

Tren Algoritma InC, PID dan FLC untuk MPPT Pada Sistem Fotovoltaik: Sistemik Review

Briska Putra Ananda¹, Faiq Mananul Faqih¹, Muhammad Faizal Al Kindi¹, Feddy Setio Pribadi¹, Rizky Ajie Aprilianto¹

¹Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang;

Email : briskaananda103@students.unnes.ac.id (B.P.A), faiqmananul@students.unnes.ac.id (F.M.F), kindifaizal@students.unnes.ac.id (M.F.A.K), feddy.setio@mail.unnes.ac.id (F.S.P), rizkyajiea@mail.unnes.ac.id (R.A.A);

Abstrak : Terkadang ekstraksi daya pada penggunaan sistem fotovoltaik (PV) kurang maksimal, perubahan radiasi matahari dan temperatur lingkungan menjadi salah satu penyebabnya. MPPT adalah metode untuk memaksimalkan ekstraksi daya dari PV. Beberapa penggunaan algoritma kontrol untuk MPPT pada sistem PV diusulkan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa efisien metode algoritma yang digunakan untuk MPPT. Kelebihan dari algoritma yang diusulkan juga dibahas. Penelitian ini melakukan tinjauan dari 15 artikel yang diambil dari sumber database Scopus dengan rentang tahun 2020 hingga 2024. Hasilnya menunjukkan bahwa kontroler berbasis PID paling banyak digunakan untuk MPPT. Penggunaan metode kombinasi hingga integrasi Neural Network (NN) menghasilkan nilai efisiensi yang tinggi dibandingkan dengan metode konvensional, tetapi memerlukan komputasi dan resource yang banyak. Systematic Literature Review (SLR) ini bisa menjadi pedoman untuk peneliti dalam mengembangkan algoritma untuk MPPT pada sistem PV di masa mendatang.

Kata Kunci : Fotovoltaik, MPPT, PID, InC, Fuzzy Controller, *systematic literature review*

Abstract : Investigating the efficiency of algorithms utilized for Maximum Power Point Tracking (MPPT) in Photovoltaic (PV) systems is crucial due to fluctuations in solar radiation and ambient temperature, which often hinder optimal power extraction. MPPT serves as a solution to this issue. This study critically reviews 15 articles sourced from Scopus databases spanning from 2020 to 2024. Findings reveal that PID-based controllers are predominantly employed for MPPT. However, the integration of combination methods, including Neural Networks (NN), yields superior efficiency compared to conventional approaches albeit demanding significant computational resources. This Systematic Literature Review (SLR) serves as a roadmap for future researchers in the development of advanced MPPT algorithms for PV systems.

Jurnal Energi Baru & Terbarukan, 2024, Vol. 5, No. 2, pp 78 – 88

Received : 4 Juni 2024

Accepted : 13 Juni 2024

Published : 31 Juli 2024



Copyright: © 2022 by the authors. [Jurnal Energi Baru dan Terbarukan](#) (p-ISSN: [2809-5456](#) and e-ISSN: [2722-6719](#)) published by Master Program of Energy, School of Postgraduate Studies. This article is an open access article distributed under the terms and condition of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](#) (CC BY-SA 4.0).

Keywords : photovoltaic, MPPT, PID, InC, Fuzzy Controller, systematic literature review

1. Pendahuluan

Energi matahari adalah sumber energi yang paling penting di bumi, dan tanpa energi matahari tidak akan ada kehidupan. Seluruh energi yang diperoleh dari sinar matahari dan sinar matahari langsung dapat digunakan untuk menghasilkan listrik. Sistem pembangkit listrik fotovoltaik dan pemanfaatan panas matahari digunakan untuk aplikasi seperti pemanasan, pendinginan, dan pembangkit listrik (Ahmadi et al., 2020). Pembangkit energi berbasis bahan bakar fosil sudah ketinggalan zaman karena pemanasan global yang tinggi dan emisi CO₂ yang dihasilkan. Di antara sumber energi terbarukan, pembangkit energi berbasis tenaga surya tumbuh dengan cepat.

Energi PV memiliki desain yang bersih dan sederhana, dan keuntungan terbesarnya adalah output berkisar dari mikrowatt hingga megawatt (Khatibi et al., 2019). Sistem PV mudah dipasang dan menggunakan sumber energi gratis. Namun, efisiensi sistem PV tergantung pada beberapa faktor eksternal, seperti radiasi matahari dan suhu lingkungan (Kaya et al., 2023). Selain itu, konversi satu langkah dari sinar matahari menjadi listrik menggunakan sel fotovoltaik surya (PV) (terdiri dari bahan semikonduktor, sebagian besar silikon (Rajput et al., 2020) yang menggunakan efek fotovoltaik membuatnya menjadi solusi energi terbarukan yang paling mudah diakses, murah, dan dapat diandalkan.

Mengingat penggunaan energi yang mudah dan cakupannya yang luas, wajar jika setiap tahun permintaan akan terus meningkat. Meskipun pembangkit listrik tenaga surya memiliki banyak manfaat, pembangkit listrik tenaga surya memiliki beberapa kekurangan seperti ketidakakuratan dan keterlambatan dalam pelacakan titik daya maksimum, fungsi yang buruk dalam kondisi naungan parsial, dan stabilitas sistem yang buruk pada sistem yang terhubung ke jaringan listrik (Murugaperumal et al., 2020).

Daya keluaran dalam sistem PV mencapai puncaknya pada titik yang disebut Maximum Power Point (MPP), sebuah posisi yang terus berubah sehubungan dengan tingkat radiasi matahari dan suhu. Hal ini mempengaruhi ukuran daya output PV untuk sistem tertentu karena sistem ini dirancang untuk menghasilkan daya yang telah ditentukan sebelum pemasangan (Zhang et al., 2020). Pengontrol Maximum Power Point Tracking (MPPT) diperkenalkan yang membantu mengidentifikasi siklus optimal untuk menghasilkan daya maksimum. Publikasi artikel penelitian di bidang teknologi pengendali MPPT secara bertahap meningkat setiap tahun yang mengindikasikan permintaan akan pengendali MPPT yang optimal (Sarvi & Azadian, 2022).

MPPT pada Fotovoltaik (PV) di era penelitian telah mendapatkan popularitas yang mengesankan dalam beberapa tahun terakhir, karena biayanya yang rendah dan output yang tinggi (Rajput et al., 2020). Sifat-sifat PV bergantung pada radiasi matahari dan wilayah geografis. Yang paling penting, energi matahari adalah salah satu sumber penting untuk mengubah sinar matahari menjadi energi listrik. Penerapan algoritma seperti Proportional-Integral-Derivative (PID), Fuzzy Logic Control (FLC), Incremental Conductance (INC) yang digunakan dalam MPPT.

Penggunaan algoritma dalam MPPT sangat signifikan dalam menentukan hasil yang diperoleh. Setiap algoritma MPPT memiliki kelebihan dan kekurangan yang perlu dipertimbangkan. Selain itu, karakteristik setiap algoritma juga mempengaruhi kinerjanya dalam berbagai kondisi lingkungan. Oleh

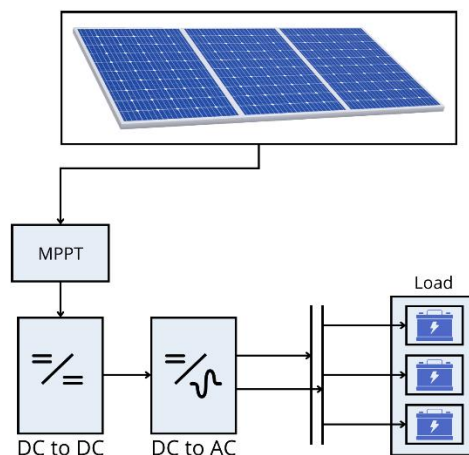
karena itu, pemilihan algoritma MPPT harus disesuaikan dengan kondisi lingkungan dan kebutuhan spesifik dari sistem yang bersangkutan untuk mencapai efisiensi dan kinerja yang optimal. Makalah ini disusun sebagai: Pertama latar belakang penelitian, kedua tinjauan pustaka, ketiga metodologi penelitian, keempat hasil dan pembahasan hasil dan diakhiri dengan kesimpulan.

2. Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka ini mengeksplorasi penggunaan algoritma MPPT yang efisien dan kemudian diajukan pertanyaan-pertanyaan untuk diperiksa. Artikel yang memenuhi kriteria yang telah ditetapkan akan diteliti untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan ini. Algoritma kontrol apa yang diusulkan dalam artikel penelitian. Bagaimana hasil efisiensi terhadap penggunaan algoritma yang diusulkan. Tinjauan literatur ini digunakan untuk meningkatkan pemahaman terhadap artikel yang ditinjau.

2.1 Fotovoltaik

Fotovoltaik (PV) adalah sistem yang digunakan untuk menghasilkan listrik dari sinar matahari. Sistem PV memanfaatkan sel surya yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik melalui proses fotovoltaik. Sistem PV memerlukan Maximum Power Point Tracker (MPPT) untuk mengoptimalkan daya yang dihasilkan dari panel surya (Smadi et al., 2024). Panel surya yang terbuat dari sel surya semikonduktor seperti silikon menjadi komponen utama dalam teknologi ini. Ketika cahaya matahari mengenai sel surya, foton (partikel cahaya) diserap dan menghasilkan arus listrik. Arus ini dialirkan ke panel surya dan diubah menjadi tegangan listrik.



Gambar 1. Skema rangkaian Sistem PV

Sistem PV terdiri dari panel surya, perangkat kontrol (MPPT), inverter dan terakhir load (baterei) seperti yang ditunjukkan gambar 1. Panel surya mengubah cahaya matahari menjadi listrik, perangkat kontrol memonitor dan mengendalikan operasi sistem, inverter mengubah tegangan, dan terakhir load (baterai) untuk menyimpan energi. Sistem PV dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti pembangkit listrik, atap surya, dan sistem off-grid.

2.2 Fotovoltaik

Teknik yang digunakan dalam sistem PV untuk memaksimalkan output daya dengan terus menyesuaikan kondisi operasi sistem untuk memastikan sistem beroperasi di titik di mana energi maksimum dihasilkan (Didi & Chaouche, 2022). Dengan menggunakan algoritma MPPT yang efisien, sistem tenaga surya dapat mencapai kinerja yang lebih baik dalam menghasilkan listrik, terutama dalam menghadapi perubahan kondisi cuaca seperti perubahan iradiasi sinar matahari.

Selain mengoptimalkan daya yang dihasilkan oleh panel surya, MPPT juga memiliki dampak positif pada meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem tenaga surya. Dengan mengoperasikan panel surya di titik daya maksimum mereka, MPPT membantu mengurangi limbah energi yang disebabkan oleh beroperasi di luar titik daya maksimal. Ini dapat mengakibatkan peningkatan yang signifikan dalam produksi listrik dari sistem tenaga surya, yang pada gilirannya dapat mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

2.3 Fotovoltaik

Algoritma yang diterapkan untuk MPPT bervariasi secara luas, dirancang untuk mengoptimalkan kinerja panel surya atau sumber energi lainnya dengan menghasilkan output maksimum. Tujuan utama adalah untuk memaksimalkan daya yang dihasilkan oleh panel surya dengan memastikan bahwa panel bekerja pada titik daya maksimumnya di bawah kondisi lingkungan yang bervariasi dan perubahan kondisi pencahayaan.

Algoritma Fuzzy logic adalah metode yang menggunakan himpunan fuzzy untuk menggambarkan variabel input dalam menghasilkan keputusan. Fuzzy logic kemudian menggunakan mesin inferensi fuzzy untuk menghasilkan keluaran fuzzy berdasarkan aturan if-then. Langkah terakhir adalah defuzzifikasi, di mana keluaran fuzzy dikonversi menjadi nilai tegas (Ullah et al., 2023). Fuzzy logic telah menjadi alat yang populer dalam pengambilan keputusan karena kemampuannya untuk menangani ketidakpastian dan kompleksitas dalam data. Salah satu aplikasi utama fuzzy logic adalah dalam sistem pengambilan keputusan, di mana variabel input tidak selalu dapat diukur secara tepat atau memiliki nilai yang pasti.

Kontroler PID merupakan sebuah jenis kontroler yang digunakan dalam sistem kontrol otomatis. PID controller memiliki tiga komponen utama yaitu proporsional (P), integral (I), dan derivatif (D) yang bekerja bersama untuk mengatur output sistem berdasarkan perbedaan antara set point dan nilai aktualnya (Ngo & Nguyen, 2021). Keuntungan kontrol proporsional menentukan seberapa cepat kontroler akan merespons kesalahan, sementara kontrol integral membantu dalam menghilangkan kesalahan statis dan kontrol derivatif membantu dalam meredakan overshoot dan mengurangi waktu pemulihan sistem.

INC adalah algoritma yang digunakan untuk Pelacakan Titik Daya Maksimum (MPPT) dalam sistem fotovoltaik surya. Ia bekerja berdasarkan prinsip bahwa gradien daya terhadap tegangan harus nol pada kondisi tunak. Algoritma INC dikenal menyediakan solusi yang lebih baik untuk input tidak teratur. (Hou & Wang, 2023) Kelebihan utama dari algoritma INC adalah kemampuannya untuk menyesuaikan diri dengan perubahan kondisi cahaya matahari yang cepat atau input yang tidak teratur.

3. Metodologi

Fokus utama dari paper ini adalah untuk menemukan sebuah algoritma pada Maximum Power Point Tracking (MPPT) agar mampu menghasilkan efisiensi yang maksimal. Oleh karena itu, penelitian ini mengadopsi beberapa hasil penelitian terdahulu untuk mendapatkan hasil efisiensi dari algoritma yang digunakan. Dalam makalah ini kami mengadopsi pendekatan Systematic Literature Review (SLR).

Untuk memastikan kualitas tinjauan literatur, penelitian ini dilakukan dengan metode Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) melewati langkah yang sesuai dengan prosedur. Metode PRISMA telah diterapkan beberapa tahapan: 1) Seleksi kriteria inklusi dan

eksklusi; 2) Pemilihan dan pencarian sumber data; 3) Screening keyword dan judul; 4) Seleksi abstrak dan penilaian akhir; dan 5) Ekstraksi data.

1. Seleksi kriteria inklusi dan eksklusi

Ulasan literatur ini mencakup artikel yang membahas terkait penggunaan algoritma untuk MPPT pada photovoltaic system dan lulus kriteria sesuai pertanyaan peneliti. Oleh karena itu, studi literatur ini hanya akan mengambil artikel yang menjawab pertanyaan peneliti. Ulasan literatur yang sistematis ini mengambil data artikel dalam kurun waktu dari 2020 dan 2024. SLR ini hanya mengambil artikel yang berbahasa inggris.

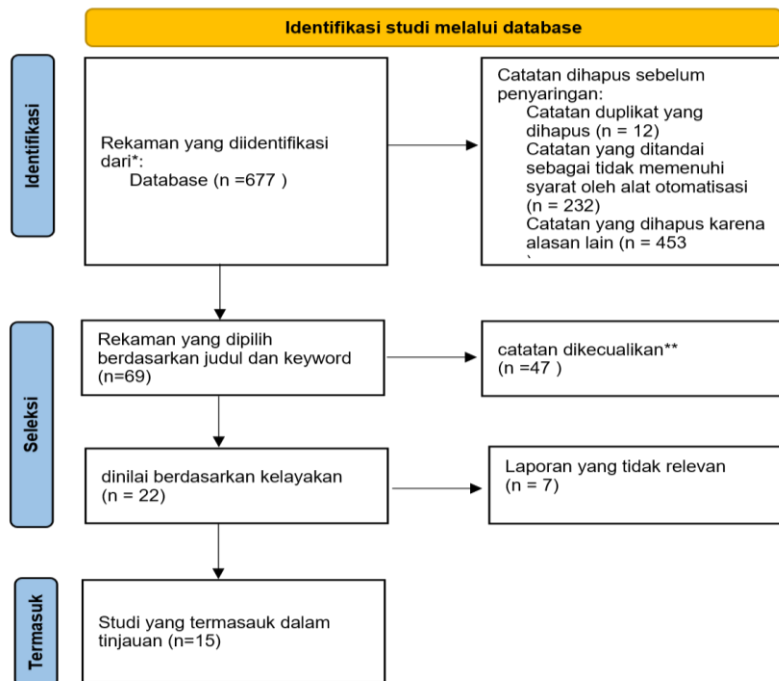
2. Pemilihan dan pencarian sumber data

Database yang digunakan adalah Scopus dengan melakukan pencarian berdasarkan keyword yang spesifik seperti pada tabel 1.

Tabel 1. Pencarian artikel

Keyword	Database	N
"Solar panel" OR "photovoltaic" AND "MPPT" AND "controller" OR "MPPT Algorithm" AND "PID" AND "Fuzzy" AND "efficiency"	Scopus (www.scopus.com) "18-03-2024"	677

Artikel yang ditinjau untuk penelitian ini dipilih dalam lingkup Engineering. Gambar 2 menunjukkan diagram PRISMA proses pencarian metadata hingga jumlah artikel yang di review. Keyword pada tabel 1 digunakan untuk pencarian awal. Data disimpan melalui Microsoft Excel yang nantinya akan dilakukan screening. Pemrosesan metadata ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Diagram PRISMA

3. Screening keyword dan judul

Pada tahap ini semua judul dari 766 artikel di screening melalui Excel, dicari baik melalui judul dan keyword. Setelah dilakukan screening kami mendapatkan 69 artikel yang relevan dalam judul dan keyword.

4. Seleksi abstrak dan penilaian akhir

Pada tahap berikutnya, semua abstrak dibaca untuk memastikan relevansi studi. Jika abstrak relevan, artikel dipilih dan jika tidak artikel tidak dipilih untuk tahap screening berikutnya. Dengan melakukan proses screening ini, jumlah artikel berkurang menjadi total 22 judul.

5. Ekstraksi data

Pada tahap akhir, semua 22 artikel dipelajari untuk menjawab pertanyaan peneliti yang telah diusulkan. Didapatkan jumlah 15 artikel yang di review disajikan pada bab hasil.

4. Hasil dan Pembahasan

Dalam mencapai MPPT terdapat beberapa algoritma kontrol yang digunakan, seperti Proportional Integral Derivative (PID), Perturb and Observe (P&O), Fuzzy Logic (FL), Incremental Inductance (IC) dan beberapa modifikasi seperti Genetic Algorithm-PID (GA-PID), Fractional Order-PID (FO-PID), Particle Swarm Optimization-PID (PSO-PID). Dari 15 artikel yang terpilih ditinjau untuk memberikan hasil analisisnya terkait penggunaan algoritma kontrol MPPT dan efisiensi yang dihasilkan. 15 artikel yang digunakan sebagai bahan literature review pada penelitian disajikan pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil *literature review*

Label	Judul	Metode	Hasil
#1	<i>"An Application of Intelligent Non-Linear Discrete-PID Controller for MPPT of PV System"</i>	PSO Nonlinear Discrete PID (N-PID)	Algoritma PSO memberikan nilai fitness terendah dan waktu yang singkat, undershoot dan osilasi yang rendah, dibandingkan dengan kontroler PID yang dioptimalkan dengan GA (Pathak et al., 2020).
#2	<i>"Perturbation Observation Method Based on Fractional Order PID and Extended State Observer"</i>	Kombinasi P&O dengan pengoptimalan Fractional Order PID (FOPID)	Algoritma P&O yang dimodifikasi dengan Fractional Order PID Control menghasilkan output yang lebih responsif dan stabil dalam berbagai kondisi cuaca dibandingkan dengan P&O Tradisional (Shi & Li, 2023).
#3	<i>"Adaptive Fractional Order PID Controller Based MPPT for PV Connected Grid System Under Changing Weather Conditions"</i>	Adaptive Fractional Order PID (A-FOPID) yang di optimasi Particle Swarm Optimization (PSO)	Kontroler A-FOPID menunjukkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kontroler GA-FOPID dan ACO-FOPID dalam hal kecepatan konvergensi cepat, waktu pengaturan yang cepat, osilasi yang lebih sedikit, dan total harmonic distortion (THD) yang lebih rendah sebesar 1.91% (Nasir et al., 2021).
#4	<i>"Nonlinear PID (N-PID) Controller for SSSP Grid Connected Inverter Control"</i>	Kontroler Nonlinear PID (N-PID)	Kontroler N-PID dalam melacak MPP hampir akurat dengan tingkat konvergensi cepat dan mengurangi

Label	Judul	Metode	Hasil
	<i>of Photovoltaic Systems"</i>		%THD lebih lanjut daripada kontroler PID konvensional, efisiensi tracking yang dihasilkan dari kedua kontroler sama yakni 96-99% (S & S, 2022).
#5	<i>"Robust MPPT Control of Stand-Alone Photovoltaic Systems via Adaptive Self-Adjusting Fractional Order PID Controller"</i>	Integrasi Feed- Forward Neural Network (FNN) dengan kontroler A-FOPID	Kontroler A-FOPID menunjukkan peningkatan rata-rata 25,4% dalam akurasi pelacakan dan 11,3% dalam kecepatan tanggapan sementara di bawah kondisi lingkungan yang berbeda dibandingkan dengan kontroler konvensional (FOPID) (Saleem et al., 2023).
#6	<i>"Optimized ANN-fuzzy MPPT controller for a stand-alone PV system under fast-changing atmospheric conditions"</i>	Adaptive Neural Network (ANN)-Fuzzy	Metode ANN-FL mampu mencapai efisiensi 99.86% dibawah perubahan radiasi matahari dan 99.825% dibawah perubahan temperatur, lebih tinggi dibandingkan dengan metode FL dan ANN (Hichem et al., 2023).
#7	<i>"Maximum Power Extraction Control Algorithm for Hybrid Renewable Energy System"</i>	Fractional Order PID (FOPID)	Metode kontroler FOPID yang diusulkan mampu bekerja lebih baik dari metode P&O, dibuktikan dari kecepatan grafik respon dalam mencapai MPP serta ekstrak daya (Kanagaraj & Al-Ansi, 2023).
#8	<i>"An Improved Optimally Designed Fuzzy Logic-Based MPPT Method for Maximizing Energy Extraction of PEMFC in Green Buildings"</i>	Modifikasi Fuzzy Logic Controller (FLC)	Metode modifikasi FLC MPPT yang diusulkan bekerja lebih baik dalam hal kecepatan mencapai MPP dengan osilasi yang rendah, nilai undershoot/overshoot yang rendah, dibandingkan dengan kontroler konvensional P&O, INC dan dp/dl PID (Aly et al., 2023).
#9	<i>"Efficient MPPT Controller for Solar PV System Using GWO-CS Optimized Fuzzy Logic Control and Conventional Incremental Conductance Technique"</i>	INC-Fuzzy MPPT yang dioptimalkan dengan Gray Wolf Optimization (GWO)	Metode INC-Fuzzy yang dioptimalkan dengan GWO menghasilkan efisiensi tertinggi berdasarkan perubahan radiasi dengan rata-rata 99.33 lebih baik dibandingkan dengan INC-PID dan

Label	Judul	Metode	Hasil
			INC konvensional (Chauhan et al., 2023).
#10	<i>"Fuzzy-based maximum power point tracking (MPPT) control system for photovoltaic power generation system"</i>	Fuzzy Logic Controller (FLC)	Metode FLC yang diusulkan berhasil mencapai efisiensi 97% berdasarkan perubahan radiasi dan perubahan temperatur, tetapi undershoot yang dihasilkan masih tergolong besar (Ullah et al., 2023).
#11	<i>"Improved MPPT Control Strategy for PV Connected to Grid Using IncCond-PSO-MPC Approach"</i>	INC-Particle Swarm Optimization (PSO) Model Predictive Control (MPC)	Metode INC-PSO-MPC yang diusulkan berhasil mencapai nilai efisiensi sebesar 98.25 berdasarkan testing dari kecepatan tracking hingga bayangan parsial, lebih baik dibandingkan dengan P&O, INC, INC-PSO (Kacimi et al., 2023).
#12	<i>"A Novel Strategy of Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Panels Based on Fuzzy Logic Algorithm"</i>	Fuzzy Logic Control (FLC)	Metode FLA yang diusulkan memberikan respon yang tepat terhadap perubahan kondisi lingkungan dengan kecepatan dan akurasi yang sesuai dan tidak mengalami chattering dalam kondisi stabil, lebih baik dibandingkan metode Hill Climbing (HC) dan P&O (Eydi et al., 2020).
#13	<i>"Performance optimization of the INC-COND fuzzy MPPT based on a variable step for photovoltaic systems"</i>	INC-Fuzzy MPPT	Metode INC-Fuzzy yang diusulkan menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 99.9% dari perubahan kondisi atmosfer sebesar, lebih baik dibandingkan dengan metode INC, Fuzzy, P&O konvensional (Abouobaida et al., 2023).
#14	<i>"Design and Implementation of Modified INC, Conventional INC, and Fuzzy Logic Controllers Applied to a PV System under Variable Weather Conditions"</i>	INC-Modifiedn	Metode INC-Modifikasi mampu menghasilkan nilai efisiensi sebesar 99.98% berdasarkan kecepatan MPP dan perubahan kondisi atmosfer. Lebih baik dibandingkan dengan metode INC dan FLC konvensional (Bouksaim et al., 2021).
#15	<i>"Fuzzy Logic Approach for Maximum Power Point Tracking Implemented in a"</i>	Fuzzy Logic Controller (FLC)	Metode FLC yang diusulkan mampu mengurangi chatting, overshoot dan undershoot yang

Label	Judul	Metode	Hasil
	<i>Real Time Photovoltaic System</i>		lebih kecil dibandingkan metode P&O dan Sliding Mode Controller (SMC) (Napole et al., 2021).

Tabel 2 telah menyajikan 15 artikel yang digunakan pada literature review ini dimana setiap artikel mempunyai algoritma dan efisiensi yang dihasilkan. Dari 15 artikel tersebut dikelompokkan berdasarkan basis kontroler adalah algoritma INC, PID dan FLC serta kombinasi akan disajikan pada tabel 3.

Tabel 3. Tren algoritma MPPT

Metode	Artikel
InC	#9, #11, #13, #14
PID	#1, #2, #3, #4, #5, #7
FLC	#6, #8, #10, #12, #15

Penggunaan algoritma yang berbasis PID adalah yang terbanyak pada penelitian ini, kedua algoritma berbasis FLC dan yang terakhir INC. Setiap algoritma yang diusulkan mampu memberikan kinerja yang terbaik dibandingkan dengan algoritma yang lain sebagai pembanding. Algoritma yang diusulkan di test kinerjanya pada perubahan iradiasi matahari dan perubahan temperatur lingkungan. Terdapat algoritma yang digunakan adalah kombinasi seperti pada #1 yakni kontroler N-DPID yang dioptimasi menggunakan PSO lebih baik dibandingkan optimasi menggunakan GA. pada #5 #6 menggunakan integrasi Neural Network (NN) pada kontroler, #5 metode yang diusulkan mampu meningkat 25,4% dalam akurasi pelacakan dan 11,3% dalam kecepatan tanggapan dibawah perubahan kondisi lingkungan lebih baik dibandingkan dengan kontroler konvensional FOPID. #6 metode yang diusulkan menghasilkan efisiensi sebesar 99.84% berdasarkan perubahan kondisi atmosfer.

Penggunaan kontrol yang dimodifikasi juga menghasilkan nilai efisiensi yang besar, pada #8 #14 berhasil mencapai MPP dengan osilasi yang rendah serta undershoot/overshoot yang kecil. Pada #14 menghasilkan nilai efisiensi sebesar 99.98% berdasarkan perubahan kondisi atmosfer. Meskipun nilai efisiensi yang dihasilkan besar, beberapa metode memiliki kelemahan salah satunya yaitu komputasi yang berat. #9 #11 Penggunaan kombinasi optimasi seperti GWO, PSO menghasilkan efisiensi yang besar hingga 98.25% yang mana membutuhkan komputasi yang berat untuk berhasil mencapai nilai tersebut. Pada kebanyakan artikel metode konvensional digunakan sebagai pembanding.

5. Kesimpulan

Tujuan dari pelaksanaan SLR ini adalah untuk mengetahui tren penggunaan algoritma MPPT pada PV System dari 15 penelitian berbasis artikel. 15 artikel tersebut menjawab pertanyaan penelitian yaitu hasil efisiensi dari penggunaan algoritma. Beberapa artikel membahas penggunaan metode konvensional dan kombinasi. Metode kombinasi seperti penggunaan metode optimasi menghasilkan efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan metode konvensional. Terlepas dari itu metode kombinasi memerlukan komputasi yang berat, sehingga menjadi salah satu kelemahan. Tren penggunaan algoritma ditunjukkan pada tabel 3 menunjukkan metode berbasis PID paling banyak digunakan pada SLR ini. Artikel ini dapat menjadi pedoman untuk pengembangan algoritma MPPT di masa mendatang.

Daftar Pustaka

- Abouobaida, H., Mchaouar, Y., Abouelmahjoub, Y., Mahmoudi, H., Abbou, A., & Jamil, M. (2023). Performance optimization of the INC-COND fuzzy MPPT based on a variable step for photovoltaic systems. *Optik*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.170657>
- Ahmadi, M. H., Baghban, A., Sadeghzadeh, M., Zamen, M., Mosavi, A., Shamsirband, S., Kumar, R., & Mohammadi-Khanaposhtani, M. (2020). Evaluation of electrical efficiency of photovoltaic thermal solar collector. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1), 545–565. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1734094>
- Aly, M., Mohamed, E. A., Rezk, H., Nassef, A. M., Elhosseini, M. A., & Shawky, A. (2023). An Improved Optimally Designed Fuzzy Logic-Based MPPT Method for Maximizing Energy Extraction of PEMFC in Green Buildings. *Energies*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/en16031197>
- Bouksaim, M., Mekhfioui, M., & Srfi, M. N. (2021). Design and implementation of modified inc, conventional inc, and fuzzy logic controllers applied to a pv system under variable weather conditions. *Designs*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/designs5040071>
- Chauhan, U., Chhabra, H., Rani, A., Kumar, B., & Singh, V. (2023). Efficient MPPT Controller for Solar PV System Using GWO-CS Optimized Fuzzy Logic Control and Conventional Incremental Conductance Technique. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Electrical Engineering*, 47(2), 463–472. <https://doi.org/10.1007/s40998-022-00569-3>
- Didi, F., & Chaouche, M. S. (2022). DESIGN AND SIMULATION OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM'S PERFORMANCE ANALYSIS WITH OPTIMAL CONTROL OF MAXIMUM POWER POINT TRACKING BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE. *Review of Computer Engineering Research*, 9(3), 151–168. <https://doi.org/10.18488/76.v9i3.3144>
- Eydi, M., Hosseini Sabzevari, S. I., & Ghazi, R. (2020). A novel strategy of maximum power point tracking for photovoltaic panels based on fuzzy logic algorithm. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 18(1), 1–10. <https://doi.org/10.15598/aeee.v18i1.3511>
- Hichem, L., Amar, O., & Leila, M. (2023). Optimized ANN-fuzzy MPPT controller for a stand-alone PV system under fast-changing atmospheric conditions. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 12(4), 1960–1981. <https://doi.org/10.11591/eei.v12i4.5099>
- Hou, T., & Wang, S. (2023). Research on the MPPT of Photovoltaic Power Generation Based on the CSA-INC Algorithm. *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering*, 120(1), 87–106. <https://doi.org/10.32604/ee.2022.022122>
- Kacimi, N., Idir, A., Grouni, S., & Boucherit, M. S. (2023). Improved MPPT Control Strategy for PV Connected to Grid Using IncCond-PSO-MPC Approach. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 9(3), 1008–1020. <https://doi.org/10.17775/CSEEPES.2021.08810>
- Kanagaraj, N., & Al-Ansi, M. (2023). Maximum Power Extraction Control Algorithm for Hybrid Renewable Energy System. *Computer Systems Science and Engineering*, 45(1), 769–784. <https://doi.org/10.32604/csse.2023.029457>
- Kaya, E., Baştumur Kaya, C., Bendeş, E., Atasever, S., Öztürk, B., & Yazlık, B. (2023). Training of Feed-Forward Neural Networks by Using Optimization Algorithms Based on Swarm-Intelligent for Maximum Power Point Tracking. *Biomimetics*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/biomimetics8050402>
- Khatibi, A., Razi Astarai, F., & Ahmadi, M. H. (2019). Generation and combination of the solar cells: A current model review. In *Energy Science and Engineering* (Vol. 7, Issue 2, pp. 305–322). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/ese3.292>

- Murugaperumal, K., Srinivasn, S., & Satya Prasad, G. R. K. D. (2020). Optimum design of hybrid renewable energy system through load forecasting and different operating strategies for rural electrification. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100613>
- Napole, C., Derbeli, M., & Barambones, O. (2021). Fuzzy logic approach for maximum power point tracking implemented in a real time photovoltaic system. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(13). <https://doi.org/10.3390/app11135927>
- Nasir, A., Rasool, I., Sibtain, D., & Kamran, R. (2021). Adaptive Fractional Order PID Controller Based MPPT for PV Connected Grid System Under Changing Weather Conditions. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 16(5), 2599–2610. <https://doi.org/10.1007/s42835-021-00782-w>
- Ngo, Q. V., & Nguyen, T. T. (2021). The mppt algorithm combined with pitch angle control for the small-scale wind turbine in a wide speed range. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 12(3), 1482–1493. <https://doi.org/10.11591/ijped.v12.i3.pp1482-1493>
- Pathak, D., Sagar, G., & Gaur, P. (2020). An Application of Intelligent Non-linear Discrete-PID Controller for MPPT of PV System. *Procedia Computer Science*, 167, 1574–1583. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.368>
- Rajput, P., Malvoni, M., Kumar, N. M., Sastry, O. S., & Jayakumar, A. (2020). Operational performance and degradation influenced life cycle environmental-economic metrics of mc-si, a-si and hit photovoltaic arrays in hot semi-arid climates. *Sustainability (Switzerland)*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/su12031075>
- S, M., & S, M. (2022). Nonlinear PID (N-PID) Controller for SSSP Grid Connected Inverter Control of Photovoltaic Systems. *Electric Power Systems Research*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108175>
- Saleem, O., Ali, S., & Iqbal, J. (2023). Robust MPPT Control of Stand-Alone Photovoltaic Systems via Adaptive Self-Adjusting Fractional Order PID Controller. *Energies*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/en16135039>
- Sarvi, M., & Azadian, A. (2022). A comprehensive review and classified comparison of MPPT algorithms in PV systems. In *Energy Systems* (Vol. 13, Issue 2, pp. 281–320). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s12667-021-00427-x>
- Shi, X., & Li, G. (2023). Perturbation Observation Method Based on Fractional Order PID and Extended State Observer. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 18(4), 2623–2632. <https://doi.org/10.1007/s42835-022-01369-9>
- Smadi, T. Al, Handam, A., Gaeid, K. S., Al-Smadi, A., Al-Husban, Y., & Khalid, A. smadi. (2024). Artificial intelligent control of energy management PV system. *Results in Control and Optimization*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.rico.2023.100343>
- Ullah, K., Ishaq, M., Tchier, F., Ahmad, H., & Ahmad, Z. (2023). Fuzzy-based maximum power point tracking (MPPT) control system for photovoltaic power generation system. *Results in Engineering*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101466>
- Zhang, L., Wang, Z., Cao, P., & Zhang, S. (2020). A maximum power point tracking algorithm of load current maximization-perturbation and observation method with variable step size. *Symmetry*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/sym12020244>