Jejakdigital
JURNAL ILMIAH MULTIDISIPLIN
Available online at https://indojurnal.com/index.php/jejakdigital

eISSN 3089-7734; pISSN 3089-7742
Vol. 2, No.6, Tahun 2026
doi.org/10.63822/wj8bnq96
Hal. 11620-11630

Metode PSO untuk Tuning *PI Controller* dalam Mengatur Kestabilan Tegangan *Cuk Converter*

Daeng Dwi Saputra [1], Rifqi Firmansyah [2]
Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia [1,2]

*Email Korespodensi: daengdsaputra@gmail.com

Sejarah Artikel:

Diterima 14-11-2026
Disetujui 19-11-2026
Diterbitkan 21-11-2026

ABSTRACT

The Cuk converter is a DC-DC converter widely used in power electronics applications, such as solar photovoltaic and battery systems, due to its ability to step up and step down the output voltage. However, its output voltage regulation still relies on the duty cycle, requiring an effective control strategy to improve system response performance. This study proposes a PI Controller with proportional (K_p) and integral (K_i) parameters optimized using the metaheuristic Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. The performance of the PI-PSO controller is evaluated and compared with other control methods based on the Integral Time Absolute Error (ITAE) and transient response characteristics. The results demonstrate that PSO can effectively determine optimal PI parameters, resulting in a lower ITAE value and reduced system error. Furthermore, the PI-PSO controller achieves faster rise time and settling time, while maintaining the overshoot within an acceptable tolerance range. Therefore, integrating PSO into PI Controller parameter optimization effectively improves the response performance and output voltage stability of the Cuk converter.

***Keywords**: Cuk converter; PI Controller; Particle Swarm Optimization (PSO).*

ABSTRAK

Cuk converter merupakan konverter DC-DC yang banyak digunakan dalam aplikasi elektronika daya, seperti sistem panel surya dan baterai, karena kemampuannya menaikkan maupun menurunkan tegangan keluaran. Namun, pengaturan tegangan keluarannya masih bergantung pada nilai *duty cycle*, sehingga diperlukan sistem pengendalian untuk meningkatkan kinerja responsnya. Penelitian ini mengusulkan penggunaan *PI Controller* dengan optimasi parameter proporsional (K_p) dan integral (K_p) menggunakan metode metaheuristik *Particle Swarm Optimization* (PSO). Kinerja pengendali PI-PSO dievaluasi dan dibandingkan dengan metode pengendali lainnya berdasarkan nilai *Integral Time Absolute Error* (ITAE) serta karakteristik respons transien. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode PSO mampu menghasilkan parameter PI yang optimal, ditunjukkan oleh nilai ITAE yang lebih rendah sehingga kesalahan sistem dapat diminimalkan. Selain itu, pengendali PI-PSO menghasilkan waktu *rise time* dan *settling time* yang lebih cepat, dengan nilai *overshoot* yang tetap berada dalam batas toleransi. Dengan demikian, penerapan PSO dalam optimasi parameter PI Controller terbukti mampu meningkatkan kinerja respons dan stabilitas tegangan keluaran *cuk converter*..

Katakunci: *Cuk converter; PI Controller; Particle Swarm Optimization (PSO).*

Bagaimana Cara Sitasi Artikel ini:

Saputra, D. D. ., & Firmansyah , R. . (2026). Metode PSO untuk Tuning PI Controller dalam Mengatur Kestabilan Tegangan Cuk Converter. Jejak Digital: Jurnal Ilmiah Multidisiplin, 2(6), 11620-11630. https://doi.org/10.63822/wj8bnq96

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di bidang elektronika daya yang semakin pesat menuntut sistem konversi energi yang efisien, stabil, dan berkelanjutan (Musumeci, 2023). Dalam hal ini, *cuk converter* menjadi topologi yang menarik digunakan karena kemampuannya yang dapat menaikkan dan menurunkan tegangan keluarannya sebagai pengatur suplai DC pada aplikasi sistem elektronika daya (Anbalagan et al., 2022). Selain itu, *cuk converter* memiliki karakteristik arus *input* dan *output* yang bersifat kontinu, sehingga menghasilkan *ripple* arus yang lebih rendah (Albaker et al., 2025). Berdasarkan beberapa keunggulan tersebut, menjadikan *cuk converter* lebih fleksibel dibandingkan konverter lain seperti *buck* atau *boost* yang hanya mampu melakukan satu arah konversi tegangan. Akan tetapi, kekurangan *cuk converter* yakni pada aspek kestabilan tegangan keluarannya. Tegangan keluaran dari *cuk converter* masih dikendalikan secara manual oleh nilai *duty cycle* (Automatisés et al., 2023). Maka, dibutuhkan sistem pengendali yang tepat agar stabilitas tegangan *cuk converter* dapat dikontrol dengan adaptif dan cepat.

Pada penelitian ini, metode pengendalian yang digunakan adalah *Proportional-Integral Controller,* metode ini dipilih karena strukturnya sederhana, mudah diimplementasikan, dan memiliki kemampuan yang baik dalam memperbaiki respon sistem (Chincholkar et al., 2024). *PI Controller* bekerja dengan mengatur sinyal kendali berdasarkan besarnya selisih antara tegangan keluaran aktual dengan nilai referensi (Karaarslan, 2018). Akan tetapi, performa dari *PI controller* sangat bergantung pada pemilihan nilai konstanta K_p dan K_i. Penyetelan konstanta yang tidak tepat dapat menyebabkan respon sistem menjadi lambat dan memiliki *overshoot* yang besar (Albaker et al., 2025).

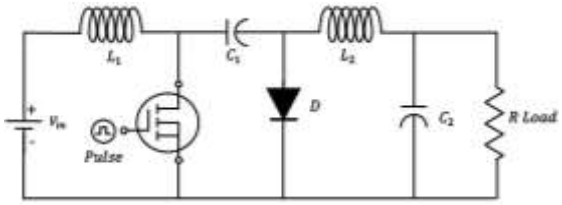
Dalam upaya ini, digunakan metode tuning *PI Controller* berbasis metaheuristik. Metode ini banyak diterapkan karena kemampuannya dalam menemukan solusi optimal tanpa memerlukan model matematis sistem yang kompleks (Houssein et al., 2024). Metode metaheuristik memiliki 2 fase, yakni eksplorasi untuk menjelajahi ruang solusi secara luas guna menghindari jebakan *local optimum* dan eksploitasi berperan dalam memperbaiki solusi terbaik yang telah ditemukan agar mendekati titik optimal.

Salah satu metode metaheuristik yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Particle Swarm Optimization* (PSO). Pemilihan metode ini dikarenakan mekanisme PSO baik dalam tahap eksplorasi dan eksploitasi ruang pencarian (Gad, 2022). Mekanisme ini menjadikan PSO memiliki kemampuan yang baik dalam menghasilkan optimasi yang lebih cepat dan akurat. Dalam penelitian ini, metode PSO digunakan untuk mencari nilai optimal parameter K_p dan K_i dengan tujuan mendapatkan nilai ITAE terkecil sebagai fungsi objektif. Ketika ITAE kecil, tandanya sistem mampu mendapat parameter *PI Controller* yang terbaik sehingga membuat respon sistem yang cepat dan stabil (Fong et al., 2023). Oleh karena itu, penggunaan metode PSO dalam penelitian ini diharapkan menghasilkan nilai parameter *PI Controller* yang optimal untuk kestabilan tegangan pada sistem *cuk converter* secara efisien dan adaptif.

TINJAUAN PUSTAKA

Cuk Converter

Cuk converter merupakan salah satu converter yang memiliki kemampuan dapat menaikkan dan menurunkan tegangan keluarannya (Anbalagan et al., 2022). *Cuk converter* juga memiliki arus *input* dan *output* yang kontinu (Albaker et al., 2025). Sehingga *ripple* arus dari tegangan keluaran akan menjadi lebih rendah. Rangkaian *cuk converter* dengan komponen-komponen nya disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian DC-DC *Cuk Converter*

Cuk converter mengatur tegangan luarannya berdasarkan nilai *duty cycle*, dari *duty cycle* inilah akan menghasilkan respon *open loop* sesuai tegangan referensi yang diinginkan, maka perhitungan *duty cycle* dinyatakan pada Persamaan 1 (Anbalagan et al., 2022).

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1-D} \quad (1)$$

Dimana V_{out} merupakan tegangan referensi yang diinginkan, V_{in} merupakan tegangan input yang diberikan, dan D merupakan nilai *duty cycle*.

PI Controller

PI Controller bekerja berdasarkan dua pengendali utama, yakni aksi pengendalian proporsional (P) yang memberikan koreksi secara langsung terhadap perbedaan antara sinyal keluaran dengan nilai referensi, dan aksi pengendalian integral (I) untuk mengevaluasi kesalahan respon dengan menjumlahkan error terhadap waktu (Idi et al., 2015). Berdasarkan dua pendekatan kontrol tersebut, diharapkan dapat menjadi sistem pengendali yang menghasilkan respon sistem dengan kestabilan yang baik. Secara matematis, model *PI Controller* dilambangkan pada Persamaan 2 (Idi et al., 2015).

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^1 e(t)dt \quad (2)$$

Dimana $u(t)$ merupakan nilai *output* dari sistem kontrol, K_P dan K_i merupakan konstanta proporsional juga al, $e(t)$ merupakan sinyal eror, dan $\int_0^1 e(t)dt$ merupakan integral error terhadap waktu.

Pendekatan sistem orde satu memungkinkan untuk menganalisis parameter *PI Controller* secara konvensional yang didapat dari analisa respon sistem *open loop*. Secara matematis, sistem orde satu disajikan dalam Persamaan 3 (Seborg et al., 2002).

$$G_s = \frac{K}{\tau_s + 1} \quad (3)$$

Dengan K yakni perbandingan antara nilai aktual dengan *setpoint*. Sedangkan τ merujuk pada konstanta waktu, didapatkan saat waktu $c(\tau)$ mencapai 63,2% dari *steady state*. Dari analisa tersebut didapatkan parameter *PI Controller* secara konvensional menggunakan Persamaan 4 dan Persamaan 5 (Seborg et al., 2002).

$$K_p = \frac{\tau_i}{K \,.\, \tau^*} \quad (4)$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} \quad (5)$$

Dimana τ_i nilainya sama dengan nilai τ dan τ^* merupakan konstanta waktu yang diinginkan untuk menunjukkan seberapa cepat sistem kontrol merespon.

***Particle Swarm Optimization* (PSO)**

Metode metaheuristik *Particle Swarm Optimization* (PSO) merupakan salah satu algoritma

optimisasi metaheuristik berbasis populasi yang diperkenalkan oleh Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995. Metode ini dikembangkan dengan mengadopsi perilaku sosial sekumpulan organisme, seperti kawanan burung (*bird flocking*) atau kelompok ikan (*fish schooling*), dalam mencari sumber makanan (Kennedy & Eberhart, 1995).

Metode PSO telah banyak diterapkan pada pengimplementasian metode metaheuristik dan dikenal baik dalam fase eksplorasi dan fase eksploitasi nya saat melakukan proses optimasi (Shami et al., 2025). Perpaduan antara kedua fase ini direpresentasikan pada model matematis algoritma PSO yang disajikan pada Persamaan 6 (Kennedy & Eberhart, 1995).

$$v_i^{k+1} = \begin{cases} c_1 r_1 (pbest_i - x_i^k) \\ c_2 r_2 (gbest - x_i^k) \end{cases} \quad (6)$$

Dimana v_i^{k+1} adalah posisi agen setelah diperbarui, $pbest_i$ adalah menyatakan posisi terbaik yang pernah dicapai partikel ke-i, Koefisien c_1 adalah faktor pembobot pengalaman individu dan r_1 adalah bilangan acak berdistribusi berdasarkan rentang yang memberikan sifat stokastik pada pergerakan partikel, maka $c_1 r_1 (pbest_i - x_i^k)$ dapat dikatakan sebagai komponen kognitif yang merepresentasikan eksplorasi loKal.

Adapun $gbest$ adalah posisi terbaik global populasi yang telah ditemukan, dengan c_2 sebagai koefisien sosial yang dimiliki PSO dan r_2 merupakan bilangan acak berdasarkan rentang, maka $c_2 r_2 (gbest - x_i^k)$ merepresentasikan fase eksploitasi karena mengarahkan seluruh partikel menuju solusi terbaik yang telah ditemukan.

Dengan demikian, keseimbangan eksplorasi dan eksploitasi dalam PSO terbentuk secara baik melalui kontribusi komponen inersia, kognitif, dan sosial dalam satu model matematis yang sama.

***Integral Time Absolute Error* (ITAE)**

Dalam penelitian ini, metode metaheuristik tidak membutuhkan model matematis dalam melakukan optimasi, akan tetapi memanfaatkan fungsi objektif dalam menemukan nilai terbaik parameter *PI Controller*. Fungsi objektif yang digunakan adalah *Integral Time Absolute Error* (ITAE). Ketika semakin kecil nilai ITAE, semakin baik kombinasi nilai konstanta yang didapat, karena menunjukkan bahwa error antara nilai referensi dan nilai keluaran dapat diminimalkan dengan cepat (Fong et al., 2023). Secara matematis, *Integral Time Absolute Error* (ITAE) dinyatakan pada Persamaan 7. (Ghorab et al., 2025).

$$ITAE = \int_0^t t\,|V_{ref} - V_t|dt \quad (7)$$

Dari Persamaan 7, ITAE memuat selisih antara tegangan referensi (V_{ref}) dengan tegangan keluaran sistem (V_t). Dengan memberikan bobot waktu (t), ITAE membuat error yang berlangsung pada waktu akhir memiliki pengaruh lebih besar dibandingkan error pada awal respon (Maiti et al., 2008). Oleh karena itu, ketika PSO mendapatkan ITAE terkecil, algoritma ini secara otomatis menghasilkan parameter K_p dan K_i terbaik guna membuat tegangan keluaran dari *cuk converter* lebih cepat stabil dengan lebih efisien.

METODE PENELITIAN

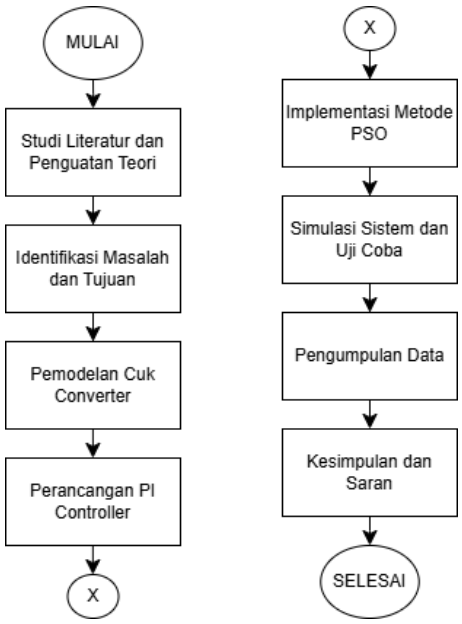
Pendekatan Penelitian

Pendekatan penelitian yang dipilih berupa pendekatan kuantitatif, yang berfokus pada pengumpulan dan analisis data numerik yang diukur secara objektif. Metode kuantitatif menekankan pentingnya perolehan data melalui pengukuran yang akurat dan sistematis. Penelitian ini menggunakan metode

eksperimental untuk mengembangkan dan menguji desain sistem *PI Controller* dengan tuning metode PSO untuk pengaturan tegangan pada *cuk converter*.

Perancangan Penelitian

Perancangan penelitian dilakukan guna penelitian dapat berjalan secara terstruktur, Perancangan ini disajikan pada Gambar 2.



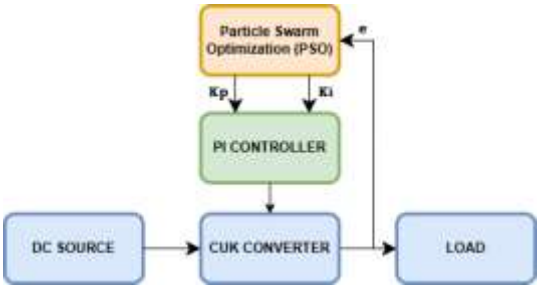
Gambar 2. Flowchart Perancangan Penelitian

Berdasarkan flowchart Gambar 2, penelitian ini diawali dengan pengumpulan dan kajian literatur yang relevan, meliputi teori *cuk converter*, *PI Controller*, serta metode optimasi PSO. Studi literatur bertujuan untuk memperkuat landasan teori, serta mengidentifikasi kekurangan penelitian sebelumnya. Selanjutnya dilakukan identifikasi masalah untuk merumuskan permasalahan utama dan menentukan tujuan penelitian.

Pemodelan *cuk converter* dilakukan menggunakan parameter komponen yang diadopsi dari jurnal terdahulu tanpa perhitungan ulang. Tahap berikutnya adalah perancangan sistem kendali menggunakan *PI Controller* serta penyusunan fungsi objektif sebagai penghubung antara keluaran sistem dan proses optimasi. Metode PSO diimplementasikan melalui matlab *script* yang terintegrasi dengan Simulink untuk melakukan tuning parameter PI. Hasil simulasi dianalisis berdasarkan *rise time*, *settling time*, dan *overshoot*, kemudian ditarik kesimpulan serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

Blok Diagram

Diagram blok pada Gambar 3 menunjukan alur kerja sistem pada penelitian ini.



Gambar 3. Blok Diagram Sistem

Blok diagram arsitektur sistem pada Gambar 3 menunjukkan alur kerja sistem pengaturan tegangan pada *cuk converter* yang dikendalikan oleh *PI Controller* dengan metode optimasi *Particle Swarm Optimization* (PSO). Tegangan masukan dari sumber DC dikonversi oleh *cuk converter*, sedangkan tegangan keluarannya digunakan sebagai sinyal umpan balik. Sinyal keluaran dibandingkan dengan nilai referensi untuk menghasilkan error. Nilai error tersebut menjadi dasar bagi metode PSO dalam melakukan tuning parameter pengendali, yaitu K_p dan K_i . Parameter hasil optimasi diterapkan pada *PI Controller* untuk mengatur proses *switching* sehingga tegangan keluaran konverter dapat distabilkan secara optimal.

Parameter Komponen

Parameter komponen yang digunakan dalam pemodelan *cuk converter* pada penelitian ini diambil dari jurnal rujukan dari penelitian yang dilakukan oleh (Yilmaz et al., 2020). Maka parameter yang didapat juga digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Komponen *Cuk Converter*

Parameter	Nilai
Tegangan *Input* ($\boldsymbol{V_{in}}$)	12 V
Tegangan *Output* ($\boldsymbol{V_{out}}$)	18 V
Resistor ($\boldsymbol{R}$)	20 Ω
Induktor *Input* ($\boldsymbol{L_1}$)	100 μF
Induktor *Output* ($\boldsymbol{L_2}$)	100 μF
Kapasitor *Couple* ($\boldsymbol{C_1}$)	150 μH
Kapasitor *Output* ($\boldsymbol{C_2}$)	3300 μH

Dengan parameter sistem *cuk converter* pada Tabel 1, akan dilakukan tuning *PI Controller* menggunakan metode PSO untuk dilakukan pengujian. Agar lebih objektif, parameter hasil PSO akan dibandingkan dengan respon sistem hasil metode konvensional dan sistem *cuk converter* tanpa pengendali.

Maka parameter *PI Controller* ketiga metode tersebut disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter *PI Controller* untuk Pengujian

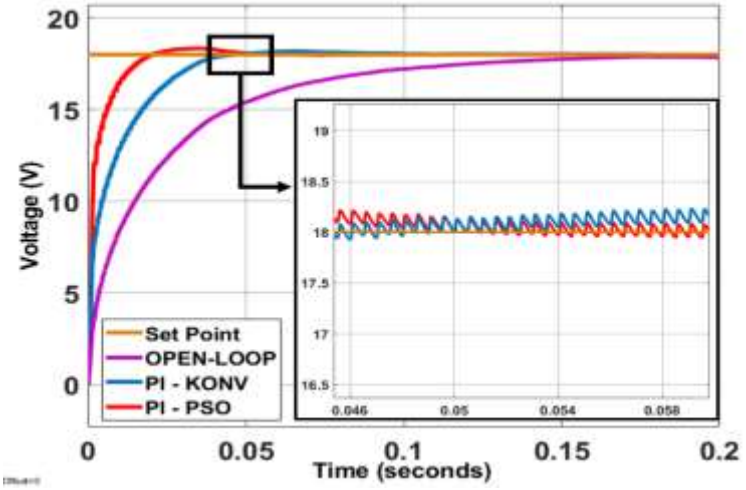
Metode	K_p	K_i	Duty Cycle
PSO	0.0398	3.1650	-
Konvensional	0.021	1.16	-
Open Loop	-	-	0,60

Tabel 2 menyajikan parameter PSO yang didapatkan berdasarkan hasil tuning algoritma PSO, lalu terdapat parameter PI konvensional didapatkan dari pendekatan sistem orde satu, sedangkan sistem tanpa pengendali tidak menggunakan parameter *PI Controller* dikarenakan respon nya didapat dari hasil perhitungan sistem *open loop* dari Persamaan 1 yang mendapatkan *duty cycle* dengan nilai 0,60 untuk menghasilkan respon sistem dengan *setpoint* yang diinginkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Performa Sistem

Pengujian ini bertujuan untuk melihat bagaimana respon sistem hasil dari metode PSO, selanjutnya dibandingkan dengan metode konvensional dan sistem tanpa pengendali untuk dilakukan pengujian performa sistem yakni pengendalian *cuk converter* dengan *PI Controller* dengan respon sistem hasil masing-masing metode yang disebutkan. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan tegangan *input* konstan sebesar 12 V dan *setpoint* juga diberikan konstan sebesar 18 V. Parameter performa yang diamati meliputi waktu naik *(rise time)*, waktu stabil (*settling time)*, dan lonjakan sesaat (*overshoot)*. Hasil pengujian *cuk converter* pada kondisi *setpoint* tetap ini selanjutnya ditampilkan dalam Gambar 4 dan data hasil ujinya disajikan pada Tabel 3 sebagai bahan analisis performa sistem.



Gambar 4. Grafik Pengujian Performa Sistem

Tabel 3. Data Hasil Uji Performa Sistem

Metode	*Rise Time* (s)	*Settling Time* (s)	*Overshoot* (%)	ITAE
PSO	0,0191	0,0565	2,2	0,00056
Konvensional	0,0421	0,1085	1,39	0,00191
Open Loop	0,1576	0,1752	0	-

Dari hasil pengujian yang dilakukan, dapat diketahui nilai ITAE yang didapat dari masing-masing respon sistem. Terlihat dari Tabel 3 bahwa saat pengujian performa sistem dengan setpoint tetap ini nilai ITAE terkecil dimiliki oleh metode PI-PSO dengan nilai 0.00056, lalu ITAE metode PI konvensional dengan nilai 0.00191, dan respon tanpa pengendali tidak dianalisa nilai ITAE dikarenakan merupakan respon hasil sistem *open loop*. Nilai ITAE terkecil dari respon PI-PSO menunjukkan bahwa metode PI-PSO berhasil meminimalkan nilai error dari sistem yang dikendalikan sesuai dengan teori awal yang telah dijelaskan.

Berdasarkan Gambar Tabel 3, dapat dianalisa performa sistem dari masing-masing respon yang dihasilkan metode PI-PSO, PI konvensional, dan tanpa pengendali atau sistem *open loop*. Terlihat bahwa respon sistem dengan waktu naik (*rise time*) tercepat dimiliki oleh respon PI-PSO dengan waktu 0,0191 *s*, disusul oleh respon metode PI konvensional dengan waktu naik sebesar 0,0421 *s* dan yang paling lambat yakni dari sistem tanpa pengontrol (*open loop*) yang membutuhkan waktu 0,1576 *s* untuk mencapai waktu *rise time*.

Selanjutnya, waktu respon sistem mencapai titik stabil penuh atau *settling time* yang tercepat kembali dimiliki oleh metode PI-PSO dengan waktu 0,0565 *s*, disusul oleh respon metode PI konvensional dengan waktu 0,1085 *s* dan yang paling lambat yakni dari respon tanpa pengendali dengan waktu 0,1752 *s* dalam mencapai *settling time. Settling time* tercepat yang dimiliki oleh metode PI-PSO ini membuktikan bahwa respon sistem metode yang diusulkan menunjukkan performa yang lebih baik saat menstabilkan tegangan luarannya dengan cepat.

Jika dilihat dari nilai *overshoot*, respon tanpa pengendali lebih diunggulkan karena tidak memiliki nilai *overshoot*, sedangkan metode PI konvensional memiliki nilai *overshoot* 1,39%, nilai tersebut lebih kecil daripada *overshoot* metode PI-PSO dengan nilai 2,2%.

Dari analisa tersebut, dapat dikatakan bahwa respon metode yang diusulkan yakni PI-PSO memberikan keunggulan saat dilakukan pengujian performa sistem dengan skenario *setpoint* tetap. Hal ini dibuktikan dengan waktu naik (*rise time*) dan waktu mencapai titik stabil (*settling time*) oleh PI-PSO dengan waktu yang lebih cepat dibandingkan respon metode pembanding lain. Meskipun memiliki *overshoot* sebesar 2,2%, akan tetapi *overshoot* tersebut dinilai cukup kecil dan masih berada dalam batas toleransi. Oleh karena itu, respon sistem hasil metode PI-PSO menunjukkan performa yang lebih baik dengan mempercepat kestabilan tegangan luarannya dalam mencapai setpoint dan berhasil meredam lonjakan (*overshoot*) dengan nilai yang relatif kecil dan tetap berada dalam batas toleransi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, dapat disimpulkan bahwa metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) mampu digunakan secara efektif sebagai metode tuning parameter *PI Controller* pada sistem *cuk converter*. Hasil optimasi menunjukkan peningkatan performa dinamis sistem dibandingkan metode konvensional dan tanpa pengendali, khususnya dalam mempercepat respon sistem dalam mencapai titik stabil.

Saat dilakukan pengujian, parameter PI hasil optimasi PSO menghasilkan waktu *rise time* dan *settling time* yang lebih cepat serta nilai ITAE yang lebih kecil, ini menandakan sistem memiliki kemampuan yang lebih baik dalam meredam error. Meskipun respon sistem memiliki *overshoot*, nilainya masih berada dalam batas toleransi dan tidak mengganggu stabilitas sistem secara keseluruhan. Dengan demikian, metode PSO terbukti mampu menghasilkan performa pengendalian tegangan yang lebih optimal pada stabilitas tegangan sistem *cuk converter*.

DAFTAR PUSTAKA

Albaker, M., Abed, N., Shanan, D. S., Hayder, Z., & Alhussein, H. (2025). *Robust Speed and Torque Control of DC Motor with Cuk Converter Using PI and SMC*. *6*(3), 1216–1226. https://doi.org/10.18196/jrc.v6i3.25756

Anbalagan, P., Rajalakshmi, S., Lokesh, S., & Prasath, S. A. (2022). *A Review of Bidirectional DC-to-DC Cuk Converter Topologies using Matlab Simulink*. *11*(04), 245–259.

Automatisés, S., Ibrahim, M. A., Ibrahim, M. H., & Khather, S. I. (2023). *Design of Fuzzy-ACO Based Controller for Cuk Converter in Electric Vehicles*. *56*(3), 425–430.

Chincholkar, S., Tariq, M., Poshtan, M., & Sharaf, M. (2024). *Normalized Error-Based PI Controller and Its Application to the DC – DC Buck Converter*.

Fong, L. K., Shafiqul, M. I., & Ashraf, A. (2023). *Optimized PID Controller of DC-DC Buck Converter based on Archimedes Optimization Algorithm*. *3*(4), 658–672.

Gad, A. G. (2022). Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications : A Systematic Review. In *Archives of Computational Methods in Engineering* (Vol. 29, Issue 5). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/s11831-021-09694-4

Ghorab, M., Sharaf, H. M. (2025). *Hunger Games Search Algorithm for Transient Response and Stability Enhancement of a Fractional-Order PID-Based Automatic Voltage Regulator (AVR) System*. *5*(1), 24–45.

Houssein, E. H., Khalaf, M., Gang, S., & Sayed, M. M. Al. (2024). Metaheuristics for Solving Global and Engineering Optimization Problems : Review , Applications , Open Issues and Challenges. In *Archives of Computational Methods in Engineering* (Vol. 31, Issue 8). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/s11831-024-10168-6

Idi, M., Ahmed, M., & Halilu, B. D. (2015). *Proportional Integral (PI) Controller for a Process Plant System*. *4*(01), 229–232.

Karaarslan, A. (2018). *Modeling And Performance Analysis Of Cuk Converter Using Pi And Occ Method*. *2*(September), 1–5.

Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). *Particle Swarm Optimization*. 1942–1948.

Maiti, D., Acharya, A., & Konar, A. (2008). *Tuning PID and PI λ D δ Controllers using the Integral Time Absolute Error Criterion*. 1–6.

Musumeci, S. (2023). Energy Conversion Using Electronic Power Converters: Technologies and Applications. *Energies*, *16*(8). https://doi.org/10.3390/en16083590

Seborg, D. E., Edgar, T. F., & Mellichamp, D. A. (2002). *Process Dynamics and Control*.

Shami, T. M., Nima, Q. A., Said, K., Abdulkadir, J., & Ahmed, A. (2025). Dimension selection : an innovative metaheuristic strategy for particle swarm optimization. *Cluster Computing*, *28*(6), 1–26. https://doi.org/10.1007/s10586-025-05201-7

Yilmaz, M., Çorapsiz, M. F., & Çorapsiz, M. R. (2020). *Voltage Control of Cuk Converter with PI and Fuzzy Logic Controller in Continuous Current Mode*. *8*(2), 127–134. https://doi.org/10.17694/bajece.660025