Optimal Tuning of PID Controller Using Grey Wolf Optimizer Algorithm for Quadraped Robot," vol. 6, no. 1, pp. 29–35, 2018, doi: 10.17694/bajece.401992.
- [8] P. Studi *et al.*, "Optimal PI untuk Kontrol Bidirectional DC – DC Converter charge-discharge Baterai Optimal PI untuk Kontrol Bidirectional DC – DC Converter charge-discharge Baterai Habib Brilian Wicaksono Rifqi Firmansyah , Nanda Eka Saputra Abstrak," pp. 238–244, 2023.
- [9] L. C. Borin, E. Mattos, C. R. D. Osorio, G. G. Koch, and V. F. Montagner, "Robust PID Controllers Optimized by PSO Algorithm for Power Converters," *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electron. Conf. 5th IEEE South. Power Electron. Conf. COBEP/SPEC 2019*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065642.
- [10] E. Isen, "Determination of Different Types of Controller Parameters Using Metaheuristic Optimization Algorithms for Buck Converter Systems," *IEEE Access*, vol. 10, no. December, pp. 127984–127995, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3227347.
- [11] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 69, pp. 46–61, 2014, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
- [12] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," pp. 1942–1948, 1995.
- [13] S. M. Ghamari, F. Khavari, and H. Mollaei, "Adaptive backstepping controller design for DC/DC buck converter optimised by grey wolf algorithm," *IET Energy Syst. Integr.*, vol. 6, no. 1, pp. 8–30, 2024, doi: 10.1049/esi2.12098.
- [14] J. Dutta, R. Das, and A. Yadav, "PI controller design for non-ideal DC-DC buck converter using grey wolf optimization algorithm," 2026.
- [15] H. G. Demir, "Grey Wolf Optimization- and Particle Swarm Optimization-Based {PD/I} Controllers and {DC/DC} Buck Converters Designed for {PEM} Fuel Cell-Powered Quadrotor," *Drones*, vol. 9, no. 5, p. 330, 2025.