

TINJAUAN SISTEMATIS KOMPARATIF ALGORITMA *CUCKOO* SEARCH DAN VARIANNYA DALAM PELACAKAN GMPP PADA KONDISI PARTIAL SHADING

Anak Agung Istri Pandawani^{*1}, Ida Bagus Gede Manuaba², Agus Dharma³

¹Magister Teknik Elektro Universitas Udayana, Indonesia

^{2,3}Departemen Magister Teknik Elektro, Universitas Udayana, Indonesia

Email: ¹istripandawani27@gmail.com, ²ibgmanuaba@unud.ac.id

Abstrak

Kegagalan algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) konvensional dalam mengatasi *Partial Shading Condition* (PSC) telah mendorong pengembangan algoritma optimasi, khususnya *Cuckoo Search* (CS). Namun, banyaknya varian CS (standar, modifikasi, hibrid) menghasilkan literatur kinerja yang terfragmentasi. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan tinjauan sistematis guna mengidentifikasi, membandingkan, dan menganalisis kinerja berbagai varian CS dalam mengatasi PSC. Metode penelitian menggunakan tinjauan sistematis dengan sintesis naratif terhadap enam studi primer yang relevan. Menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) dengan kerangka kerja PRISMA periode 2016–2026, proses seleksi ketat menghasilkan enam studi primer yang layak dianalisis. Data kinerja khususnya efisiensi pelacakan dan waktu konvergensi diekstraksi dan dianalisis dalam tabel sintesis. Hasil menunjukkan bahwa waktu konvergensi CS standar (0.30s-0.33s) lebih unggul dari PSO (0.38s-0.41s) tetapi secara signifikan lebih lambat dari ANN (0.12s). Temuan utama menunjukkan bahwa strategi modifikasi (0.19s-0.21s) dan hibridisasi (0.28s) terbukti secara konsisten mampu mengatasi kelemahan CS Standar dengan meningkatkan kecepatan konvergensi secara drastis. Tinjauan ini mengidentifikasi kesenjangan penelitian utama berupa fokus pengujian yang seragam pada skenario PSC statis dan penggunaan konverter boost. Temuan teknis ini tidak hanya berkontribusi pada pengembangan *smart inverter*, tetapi juga menyediakan data karakteristik non-linier yang valid sebagai objek studi kasus nyata. Implikasi penelitian ini diharapkan dapat memperkaya literasi teknologi serta menguatkan pemahaman konseptual akademik.

Kata kunci: *Algoritma Cuckoo Search, Fotovoltaik, MPPT, Partial Shading Condition, Tinjauan Sistematis*

A SYSTEMATIC COMPARATIVE REVIEW OF CUCKOO SEARCH ALGORITHMS AND THEIR VARIANTS FOR GMPP TRACKING UNDER PARTIAL SHADING CONDITIONS

Abstract

The failure of conventional *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) algorithms in handling *Partial Shading Conditions* (PSC) has driven the development of optimization algorithms, particularly the *Cuckoo Search* (CS). However, the multitude of CS variants (standard, modified, hybrid) has resulted in fragmented performance literature. This study aims to conduct a systematic review to identify, compare, and analyze the performance of various CS variants in overcoming PSC. The research methodology employs a systematic review with a narrative synthesis of six relevant primary studies. Utilizing the *Systematic Literature Review* (SLR) method with the PRISMA framework for the 2016–2026 period, a rigorous selection process yielded six primary studies eligible for analysis. Performance data, specifically tracking efficiency and convergence time, were extracted and analyzed within a synthesis table. The results show that the convergence time of standard CS (0.30s–0.33s) is superior to PSO (0.38s–0.41s) but significantly slower than ANN (0.12s). Main findings indicate that modification (0.19s–0.21s) and hybridization (0.28s) strategies are consistently proven capable of overcoming the weaknesses of standard CS by drastically improving convergence speed. This review identifies a major research gap, namely the uniform testing focus on static PSC scenarios and the use of boost converters. These technical findings not only contribute to the development of *smart inverters* but also provide valid non-linear characteristic data as real-world case study objects. The implications of this research are expected to enrich technological literacy and strengthen academic conceptual understanding.

Keywords: *Cuckoo Search Algorithm, MPPT, Partial Shading Condition, Photovoltaic, Systematic Review.*

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan potensi energi surya sebagai sumber energi hijau untuk membangkitkan listrik kian marak secara global. Hal ini terindikasi dari peningkatan kapasitas instalasi sistem photovoltaic (PV) yang telah mencapai 3 TW di seluruh dunia, naik dari 2,7 TW pada tahun 2024 dengan estimasi sistem baru yang terpasang mencapai 698 GW[1]. Sistem fotovoltaiik diposisikan sebagai salah satu komponen fundamental dalam bauran energi terbarukan di masa depan. Adopsi dalam skala masif ini mengimplikasikan tantangan teknis yang bersumber dari karakteristik keluaran daya sistem fotovoltaiik yaitu bersifat intermiten. Sifat intermiten ini merupakan akibat dari dependensi sistem yang tinggi terhadap kondisi matahari dan cuaca yang fluktuatif, sehingga berimplikasi langsung pada isu keandalan (*reliability*) dan stabilitas (*stability*) sistem tenaga listrik secara keseluruhan [2].

Fluktuasi kondisi penyinaran matahari akan menciptakan tantangan optimasi daya yang disebut sebagai kondisi bayangan parsial atau *partial shading condition* (PSC) [3]. Fenomena ini terjadi ketika sebagian modul dalam sebuah array PV menerima tingkat iradiasi matahari yang tidak seragam, yang disebabkan oleh faktor lingkungan seperti bayangan bangunan, awan dan lainnya atau karena faktor ketidakserasian (*mismatch*) karakteristik internal antar modul [4]. Implikasi teknis utama dari PSC adalah distorsi kurva karakteristik P-V (Daya-Tegangan) sistem, yang berubah menjadi non-linier kompleks dan ditandai dengan munculnya beberapa puncak daya lokal (*Local Maximum Power Point/LMPP*) serta satu puncak daya global (*Global Maximum Power Point/GMPP*). Variasi daya keluaran yang dinamis dan sulit diprediksi ini menjadi tantangan optimasi yang signifikan, karena dapat mengakibatkan kerugian daya (*power losses*) jika sistem gagal mengunci operasi pada titik GMPP yang sebenarnya[5], [6].

Dalam upaya mengatasi tantangan optimasi variasi daya dan kurva P-V yang kompleks ini, teknologi *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) telah menjadi komponen integral dalam desain sistem PV. Secara historis, algoritma konvensional terutama *Perturb & Observe* (P&O) dan *Incremental Conductance* (IncCond) telah diadopsi secara luas karena kesederhanaan implementasinya [7]. Akan tetapi, metode-metode ini memiliki keterbatasan karena dirancang untuk melacak kurva P-V dengan puncak tunggal. Ketika dihadapkan pada kurva dengan banyak titik puncak lokal yang dihasilkan oleh PSC, kinerja algoritma konvensional ini menurun secara drastis. Mereka tidak memiliki kemampuan untuk membedakan antara puncak lokal dan global, sehingga seringkali terjebak pada LMPP pertama yang terdeteksi dan gagal mengonversi daya pada titik GMPP [8]. Kegagalan konvergensi dari P&O standar dalam kondisi kompleks inilah yang mendorong berbagai penelitian untuk mencoba melakukan *tuning* parameternya, seringkali dengan bantuan algoritma optimasi seperti *cuckoo search* yang lebih mumpuni untuk meningkatkan efisiensinya [9].

Kegagalan konvergensi algoritma konvensional mendorong perkembangan ke arah algoritma pelacakan cerdas, yang secara umum dapat dikategorikan menjadi metode berbasis kecerdasan buatan (AI) seperti *Artificial Neural Networks* (ANN) [10], *Fuzzy Logic Controller* (FLC) [11], *Sliding Mode Control*, *Fibonacci Series-Based MPPT*, *Gauss Newton Technique*, *Genetic Algorithms*, [12] dan metode optimasi metaheuristik seperti *Grey Wolf Optimization* (GWO) [13], *Ant Colony Optimization* (ACO) [14], *Artificial Bee Colony* (ABC) [15], *Cuckoo Search and Particle Swarm Optimization* (PSO) [8]. Pendekatan algoritma AI berbasis data-historis [16] dan algoritma metaheuristik berbasis pencarian stokastik telah banyak dianalisis secara komparatif karena sama-sama menunjukkan kemampuan superior dalam menangani kondisi lingkungan yang tidak stabil [16][17]. Di dalam rumpun metaheuristik, algoritma *Cuckoo Search* (CS) secara partikular telah menarik perhatian luas di komunitas peneliti sejak diperkenalkan sebagai solusi MPPT yang mumpuni untuk mengatasi *partial shading* [18]. Popularitas CS didasarkan pada keunggulannya yang khas, yakni keseimbangan yang baik antara kesederhanaan struktur algoritma, jumlah parameter kontrol yang relatif minim, dan kemampuan pencarian global (*global search*) yang andal untuk mengidentifikasi GMPP secara akurat di antara banyaknya puncak lokal [19].

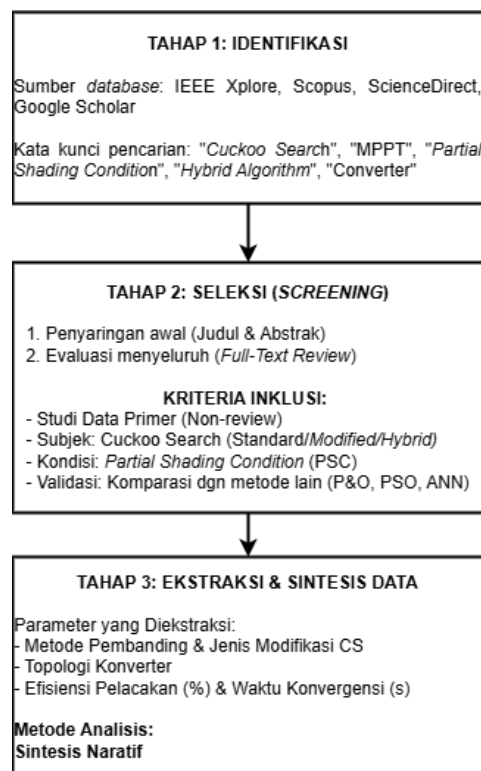
Pesatnya adopsi algoritma *Cuckoo Search* (CS) telah memicu lahirnya berbagai penelitian lanjutan, yang mencakup modifikasi algoritma [20], metode hybrid seperti CS-ANN atau CS-PSO [17] serta implementasi pada beragam topologi perangkat keras. Namun, diversifikasi yang sangat cepat ini secara simultan telah menghasilkan lanskap literatur yang terfragmentasi dan heterogen. Kinerja varian CS dilaporkan dengan menggunakan metode perbandingan yang tidak konsisten mulai dari P&O hingga ANN dan skenario pengujian PSC yang tidak seragam. Akibatnya, saat ini terdapat celah penelitian yang signifikan, yakni tidak adanya sintesis kuantitatif yang komprehensif untuk menentukan secara objektif varian algoritma mana yang paling unggul dan dalam kondisi apa. Urgensi untuk melakukan klasifikasi dan perbandingan metode secara sistematis menjadi sangat jelas untuk memberikan panduan yang valid bagi peneliti selanjutnya

Oleh karena itu, sebuah *systematic review* yang dilengkapi dengan pendekatan sintesis naratif sangat diperlukan untuk mengatasi fragmentasi literatur ini. Penelitian ini dirancang untuk mengagregasi, mengkategorisasi, dan membandingkan secara kritis temuan-temuan yang ada, guna memberikan gambaran utuh mengenai efektivitas algoritma *Cuckoo Search* (CS) dan variannya. Lebih jauh, temuan komprehensif ini diharapkan tidak hanya berkontribusi pada pengembangan teknologi sistem tenaga, tetapi juga memberikan landasan teoritis yang kuat bagi pengembangan bahan ajar, modul simulasi pembelajaran, dan pembaharuan kurikulum di bidang pendidikan teknologi informasi dan teknik elektro. Fokus utama dari *review* ini adalah untuk

memetakan secara kualitatif dan kuantitatif berbasis nilai tunggal keunggulan CS termasuk varian standar, modifikasi, dan hibridisasi terhadap berbagai metode pembandingan. Lebih jauh lagi, penelitian ini akan menganalisis secara mendalam variabel moderator seperti topologi konverter dan kompleksitas skenario PSC untuk mengidentifikasi pola kinerja. Dengan menyajikan temuan dalam tabel sintesis yang komprehensif, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan panduan berbasis bukti (*evidence-based guideline*) yang dapat menjadi rujukan valid bagi peneliti selanjutnya dalam memilih arsitektur MPPT yang paling tepat

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan metode tinjauan *systematic review* yang dirancang untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menginterpretasi seluruh penelitian relevan terkait topik yang ditentukan. Metodologi ini mengadopsi kerangka kerja PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) yang dimodifikasi untuk sintesis kualitatif dan kuantitatif naratif. Proses penelitian dibagi menjadi tiga tahapan utama. Tahap pertama adalah identifikasi studi, dilakukan pencarian literatur secara komprehensif pada *database* ilmiah utama, seperti *IEEE Xplore*, *Scopus*, *ScienceDirect*, dan *Google Scholar* dengan menggunakan kombinasi kata kunci terstruktur yaitu "*Cuckoo Search*", "MPPT", "*Partial Shading Condition*", "*Hybrid Algorithm*", "Converter". Rentang tahun pencarian literatur dibatasi pada 10 tahun terakhir, yaitu dari tahun 2016 hingga 2026 untuk menyisir relevansi dan kebaruan perkembangan teknologi MPPT. Pada tahap awal identifikasi ini, ditemukan total 15 artikel (*IEEE Xplore* = 4, *Scopus* = 2, *ScienceDirect* = 4, *Google Scholar* = 5).



Gambar 1. Skematik Penelitian

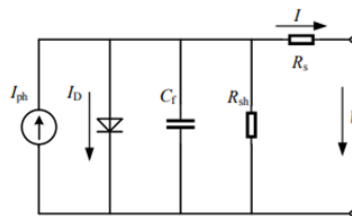
Tahap kedua adalah proses seleksi (*Screening and Eligibility*), dimana semua artikel yang ditemukan akan disaring secara ketat melalui peninjauan judul, abstrak, dan *full-text* berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Kriteria inklusi utama mencakup studi dengan data primer bukan berupa *review* yang menguji algoritma *Cuckoo Search* atau variannya seperti modifikasi atau hybrid, konteks penelitian wajib dalam *Partial Shading Condition* (PSC) dan studi menyertakan data komparasi dengan minimal satu metode MPPT lainnya seperti P&O, PSO, ANN, dll. Secara kuantitatif, alasan eksklusi artikel pada tahap ini dijabarkan sebagai berikut: sebanyak 1 artikel dieksklusi karena tidak menyediakan akses *full-text*, 2 artikel dieksklusi karena tidak menyertakan kondisi *partial shading* (PSC) dalam eksperimennya, 3 artikel dieliminasi karena hanya berupa artikel tinjauan, dan 1 artikel dikeluarkan karena tidak memuat data komparasi performa algoritma yang valid. Melalui proses seleksi ketat ini, diperoleh 6 artikel yang dinyatakan layak (*eligible*) untuk analisis lebih lanjut.

Tahap ketiga adalah ekstraksi data dan sintesis (*data extraction and synthesis*). Data relevan dari setiap studi yang lolos seleksi akan diekstraksi dan dipetakan ke dalam tabel sintesis untuk menganalisis variabel kunci seperti metode pembanding, jenis modifikasi CS, topologi konverter, efisiensi pelacakan (%), dan waktu konvergensi (s). Seluruh temuan ini kemudian akan dianalisis dan disajikan menggunakan pendekatan Sintesis Naratif (*Narrative Synthesis*) untuk menjawab rumusan masalah penelitian. Skematik penelitian yang dilakukan ditunjukkan pada Gambar 1.

3. TINJAUAN PUSTAKA

3.1. Karakteristik Sistem PV Saat PSC

Sel surya memiliki karakteristik tegangan, arus, dan daya keluaran yang cukup kecil, sehingga tidak dapat digunakan sebagai unit tunggal dalam aplikasi praktis. Sehingga untuk mendapatkan kapasitas yang lebih besar sel surya di jadikan satu rangkaian seri dan terbentuklah modul surya. Dioda tunggal digunakan untuk memodelkan sel surya karena memiliki akurasi dan kesederhanaan yang cukup. Model ini terdiri dari sumber arus (I_{ph}), sebuah dioda, sebuah resistor paralel (R_p), dan sebuah resistor seri (R_s) [21]. Rangkaian setara dari sel PV ditunjukkan pada Gambar 2. Persamaan (1) menjelaskan secara matematis untuk struktur terhubung dari panel PV yang serupa dengan sel PV [22]

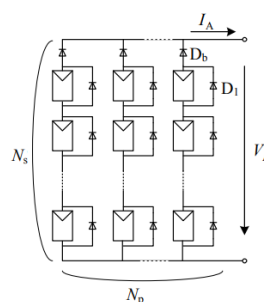


Gambar 2. Rangkaian Ekuivalen Sel Photovoltaic

Persamaan karakteristik I-V untuk sel PV berdasarkan prinsip fisika adalah sebagai berikut:

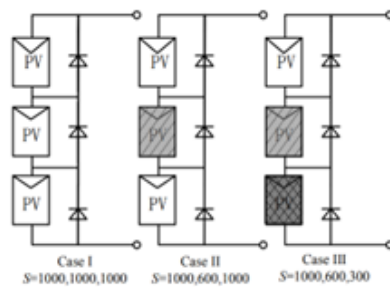
$$I = I_{ph} - I_o \{ \exp[B(V + IR_s)] - 1 \} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Dimana I_{ph} adalah arus yang dihasilkan oleh insiden cahaya; I_o adalah arus saturasi balik setara dari dioda; $B = q / (AKT)$, q adalah muatan elektron ($1.60217646 \times 10^{-19} \text{C}$), k adalah konstanta Boltzmann ($1.3806503 \times 10^{-23} \text{J/K}$), dan T adalah suhu sambungan p-n dalam Kelvin.



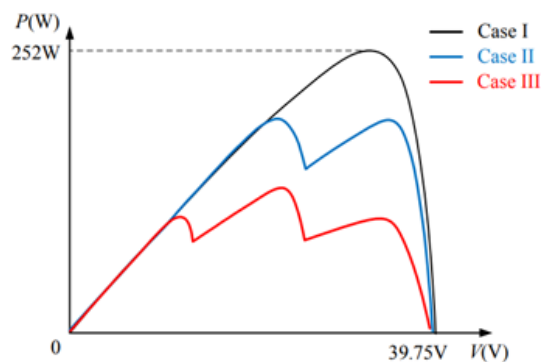
Gambar 3. Susunan Seri – Paralel Sel PV

Susunan sistem PV terdiri dari sel PV dengan koneksi seri-paralel ditunjukkan oleh Gambar 3. N_s adalah jumlah seri dan N_p adalah jumlah paralel. Saat kondisi PSC, panel yang terkena bayangan tidak dapat menghasilkan daya dan menjadi beban sehingga menciptakan efek pemanasan hotspot dan mampu menyebabkan kerusakan pada seluruh panel PV. Mengatasi masalah tersebut panel PV biasanya dihubungkan secara paralel dengan dioda bypass [8]. Tiga sel PV seri diberikan bayangan yang berbeda seperti pada Gambar 4. Pada Gambar 5 diberikan kurva PV di bawah pencahayaan yang sama dan terkena bayangan yang berbeda. Sehingga dapat dilihat ketika sel PV terkena bayangan yang berbeda maka global MPP juga akan berubah. Kondisi seperti ini juga akan terjadi pada susunan PV lainnya dengan tingkat bayangan yang berbeda.

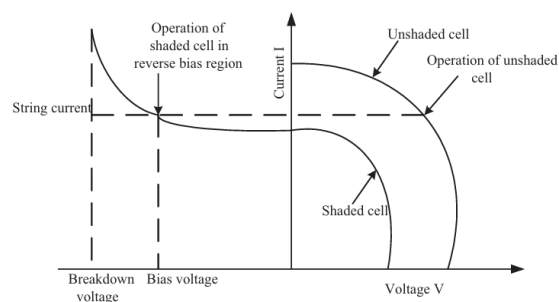


Gambar 4. Sistem PV dengan Skenario Pembayangan

Dengan parameter sel PV yaitu $I_{SC} = 8 \text{ A}$, $V_{OC} = 13.25 \text{ V}$, $I_{MPP} = 7.58 \text{ A}$, $V_{MPP} = 10.5 \text{ V}$, $S_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$. Ketika PV array beroperasi pada iradiasi matahari yang seragam, kurva P-V akan menunjukkan satu titik maksimum (MPP). Namun, saat PSC dioda bypass akan mengubah bentuk kurva P-V menjadi bentuk yang lebih rumit dan terdiri dari beberapa titik maksimum lokal (LMPP) dan satu MPP global.



Gambar 5. Kurva P-V dengan Pengaruh Pembayangan



Gambar 6. Kurva Sel P-V Pada Saat Terjadi Pembayangan

Saat PSC akan sulit untuk melacak GMPP diantara banyaknya LMPP. Hal ini dikarenakan sebagian susunan sel PV menerima iradiasi seragam dan beroperasi pada efisiensi optimum pada PSC. Sel yang terkena bayangan akan beroperasi dengan tegangan bias balik untuk memberikan arus yang sama seperti yang diberikan oleh sel menerima iradiasi penuh karena jumlah arus yang konstan harus mengalir di setiap modul dalam konfigurasi seri modul PV [22]. Pada Gambar 5 menunjukkan sel PV yang terkena bayangan beroperasi di daerah tegangan bias balik untuk memberikan arus yang sama seperti yang diberikan oleh sel yang tidak terkena bayangan. Ini merupakan contoh penggunaan sub-bab pada paper. Sub-bab diperbolehkan untuk dimasukkan pada semua bab, kecuali di kesimpulan.

3.2. Algoritma Cuckoo Search

Algoritma *Cuckoo Search* pertama kali diusulkan oleh Yang & Deb pada tahun 2009. Algoritma CS adalah metode metaheuristik yang terinspirasi oleh perilaku spesies burung *cuckoo* dalam proses reproduksi mereka. *Cuckoo* adalah salah satu organisme parasit yang meletakkan telur mereka di dalam sarang burung lain daripada membangun sarang mereka sendiri. Burung *cuckoo* akan terbang secara acak dari satu sarang ke sarang lain untuk

mencari kandidat sarang inang. Kemudian, ia akan memilih sarang terbaik agar telur mereka memiliki peluang terbaik untuk menetas dan menghasilkan generasi baru *cuckoo*.

Dalam kondisi tertentu, burung *cuckoo* akan melakukan upaya untuk meningkatkan peluang menetas dengan secara strategis meletakkan telur mereka di posisi yang baik dan terkadang membuang telur burung inang keluar dari sarang. Beberapa spesies *cuckoo* bahkan berevolusi untuk mampu menghasilkan telur yang mirip dengan spesies burung inangnya. Namun demikian, masih ada kemungkinan burung inang menemukan telur asing tersebut dan meninggalkan sarang mereka. Dalam kasus ini, telur *cuckoo* akan gagal menetas. Berdasarkan perilaku alami ini, algoritma optimasi *Cuckoo Search* dikembangkan.

Dalam masalah objektif tunggal seperti masalah MPPT, terdapat tiga aturan karakteristik ideal untuk mengimplementasikan metode ini [23]. Aturan-aturan tersebut tercantum sebagai berikut:

1. Setiap burung *cuckoo* hanya akan meletakkan satu telur di sarang inang yang dipilih secara acak.
2. Hanya sarang terbaik yang berisi organisme berkualitas tinggi yang akan melanjutkan ke generasi burung *cuckoo* berikutnya.

Jumlah sarang inang dalam ekosistem ditetapkan bersifat konstan, dengan probabilitas penemuan telur asing oleh burung inang sebesar $P_a \in [0,1]$. Jika burung inang menemukan telur asing, sarang akan dihancurkan atau ditinggalkan. Burung inang kemudian membangun sarang baru di tempat lain.

Dari perspektif optimasi, burung *cuckoo* mewakili partikel yang ditugaskan untuk menemukan solusi, sedangkan telur burung *cuckoo* mewakili solusi untuk proses iterasi yang dilakukan saat ini dari masalah optimasi. Dalam algoritma CS, langkah acak dalam proses pelacakan dikarakterisasi menggunakan distribusi tertentu. Banyak hewan, termasuk burung *cuckoo*, melakukan penerbangan acak di alam. Perilaku ini menunjukkan karakteristik khas dari Lévy flight. *Lévy flight* berarti bahwa panjang langkah gerakan atau penerbangan akan mengikuti distribusi Lévy, memungkinkan algoritma CS untuk melakukan lompatan jauh di antara penerbangan kecil mereka. Lompatan jauh ini adalah fitur penting, yang memungkinkan algoritma CS untuk menghindari LMP (*Local Maximum Point*) dan pada saat yang sama akan memperpendek waktu pelacakan yang diperlukan untuk mencapai GMPP (*Global Maximum Power Point*). Secara umum karakteristik *Lévy flight* ditunjukkan oleh persamaan 2

$$x_j^{i+1} = x_j^i + \alpha \oplus \text{Lévy} \quad (2)$$

Dimana, operator $\oplus$ merepresentasikan perkalian elemen-per-elemen (*entrywise multiplication*) untuk masalah multidimensi. Dalam MPPT, persamaan *Lévy flight* dapat disederhanakan menjadi :

$$x_j^{i+1} = x_j^i + \alpha \cdot \text{Lévy} = v_j^i + s \quad (3)$$

dimana

$$s \approx K \cdot \left(\frac{u}{|v|^{\frac{1}{\beta}}} \right) (V_{best} - V_j) \quad (4)$$

Nilai v_j^i mewakili tegangan partikel ke-j pada siklus iterasi ke-i, β adalah indeks hukum pangkat (*power law index*) yang ditetapkan sebesar 1,5 dalam makalah ini, dan K adalah koefisien langkah. Variabel u dan v mengikuti distribusi.

$$u \approx N(0, \sigma_u^2); v \approx N(0, \sigma_v^2) \quad (5)$$

$$\sigma_u \approx \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \times \sin\left(\pi \frac{\beta}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right) \times \beta \times \left(2 \frac{\beta-1}{2}\right)} \right)^{\frac{1}{\beta}}; \sigma_v = 1 \quad (6)$$

Γ adalah integral fungsi gamma.

Lévy flights digunakan oleh semua partikel dalam setiap siklus iterasi sampai partikel tersebut menemukan GMPP. Proses pelacakan akan berhenti jika semua partikel konvergen ke satu solusi. Suatu bilangan yang sangat kecil secara arbitrer digunakan sebagai kriteria konvergensi untuk memastikan solusi yang optimal [24]

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses tinjauan sistematis dimulai dengan pencarian literatur pada database ilmiah terindeks IEEE *Xplore*, *Scopus*, *ScienceDirect*, dan *Google Scholar* menggunakan kata kunci yang telah ditentukan. Setelah melalui tahapan *screening* judul, abstrak, dan eliminasi duplikasi, dilakukan peninjauan berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Dari proses ini, sebanyak enam studi primer yang memenuhi seluruh kriteria kelayakan dan dimasukkan ke dalam sintesis naratif kuantitatif ini. Data kinerja kuantitatif yang relevan meliputi efisiensi pelacakan dan waktu konvergensi diekstraksi dari keenam studi yang lolos seleksi. Data ini kemudian dipetakan dan dirangkum dalam Tabel 1 untuk memfasilitasi analisis komparatif. Data ini menjadi dasar utama untuk pembahasan dan penarikan kesimpulan.

Tabel 1. Sintesis Komparasi Parameter Hasil Pelacakan Algoritma MPPT

Studi	Metode Uji (Grup 1)	Metode Pembanding (Grup 2)	Konteks Pengujian (PSC)	Jenis Konverter	Efisiensi Uji (%)	Efisiensi Pembanding (%)	Waktu Konv. Uji (s)	Waktu Konv. Pembanding (s)
[25]	Mod-CSA (New Efficient) + Super-Twist SMC	P&O	Skenario 1 (3 Puncak, Statis)	Boost	99.90	88.30	~0.15	~1.10
[24]	Hybrid CSA-GSS (Golden Section)	Standard CSA	Case A (3 Puncak, Statis)	Boost	99.98	99.98	0.28	0.43
[26]	Improved CSA (ICSA)	PSO	Case 1 (4 Puncak, Statis)	Boost	99.99	99.98	0.21	0.50
[17]	Standard CSA	ANN	Pattern 1 (3 Puncak, Statis)	Boost	99.60	99.70	0.30	0.12
[27]	Standard CSA	PSO	Case 2 (3 Puncak, Statis)	Boost	99.55	99.30	0.33	0.41
[28]	Improved CSA (ICS)	PSO	Case 2 (4 Puncak, Statis)	Boost	99.89	99.42	0.19	0.38

Analisis terhadap data sintesis pada Tabel 1 difokuskan pada tiga aspek utama yaitu perbandingan kinerja CSA standar dengan algoritma pembanding, dampak modifikasi internal terhadap kinerja CSA, dan dampak hibridisasi CSA dengan algoritma lain. Terdapat dua studi [17], [27] yang menyediakan data perbandingan langsung untuk *Cuckoo Search* (CS) standar. Pada [27] menunjukkan bahwa dalam skenario PSC dengan 3 puncak, CS Standar memiliki efisiensi 99.55%, waktu konvergensi 0.33s. Nilai tersebut menunjukkan kinerja yang lebih unggul dibandingkan PSO dengan efisiensi 99.30%, waktu konvergensi 0.41s. Namun, perbandingan dengan metode berbasis kecerdasan buatan (AI) menunjukkan hasil yang berbeda. Pada [17] dilakukan perbandingan antara CS Standar dengan ANN. Dalam skenario ini menggunakan 3 puncak, didapatkan hasil yaitu ANN memiliki efisiensi 99.70%, waktu konvergensi 0.12s terbukti secara signifikan lebih cepat dan sedikit lebih efisien daripada CS Standar dengan efisiensi 99.60%, waktu konvergensi 0.30s. Temuan ini menyoroti adanya *trade-off* di mana CS Standar mungkin unggul terhadap metaheuristik lain seperti PSO, tetapi menghadapi tantangan kecepatan jika dibandingkan dengan metode berbasis data seperti ANN.

Temuan signifikan dari tinjauan sistematis ini adalah dampak positif dari modifikasi internal algoritma *Cuckoo Search* pada [25], [26], [28]. Bukti keunggulan ini terlihat jelas ketika membandingkan versi Improved CSA (ICSA/ICS) dengan PSO. Pada [26] mencatat Improved CSA memiliki waktu konvergensi 0.21 detik sedangkan PSO memiliki waktu konvergensi 0.50 detik. Pada [28] mencatat Improved CSA memiliki waktu konvergensi 0.19 detik sedangkan PSO memiliki waktu konvergensi 0.38 detik. Pola ini menjadi semakin signifikan jika disintesis dengan kinerja CS Standar dari [27], yang mencatat waktu konvergensi 0.33 detik

sedangkan waktu konvergensi PSO 0.41 detik. Sintesis kinerja ini menunjukkan bahwa modifikasi internal (ICSA/ICS) terbukti secara drastis meningkatkan kecepatan konvergensi dari 0.33 detik menjadi 0.19-0.21 detik dengan tetap mempertahankan efisiensi pelacakan yang sangat tinggi yaitu mendekati 100%. Lebih lanjut, superioritas ini juga terkonfirmasi dalam perbandingan terhadap metode konvensional [25] menunjukkan bahwa *New Efficient CSA* memiliki waktu konvergensi 0.15 detik dan efisiensi 99.90%. Hasil *New Efficient CSA* tidak hanya jauh lebih cepat tetapi juga secara lebih efisien daripada P&O yaitu 88.30% yang gagal menemukan GMPP dalam skenario PSC. Analisis ini secara kolektif menunjukkan bahwa kelemahan utama CS Standar, yakni kecepatan konvergensi yang moderat, dapat diatasi secara efektif melalui perbaikan dan modifikasi internal pada algoritma.

Selain modifikasi internal, strategi hibridisasi algoritma juga teridentifikasi sebagai pendekatan yang valid untuk meningkatkan kinerja algoritma *Cuckoo Search*. Pada studi [24], diimplementasikan strategi hibridisasi dengan menggabungkan *Cuckoo Search* (CSA) dengan *Golden Section Search* (GSS). Keunikan dari studi ini terletak pada perbandingan langsung antara metode *Hybrid CSA-GSS* dengan *Standard CSA* dalam kondisi pengujian yang identik 3 puncak. Hasilnya menunjukkan bahwa meskipun efisiensi pelacakan keduanya tercatat identik pada 99.98%, metode *Hybrid CSA-GSS* mampu mencapai GMPP secara signifikan lebih cepat dengan waktu konvergensi 0.28 detik dibandingkan dengan *Standard CSA* yaitu 0.43 detik. Temuan ini membuktikan bahwa hibridisasi adalah strategi yang efektif, di mana CS dioptimalkan untuk pencarian global dalam menemukan area GMPP dan GSS dimanfaatkan untuk pencarian lokal penyempurnaan cepat, sehingga secara efektif mengoptimalkan kecepatan pelacakan secara keseluruhan.

Analisis terhadap data di Tabel 1 menunjukan bahwa variabel moderator memiliki peran yang penting. Seluruh studi menggunakan konverter tipe boost sebagai topologi daya, menunjukkan bahwa ini adalah platform standar untuk pengujian simulasi MPPT. Selain itu, heterogenitas dalam Konteks Tes PSC meliputi jumlah puncak, statis dan dinamis serta penggunaan metode pembanding yang beragam (P&O, PSO, ANN, CS Standar) mengkonfirmasi celah penelitian yang diidentifikasi di pendahuluan.

Analisis sintesis terhadap keenam studi pada Tabel 1 tidak hanya mengkonfirmasi tren kinerja, tetapi juga secara krusial menyoroti beberapa kesenjangan penelitian (*research gaps*) yang signifikan. Kesenjangan pertama dan yang paling terlihat adalah fokus pengujian yang seragam pada skenario *Partial Shading Condition* (PSC) yang bersifat Statis. Seluruh studi yang dianalisis melaporkan hasil utamanya dalam kondisi statis seperti 3 puncak, statis. Skenario ini penting untuk mengukur akurasi *steady-state*, namun tidak mencerminkan kondisi operasional dunia nyata atau keadaan sebenarnya. Akibatnya, belum ada data komparatif yang menunjukkan bagaimana kinerja dari Improved CSA [26] atau Hybrid CSA-GSS [24] saat dihadapkan pada perubahan PSC yang tiba-tiba dinamis terutama kecepatan *re-tracking*. Kesenjangan kedua adalah keterbatasan validasi pada topologi konverter yang beragam. Seluruh studi secara homogen menggunakan konverter *boost*. Hal ini menimbulkan pertanyaan baru terkait keunggulan algoritma jika direplikasi pada topologi lain seperti SEPIC, Cuk, atau *Buck-Boost*, mengingat dinamika algoritma dan konverter saling terkait.

Kesenjangan ketiga terletak pada kurangnya perbandingan langsung antara strategi peningkatan kinerja. Tabel 1 mengidentifikasi dua tren yaitu modifikasi internal [26], [28] dan hibridisasi eksternal [24]. Namun, studi modifikasi membandingkan diri dengan PSO, sementara studi hibridisasi membandingkan diri dengan CS Standar. Belum ada studi yang menjawab strategi mana yang lebih unggul untuk meningkatkan kecepatan CS antara modifikasi internal atau hibridisasi eksternal. Kesenjangan keempat muncul dari temuan [17] bahwa waktu konvergensi ANN lebih cepat daripada CS Standar. Sementara studi lain membuktikan Improved CSA jauh lebih cepat dari CS Standar, namun belum dibuktikan lebih cepat dibandingkan dengan ANN. Belum ada perbandingan langsung antara varian CS yang telah dimodifikasi (ICSA) dibandingkan dengan ANN dalam kondisi simulasi yang sama. Identifikasi kesenjangan-kesenjangan ini memberikan peta jalan yang jelas untuk penelitian selanjutnya di bidang MPPT berbasis *Cuckoo Search*, dengan fokus pada pengujian dinamis, validasi perangkat keras yang beragam, dan perbandingan langsung antar strategi optimasi lanjutan.

Berdasarkan data eksperimen yang dipaparkan, keunggulan *Cuckoo Search Algorithm* (CSA) dalam mengunci titik daya maksimum (GMPP) secara stabil di bawah PSC memberikan kontribusi nyata terhadap arah pengembangan teknologi inverter cerdas berbasis kecerdasan buatan. Di samping kontribusi rekayasa teknis tersebut, karakteristik konvergensi dan visualisasi data kurva non-linier P-V yang disajikan dalam riset ini memiliki nilai substansial sebagai objek studi kasus nyata tingkat lanjut untuk pengayaan literasi teknologi serta pemahaman konseptual di ruang akademik. Dengan menyajikan analisis performa teknis yang komprehensif terhadap penyelesaian masalah non-linier kompleks ini, penelitian ini berhasil menjembatani inovasi rekayasa teknik dengan implikasi penguatan pemahaman teknologi terapan.

5. KESIMPULAN

Tinjauan sistematis ini menemukan bahwa algoritma *Cuckoo Search* (CS) secara konsisten menunjukkan keunggulan performa dibandingkan PSO dalam meminimalkan osilasi, namun memiliki keterbatasan dalam kecepatan konvergensi dibandingkan ANN saat melacak GMPP pada kondisi partial shading (PSC). Kebaruan ilmiah dari systematic review ini berhasil memetakan bahwa kelemahan kecepatan konvergensi CS standar dapat diatasi secara efektif melalui dua rute arsitektur utama, yaitu modifikasi internal (*Improved CS*) dan hibridisasi eksternal (*Hybrid CSA-GSS*), yang keduanya terbukti mengakselerasi waktu pelacakan di atas model standar. Kontribusi ilmiah dari penelitian ini terletak pada keberhasilan mengidentifikasi adanya kesenjangan kritis dalam literatur global, di mana mayoritas pengujian masih terpaku pada skenario PSC statis dan homogenitas penggunaan konverter boost. Implikasi dari temuan ini memberikan arah baru bagi pengembangan teknologi pengondisi daya cerdas, di mana integrasi varian CS tingkat lanjut menjadi sangat krusial untuk diadopsi pada sistem tersemat (*embedded system*) masa depan. Sebagai rekomendasi, penelitian berikutnya harus diarahkan pada validasi eksperimental performa varian CS yang telah ditingkatkan ini dalam kondisi PSC dinamis, pengujian lintas topologi konverter yang lebih beragam seperti SEPIC atau Cuk, serta penyusunan perbandingan performa langsung secara *head-to-head* antara algoritma Improved CS dan ANN untuk memperkuat landasan teori rekayasa sistem surya terapan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. de l'Epine, G. Domingu  , I. Kaizuka, and A. J  ger-Waldau, "Snapshot of Global PV Markets 2026," Apr. 2026. doi: 10.69766/WXLW1389.
- [2] T. Sicaio, O. Niyomubyeyi, A. Shyndyapin, P. Pilesj  , and A. Mansourian, "Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Cuckoo Search Algorithm for Evacuation Planning," *Geomatics*, vol. 2, no. 1, pp. 53–75, Mar. 2022, doi: 10.3390/geomatics2010005.
- [3] B. Ji *et al.*, "A Novel Particle Jump Particle Swarm Optimization Method for PV MPPT Control under Partial Shading Conditions," *IEEJ Journal of Industry Applications*, vol. 9, no. 4, pp. 435–443, Jul. 2020, doi: 10.1541/ieejia.9.435.
- [4] S. B. Jeyaprabha, "Low cost ANN based MPPT for the mismatched PV modules," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1706/1/012083.
- [5] S. Der Lu *et al.*, "Novel Global-MPPT Control Strategy Considering the Variation in the Photovoltaic Module Output Power and Loads for Solar Power Systems," *Processes*, vol. 10, no. 2, Feb. 2022, doi: 10.3390/pr10020367.
- [6] J. Dadkhah and M. Niroomand, "Optimization Methods of MPPT Parameters for PV Systems: Review, Classification, and Comparison," Mar. 01, 2021, *State Grid Electric Power Research Institute*. doi: 10.35833/MPCE.2019.000379.
- [7] M. Singh, O. Singh, and M. A. Ansari, "MPPT For Microgrid Connected PV System Using ANN, Incond And P&O Techniques," *International Journal for Multidisciplinary Research (IJFMR)*, vol. 5, no. 3, pp. 1–17, 2023, [Online]. Available: www.ijfmr.com
- [8] M. Brahmi, C. Ben Regaya, H. Hamdi, and A. Zaafouri, "Comparative Study Of P&O and PSO Particle Swarm Optimization MPPT Controllers Under Partial Shading," *International Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 4, pp. 45–50, Oct. 2022, doi: 10.37394/232027.2022.4.7.
- [9] N. A. Ahmed, S. Abdul Rahman, and B. N. Alajmi, "Optimal Controller Tuning For P&O Maximum Power Point Tracking of PV Systems Using Genetic and Cuckoo Search Algorithms," in *International Transactions on Electrical Energy Systems*, John Wiley and Sons Ltd, Oct. 2021. doi: 10.1002/2050-7038.12624.
- [10] H. F. Hashim, M. M. Kareem, W. K. Al-Azzawi, and A. H. Ali, "Improving the performance of photovoltaic module during partial shading using ANN," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 12, no. 4, pp. 2435–2442, Dec. 2021, doi: 10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2435-2442.
- [11] M. A. Dirmawan, Suharningsih, and R. Rakhmawati, "The Comparison Performance of MPPT Perturb and Observe, Fuzzy Logic Controller, and Flower Pollination Algorithm in Normal and Partial Shading Condition," in *IES 2020 - International Electronics Symposium: The Role of Autonomous and Intelligent Systems for Human Life and Comfort*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2020, pp. 7–13. doi: 10.1109/IES50839.2020.9231753.
- [12] A. Ali, K. Irshad, M. F. Khan, M. M. Hossain, I. N. A. Al-Duais, and M. Z. Malik, "Artificial intelligence and bio-inspired soft computing-based maximum power plant tracking for a solar photovoltaic system

- under non-uniform solar irradiance shading conditions—A review,” Oct. 01, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/su131910575.
- [13] M. Y. Silaa, O. Barambones, A. Bencherif, and A. Rahmani, “A New MPPT-Based Extended Grey Wolf Optimizer for Stand-Alone PV System: A Performance Evaluation versus Four Smart MPPT Techniques in Diverse Scenarios,” *Inventions*, vol. 8, no. 6, Dec. 2023, doi: 10.3390/inventions8060142.
- [14] F. Hasan, H. Suyono, A. Lomi, and J. Teknnik Elektro, “Optimasi Maximum Power Point Tracking pada Array Photovoltaic Menggunakan Algoritma Ant Colony Optimization dan Particle Swarm Optimization,” *Jurnal EECCIS*, vol. 16, no. 1, pp. 1–9, 2022, [Online]. Available: <https://jurnaleeccis.ub.ac.id/>
- [15] C. Gonzalez-Castano, C. Restrepo, S. Kouro, and J. Rodriguez, “MPPT Algorithm Based on Artificial Bee Colony for PV System,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 43121–43133, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3066281.
- [16] T. Fathi, J. Houda, and A. Mami, “Comparative between ANN algorithms in optimizing MPPT control autonomous photovoltaic,” in *Proceedings of the International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies, IC_ASET 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2020, pp. 355–361. doi: 10.1109/IC_ASET49463.2020.9318275.
- [17] S. A. Farooqui, R. A. Khan, N. Islam, and N. Ahmed, “Cuckoo Search Algorithm and Artificial Neural Network-based MPPT: A Comparative Analysis,” in *2021 IEEE 8th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering, UPCON 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/UPCON52273.2021.9667651.
- [18] Y. Izgheche, T. Bahi, and A. Lakhdara, “Analysis of Genetic and Cuckoo Search Algorithms for MPPT in Partial Shaded,” vol. 8, no. 1, pp. 35–40, Mar. 2024.
- [19] K. Bentata, A. Mohammedi, and T. Benslimane, “Development of rapid and reliable cuckoo search algorithm for global maximum power point tracking of solar PV systems in partial shading condition,” *Archives of Control Sciences*, vol. 31, no. 3, pp. 495–526, 2021, doi: 10.24425/acs.2021.138690.
- [20] C. Hussaian Basha, V. Bansal, C. Rani, R. M. Brisilla, and S. Odofin, “Development of Cuckoo Search MPPT Algorithm for Partially Shaded Solar PV SEPIC Converter,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, 2020, pp. 727–736. doi: 10.1007/978-981-15-0035-0_59.
- [21] M. Sameeullah and A. Swarup, “MPPT schemes for PV system under normal and partial shading condition: A review,” Jul. 01, 2016, *Diponegoro university Indonesia - Center of Biomass and Renewable Energy (CBIORE)*. doi: 10.14710/ijred.5.2.79-94.
- [22] K. Friansa, J. Pradipta, I. N. Haq, E. Leksono, and K. Ariwibawa, “Peningkatan Kinerja Modul PV Kanopi dengan Optimasi Pembayangan pada Area Terbatas,” *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 21, no. 1, p. 41, Jul. 2022, doi: 10.24843/mite.2022.v21i01.p07.
- [23] X. S. Yang and S. Deb, “Cuckoo Search via Lévy flights,” *2009 World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, NABIC 2009 - Proceedings*, pp. 210–214, 2009, doi: 10.1109/NABIC.2009.5393690.
- [24] D. A. Nugraha, K. L. Lian, and S. Suwarno, “A Novel MPPT Method Based on Cuckoo Search Algorithm and Golden Section Search Algorithm for Partially Shaded PV System,” *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 42, no. 3, pp. 173–182, Jun. 2019, doi: 10.1109/CJECE.2019.2914723.
- [25] Z. B. Hadj Salah *et al.*, “A New Efficient Cuckoo Search MPPT Algorithm Based on a Super-Twisting Sliding Mode Controller for Partially Shaded Standalone Photovoltaic System,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 12, Jun. 2023, doi: 10.3390/su15129753.
- [26] A. M. Eltamaly, “An improved cuckoo search algorithm for maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading conditions,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 4, Feb. 2021, doi: 10.3390/en14040953.
- [27] F. K. Abo-Elyousr, A. M. Abdelshafy, and A. Y. Abdelaziz, “MPPT-based particle swarm and cuckoo search algorithms for PV systems,” in *Green Energy and Technology*, Springer Verlag, 2020, pp. 379–400. doi: 10.1007/978-3-030-05578-3_14.
- [28] A. Raj and M. Gupta, “Numerical Simulation and Comparative Assessment of Improved Cuckoo Search and PSO based MPPT System for Solar Photovoltaic System Under Partial Shading Conditionin 2,” 2021.