

# Analisis Kinerja Metode *Fuzzy* Teroptimasi PSO untuk Strategi Kendali MPPT pada Sistem *Solar Photovoltaic*

Indah Soesanti<sup>1\*</sup> dan Ramadoni Syahputra<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada  
Jl. Grafika 2, Kampus UGM, Yogyakarta, 55281, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta  
Jl. Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, DI Yogyakarta, 55183 Indonesia

\*Corresponding author. Email: indahsoesanti@ugm.ac.id

**Abstract**— A fuzzy control system has been widely used in various problem solving. Its performance can be optimized using particle swarm optimization (PSO). This performance can be proven by applying it to the maximum power point tracking (MPPT) control strategy on solar photovoltaic systems. Solar photovoltaic power generation systems are increasingly popular because they are clean and renewable energy sources. The power generated by solar photovoltaic is strongly influenced by solar irradiation and the load carried. In order to obtain maximum power output, an MPPT control strategy is needed. An MPPT control strategy based on fuzzy and PSO hybrid control systems is proposed in this research. The fuzzy-PSO method selects and produces the optimal duty cycle for the boost dc-dc converter in a solar photovoltaic system. Variable duty cycle due to solar irradiation and load changes can be conditioned by the fuzzy-PSO-based MPPT method to extract maximum power. The research results show that the fuzzy-PSO method can control the solar photovoltaic output voltage through a dc-dc converter to produce maximum power at various solar irradiations. Test result by applying a resistive load produces output power at the maximum point. The best result is obtained in the 100 Ohm load test: the response time of 0.0818 seconds and excellent robustness.

**Keywords**— MPPT, control strategy, solar photovoltaic, optimization, fuzzy, PSO

**Abstrak**— Sistem kendali *fuzzy* telah terbukti banyak digunakan dalam berbagai penyelesaian masalah. Untuk meningkatkan kinerjanya dapat dioptimalkan menggunakan *particle swarm optimization* (PSO). Hal ini dapat dibuktikan dengan menerapkannya untuk strategi kendali *maximum power point tracking* (MPPT) pada sistem *solar photovoltaic*. Sistem pembangkit listrik tenaga surya yang menggunakan *solar photovoltaic* saat ini semakin populer karena merupakan sumber energi yang bersih dan terbarukan. Daya yang dihasilkan oleh *solar photovoltaic* sangat dipengaruhi oleh iradiasi surya dan beban yang dilayani. Dalam rangka mendapatkan keluaran daya yang maksimum maka diperlukan strategi kendali pelacakan titik daya maksimum. Pada penelitian ini diusulkan strategi kendali MPPT berbasis sistem kendali hibrida *fuzzy* dan PSO. Metode *fuzzy-PSO* digunakan untuk memilih dan menghasilkan siklus kerja optimal pada konverter dc-dc tipe *boost* pada sistem *solar photovoltaic*. Siklus kerja yang bervariasi karena perubahan iradiasi surya dan beban dapat dikondisikan dengan metode MPPT berbasis *fuzzy-PSO* untuk mengekstrak daya maksimum. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode hibrida *fuzzy-PSO* mampu mengendalikan tegangan keluaran *solar photovoltaic* melalui konverter dc-dc sehingga menghasilkan daya maksimum pada berbagai iradiasi surya. Hasil uji dengan menerapkan beban resistif menghasilkan daya keluaran pada titik maksimum. Hasil terbaik diperoleh pada uji beban 100 Ohm yaitu *response time* 0,0818 detik dan *robustness* yang sangat baik.

**Kata kunci**— MPPT, strategi kendali, *solar photovoltaic*, optimisasi, *fuzzy*, PSO

## I. PENDAHULUAN

Pemerintah Republik Indonesia menargetkan kontribusi energi terbarukan mencapai 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 [1], yang tertuang pada PP No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional [2]. Pengembangan energi berbasis bahan bakar fosil berdampak kesulitan pengadaan bahan bakar karena persediaan semakin menipis [3]. Permasalahan lain adalah perlunya pengurangan emisi karbon [4], [5]. Jenis pembangkit listrik energi terbarukan yang sangat potensial di Indonesia adalah pembangkit listrik tenaga *solar*

*photovoltaic* [6]. Berdasarkan data resmi dari Kementerian ESDM, potensi energi surya Indonesia adalah 207,898 GW. Target pemerintah membangun pembangkit listrik *solar photovoltaic* pada 2025 adalah 6,5 GW [7].

Pembangkit listrik tenaga surya menggunakan *solar photovoltaic* merupakan pembangkit listrik ramah lingkungan serta biaya operasionalnya rendah [8], [9]. Kondisi cuaca dan sifat radiasi matahari yang tidak linier membuat pembangkit ini berfluktuasi secara signifikan. Permasalahan utamanya adalah efisiensi rendah dan hilangnya energi yang signifikan [10], sehingga perlu upaya untuk mengekstraksi daya maksimum

Received 23 November 2021, Accepted 16 December 2021, Published 20 December 2021.

DOI: <https://doi.org/10.15294/jte.v13i2.33477>

yang dihasilkan. Teknik yang umum digunakan untuk ekstraksi daya maksimum adalah *maximum power point tracking* (MPPT) [11], [12]. MPPT merupakan upaya untuk selalu mendapatkan titik daya maksimum pada berbagai kondisi iradiasi surya. Guna mendapatkan titik daya maksimum *solar photovoltaic*, dilakukan optimisasi dengan memanfaatkan suatu konverter dc-dc tipe *boost*. Hal ini untuk mengatur tegangan *photovoltaic* dengan membuat variasi pada *duty cycle*, sehingga dapat mempertahankan titik operasinya. Keluaran konverter inilah yang dikendalikan sehingga keluaran tegangan dan arus akan menghasilkan daya maksimal pada berbagai kondisi beban listrik dan iradiasi surya.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mencari solusi atas ekstraksi daya maksimum *solar photovoltaic* dengan teknik MPPT, namun terdapat permasalahan pada stabilitas sistem saat perubahan beban listrik. Semakin besar beban listrik yang dilayani maka kemampuan untuk mengekstraksi daya maksimum semakin menurun. Penelitian [13] membahas metode pemantauan daya dengan teknik MPPT konvensional yang beroperasi di bawah kondisi lingkungan yang seragam, sementara dalam kondisi yang tidak seragam tidak memberikan hasil yang diinginkan. Selanjutnya penelitian [14] melakukan ekstraksi daya maksimum dengan osilasi yang lebih sedikit menggunakan teknik kendali berbasis mikrokontroler. Penelitian [15] dan [16] melakukan pemodelan matematis *solar photovoltaic* dengan mempertimbangkan variasi iluminasi sinar surya, tegangan, dan arus keluaran. Pemodelan ini sangat bermanfaat dalam pengembangan metode MPPT lebih lanjut.

Metode ekstraksi daya maksimum MPPT yang banyak digunakan adalah metode *perturb and observe* (P&O) [17] - [21]. Metode P&O dioperasikan dengan memvariasikan tegangan terminal *solar photovoltaic* secara berkala dan menghubungkan siklus gangguan sebelumnya dengan daya yang dihasilkan. *Perturb* menginformasikan pola perubahan tegangan dan arus *solar photovoltaic*, sedangkan *observe* akan menghitung daya yang dihasilkan. Penambahan atau pengurangan tegangan pada langkah berikutnya dievaluasi berdasarkan perbandingan daya yang dihasilkan sebelum dan sesudah proses *perturb*. Kelemahan metode ini adalah lambat dan kurang akurat karena banyaknya langkah prosedur yang dilakukan. Metode ini tidak berfungsi dengan baik ketika data yang diukur mengandung derau atau kondisi cuaca berubah dengan cepat. Saat kondisi tunak, keluaran daya yang dihasilkan selalu berosilasi di sekitar titik puncak yang menyebabkan *losses* yang signifikan.

Sistem kendali *fuzzy* telah terbukti banyak digunakan dalam berbagai penyelesaian masalah. Upaya peningkatan kinerja ekstraksi daya maksimum MPPT menggunakan pengendali *fuzzy* diusulkan dalam penelitian [22], [23]. Data masukan dan keluaran *solar photovoltaic* dan konverter dc-dc diklasifikasikan dalam suatu fungsi keanggotaan (*membership function*) dengan pembobotan tertentu. Tahapan prosesnya meliputi fuzifikasi, inferensi berdasarkan aturan (*rule*), dan defuzifikasi. Pengendali berbasis *fuzzy* relatif lebih cepat dan akurat dibanding metode P&O, namun masih perlu ditingkatkan kinerjanya dengan penalaan faktor penskalaan pada fungsi keanggotaan *fuzzy*. Hal ini dapat meningkatkan respon terhadap perubahan beban atau iradiasi surya dan meminimalkan galat kondisi tunak. Upaya peningkatan kinerja ini telah dilakukan di antaranya dengan metode *grey wolf* [24] dan metode *bat* [25]. Pencarian optimum global dalam proses konvergensi metode-metode tersebut masih perlu ditingkatkan.

Kinerja pengendali *fuzzy* dapat dioptimalkan menggunakan *particle swarm optimization* (PSO). Penelitian [26] dan [27] membahas tentang karakteristik metode PSO. PSO adalah metode pencarian stokastik dengan menerapkan teknik metaheuristik yang terinspirasi oleh perilaku sekawanan burung dan gerombolan ikan. PSO merupakan teknik optimasi yang kokoh berdasarkan komputasi evolusioner sehingga dapat digunakan untuk penyelesaian berbagai masalah optimasi yang kompleks. Konvergensi yang cepat dan solusi optimum global merupakan keunggulan PSO, sehingga mampu memperbaiki metode sebelumnya.

Berdasarkan tinjauan pustaka sebagaimana diuraikan di depan maka kinerja pengendali MPPT berbasis *fuzzy* masih perlu ditingkatkan menggunakan optimisasi PSO. Pada penelitian ini dilakukan strategi kendali dalam mengoptimalkan daya pada konverter yang digunakan pada sistem *solar photovoltaic* menggunakan teknik berbasis sistem *fuzzy* dan PSO.

## II. METODE

### A. Struktur Pengendali MPPT pada Sistem *Solar Photovoltaic*

*Solar Photovoltaic* mengubah energi cahaya surya menjadi energi listrik dengan proses yang disebut efek fotolistrik, yakni fotoelektron yang dipancarkan ketika cahaya jatuh ke atasnya. Iradiasi surya mengalami perubahan intensitas seiring berubahnya waktu, karenanya diperlukan perangkat tambahan konverter daya dc-dc tipe *boost*. Konverter daya digunakan untuk mengatur tegangan *photovoltaic* dengan membuat variasi pada *duty cycle* melalui teknik MPPT untuk mempertahankan titik operasi *photovoltaic* pada titik daya maksimum. Konverter daya ini yang langsung terhubung dengan beban listrik.

Struktur pengendali MPPT *solar photovoltaic* pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. Pada Gambar 1 terlihat bahwa keluaran tegangan dari *solar photovoltaic* langsung terhubung dengan konverter dc-dc tipe *boost* untuk dikendalikan menggunakan metode *fuzzy*-PSO sehingga menghasilkan daya keluaran selalu maksimum pada berbagai kondisi iradiasi surya. Pengendalian sakelar pada konverter dicapai dengan MPPT yang akan memastikan variasi siklus kerja konverter untuk mengekstrak daya maksimum *solar photovoltaic*. Tegangan keluaran konverter yang juga merupakan tegangan pada beban diperoleh dengan menerapkan algoritma MPPT untuk mengendalikan *duty cycle* yang dinyatakan dalam (1).

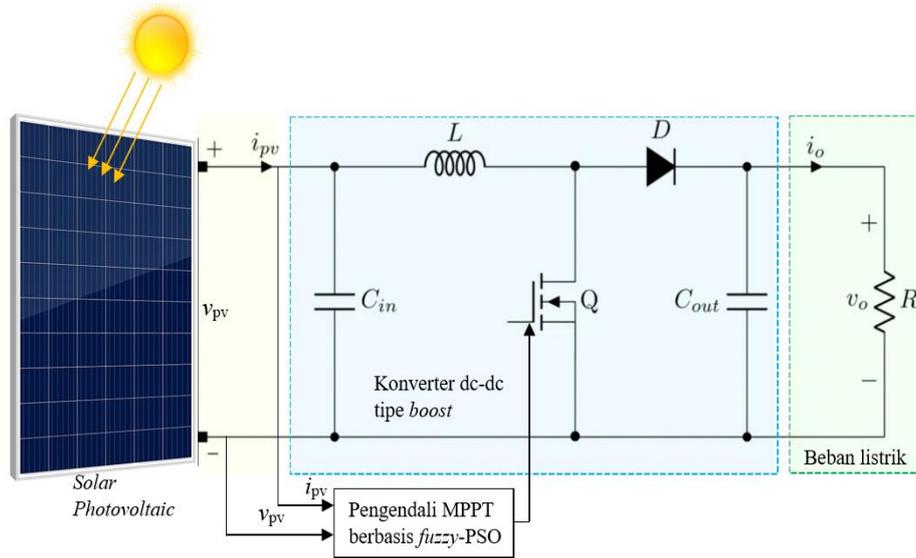
$$v_o = \frac{1}{1-D_c} v_{PV} \quad (1)$$

dengan  $v_o$  adalah tegangan keluaran konverter,  $v_{PV}$  adalah tegangan *solar photovoltaic*, dan  $D_c$  adalah *duty cycle* konverter.

### B. Metode PSO untuk Optimisasi *Fuzzy*

Dalam penelitian ini optimisasi fungsi keanggotaan *fuzzy* dilakukan menggunakan metode PSO sehingga didapatkan *fuzzy rules* yang lebih tepat dalam mengendalikan MPPT pada sistem *solar photovoltaic*. Metode *fuzzy*-PSO juga memberikan dampak positif pada pengendalian yaitu *response time* yang lebih singkat.

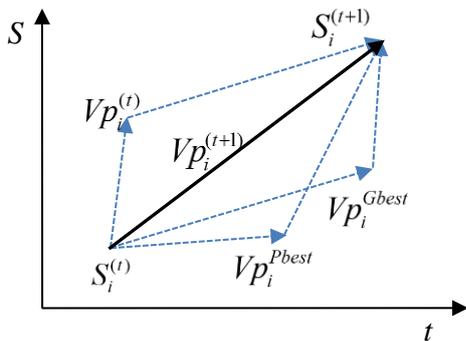
Konsep optimisasi menggunakan metode PSO ditunjukkan pada Gambar 2. Vektor kecepatan adalah vektor yang menggerakkan proses optimisasi untuk menentukan arah suatu partikel yang berpindah dalam rangka memperbaiki posisinya menuju posisi terbaik. Vektor kecepatan yang dihasilkan dapat dinyatakan dalam (2).



Gambar 1. Komposisi sistem pengendalian daya maksimum (MPPT) solar photovoltaic

$$V_{p_i}^{(t+1)} = \beta \cdot V_{p_i}^{(t)} + c_1 \cdot acak_1(o) \cdot (Q_{tbi} - S_i^{(t)}) + c_2 \cdot acak_2(o) \cdot (R_{tbi} - S_i^{(t)}) \quad (2)$$

dengan  $S_i = (s_{i1}, \dots, s_{id}, \dots, s_{in})$  adalah posisi partikel ke- $i$ ;  $V_{p_i} = (V_{p_{i1}}, \dots, V_{p_{id}}, \dots, V_{p_{in}})$  adalah kecepatan partikel ke- $i$ ;  $Q_{tbi} = (q_{tbi1}, \dots, q_{tbid}, \dots, q_{tbin})$  adalah partikel pengalaman terbaik ke- $i$ ;  $R_{tbi} = (r_{tbi1}, \dots, r_{tbid}, \dots, r_{tbin})$  adalah posisi global terbaik untuk *swarm search*,  $t$  adalah iterasi;  $i = (1, 2, \dots, N)$  adalah indeks partikel;  $acak_1(o)$  dan  $acak_2(o)$  adalah bilangan acak dari 0 hingga 1; dan  $N$  adalah jumlah kawanan.



Gambar 2. Konsep optimisasi menggunakan metode PSO

Solusi terbaik final yang ditunjukkan oleh posisi partikel dinyatakan oleh (3).

$$S_i^{(t+1)} = S_i^{(t)} + S_i^{(t+1)} \quad (3)$$

Bobot inersia  $\beta$  dalam persamaan (3) dapat diselesaikan menggunakan persamaan (4).

$$\beta^{(t+1)} = \beta_2 - \frac{\beta_2 - \beta_1}{t_m} \times t \quad (4)$$

dengan  $\beta_1$  dan  $\beta_2$  masing-masing adalah bobot inersia minimum dan maksimum dan bobot inersia  $\beta$  menurun secara linear dari 0,9 ke 0,5.

Pada PSO, yang berperan sebagai partikel adalah nilai pusat sebaran dan simpangan baku dari fungsi keanggotaan fuzzy. Proses dimulai dari nilai awal yang diberikan kemudian dilanjutkan dengan proses untuk menemukan posisi terbaik partikel sehingga mendapatkan nilai optimal. Kinerja logika fuzzy senantiasa dievaluasi kembali, sampai dengan tujuan yang diharapkan dapat tercapai.

Algoritma PSO dapat diuraikan melalui langkah-langkah berikut [26].

1. Inisialisasi populasi partikel dengan posisi dan kecepatan acak pada dimensi- $N$  dalam ruang pencarian.
2. Evaluasi fungsi *fitness* optimisasi yang diinginkan dalam variabel  $N$  untuk setiap partikel.
3. Bandingkan evaluasi *fitness* partikel dengan posisi terbaiknya sebelumnya. Jika nilai saat ini lebih baik, maka atur posisi terbaik sebelumnya sama dengan nilai saat ini, dan  $K_i$  sama dengan lokasi saat ini  $S_i$  dalam ruang dimensi- $N$ .
4. Identifikasi partikel di lingkungan dengan *fitness* terbaik sejauh ini, dan tetapkan indeksnya ke variabel.
5. Ubah kecepatan dan posisi partikel sesuai (2) dan (3).
6. Ulangi langkah 2 sampai kriteria terpenuhi.

Algoritma PSO digunakan sebagai pengganti metode tradisional *trial and error* untuk menemukan penyesuaian faktor penskalaan yang optimal untuk pengendali fuzzy-MPPT, berdasarkan spesifikasi kinerja sistem loop tertutup. Dalam strategi yang diusulkan, PSO digunakan untuk memberikan kinerja yang memuaskan dalam kondisi tunak dan meningkatkan kinerja transien setiap kali sistem menunjukkan perilaku osilasi atau *overshoot*. Penyesuaian faktor penskalaan masukan dapat diartikan sebagai perubahan semesta wacana untuk variabel masukan. Rentang kinerja keseluruhan pengendali sangat dipengaruhi oleh pilihan faktor penskalaan  $K_{S(i)}$  dan  $K_{\Delta S(i)}$ . Faktor  $K_{S(i)}$  menentukan sensitivitas pengendali terhadap perubahan daya sedangkan  $K_{\Delta S(i)}$  menentukan sensitivitas terhadap perubahan *duty cycle*. Nilai  $K_{S(i)}$  dipilih berdasarkan hasil simulasi menggunakan algoritma PSO. Sistem logika fuzzy digunakan untuk memformulasi algoritma logika fuzzy dan aturannya sesuai yang diperlukan dalam proses uji. Dalam sistem logika fuzzy ditetapkan batas fungsi keanggotaan dan nilai yang sesuai untuk faktor skala  $K_{S(i)}$  dan  $K_{\Delta S(i)}$ .

Algoritma optimisasi menggunakan PSO dijelaskan sebagai berikut: proses pelacakan dimulai dengan siklus awal. Sebagaimana terlihat pada Gambar 1, arus masukan konverter boost  $I_{PV}$  dan tegangan  $V_{PV}$  diukur dan digunakan untuk menghitung daya modul  $P_{PV}(i)$ . Selanjutnya *duty cycle* ditingkatkan oleh pengendali berdasarkan perubahan awal daya dan *duty cycle*. Pada tahap dua,  $I_{PV}$  dan  $V_{PV}$  diukur dan

digunakan untuk menghitung  $P_{PV}(i+1)$ . Setelah mengumpulkan informasi yang lalu dan terkini dari daya modul, pengendali membuat keputusan apakah akan menambah atau mengurangi *duty cycle*. Proses pelacakan ini berulang terus menerus sampai titik daya puncak tercapai.

Tujuan dari optimasi faktor penskalaan  $K_{S(i)}$  dan  $K_{\Delta S(i)}$  adalah untuk memperoleh respon dinamik yang cepat dan *error* keadaan tunak yang lebih kecil. Fungsi objektif yang digunakan adalah total nilai mutlak dari *error* (EM) seperti yang dinyatakan dalam (5).

$$EM = \sum e(n) \tag{5}$$

dengan  $e(n)$  menunjukkan *error* daya keluaran yaitu  $e(n) = P_{max} - P_{PV}$ . Nilai indeks kinerja yang rendah ditentukan oleh waktu penyelesaian yang kecil serta *error* dan *overshoot* yang kecil.

C. Uji Kinerja Pengendali MPPT Berbasis *fuzzy*-PSO

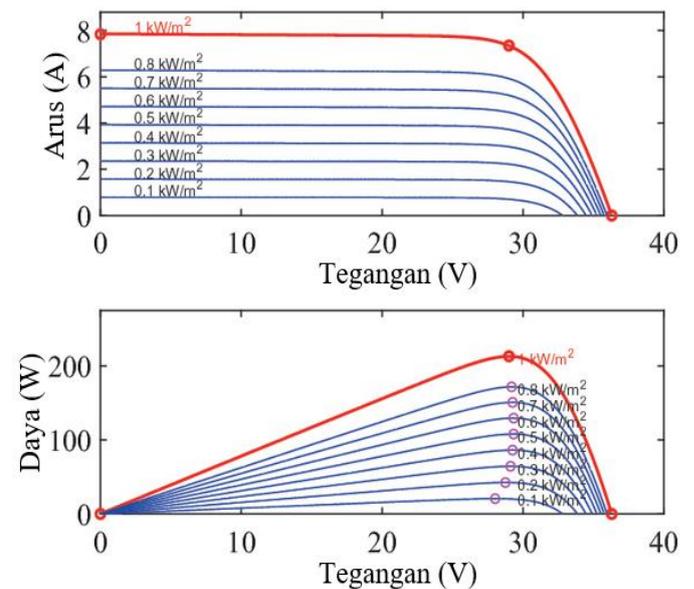
Selanjutnya, untuk menguji kinerja dari pengendali MPPT menggunakan metode *fuzzy* teroptimasi PSO maka dilakukan uji sistem *solar photovoltaic*. Tabel I menunjukkan spesifikasi *solar photovoltaic* yang digunakan dalam simulasi pada penelitian ini. Sebagaimana terlihat pada Tabel I bahwa tipe modul *solar photovoltaic* yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1Soltech 1STH-215-P. Daya keluaran maksimum tiap modul adalah 213,15 watt *peak*. Jenis modul *solar photovoltaic* ini adalah jenis polikristal. Tegangan rangkaian terbuka adalah 36,3 volt, sementara tegangan pada titik daya maksimum adalah 29 volt.

Gambar 3 menunjukkan karakteristik *solar photovoltaic* tipe 1Soltech 1STH-215-P pada suhu 25°C yang digunakan dalam simulasi pada penelitian ini. Pada gambar tersebut ditunjukkan hubungan arus keluaran *solar photovoltaic* terhadap tegangan keluarannya pada berbagai iradiasi surya. Karakteristik arus *versus* tegangan pada grafik tersebut ditunjukkan untuk iradiasi surya 0,1 kW/m<sup>2</sup> hingga 1,0 kW/m<sup>2</sup>. Pada gambar tersebut terlihat bahwa iradiasi surya sangat mempengaruhi arus yang dihasilkan oleh *solar photovoltaic*. Iradiasi surya 0,1 kW/m<sup>2</sup> mampu menghasilkan arus listrik 0,9 ampere. Iradiasi surya maksimum 1,0 kW/m<sup>2</sup> mampu menghasilkan arus 8 ampere. Semakin tinggi iradiasi surya yang diterima *solar photovoltaic* maka arus yang dapat dihasilkan semakin besar. Tegangan kerja yang diterapkan memiliki rentang yang lebar yaitu 0 hingga 37 volt pada arus dan iradiasi surya yang sama.

Gambar 3 juga menunjukkan hubungan daya keluaran *solar photovoltaic* pada berbagai iradiasi surya. Karakteristik daya

*versus* tegangan ditunjukkan untuk iradiasi surya 0,1 kW/m<sup>2</sup> hingga 1,0 kW/m<sup>2</sup>. Semakin tinggi tegangan kerja maka daya yang dihasilkan semakin besar. Namun demikian terdapat titik daya maksimum yang dapat dicapai oleh *solar photovoltaic* pada setiap iradiasi surya. Titik maksimum ini disebut dengan *maximum power point* (MPP). Pada iradiasi surya 0,1 kW/m<sup>2</sup> mampu menghasilkan daya keluaran 19 watt, sedangkan iradiasi maksimum 1,0 kW/m<sup>2</sup> mampu menghasilkan daya keluaran 213 watt.

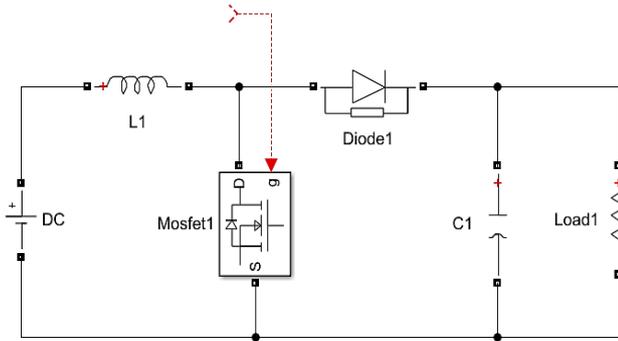
Dalam rangka mendapatkan daya maksimum keluaran dari *solar photovoltaic* maka diperlukan rangkaian konverter dc-dc tipe *boost*. Konverter ini berfungsi untuk membuat pengendali *fuzzy*-PSO mengkondisikan agar *solar photovoltaic* selalu bekerja dengan keluaran daya maksimum dengan menaikkan tegangan keluarannya. Rangkaian konverter dalam simulasi ini ditunjukkan pada Gambar 4. Konverter ini bekerja dengan dua kondisi saklar mosfet yaitu posisi *ON* dan *OFF*. Pada mosfet posisi *ON* maka arus yang mengalir pada rangkaian konverter akan bertambah besar dengan polaritas pada induktor *LI* cenderung negatif sehingga dioda menjadi bias terbalik. Pada mosfet posisi *OFF*, arus pada rangkaian konverter akan semakin mengecil dengan polaritas pada induktor *LI* cenderung negatif sehingga dioda menjadi bias maju.



Gambar 3. Karakteristik *solar photovoltaic* tipe 1Soltech 1STH-215-P pada temperatur 25°C

TABEL I. SPESIFIKASI SOLAR PHOTOVOLTAIC

No.	Parameter	Besaran dan Satuan
1	Tipe modul	1Soltech 1STH-215-P
2	Daya maksimum tiap modul	213,15 watt <i>peak</i>
3	Tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ )	36,3 volt
4	Tegangan pada titik daya maksimum ( $V_{mp}$ )	29 volt
5	Koefisien temperatur ( $\alpha$ ) $V_{oc}$	-0,36099 %/°C
6	Jumlah sel per modul ( $N_{cell}$ )	60 buah
7	Arus hubung singkat ( $I_{sc}$ )	7,84 ampere
8	Arus pada titik daya maksimum ( $I_{mp}$ )	7,35 ampere
9	Koefisien temperatur ( $\alpha$ ) $I_{sc}$	-0,102 %/°C
10	Temperatur uji ( $T$ )	25°C

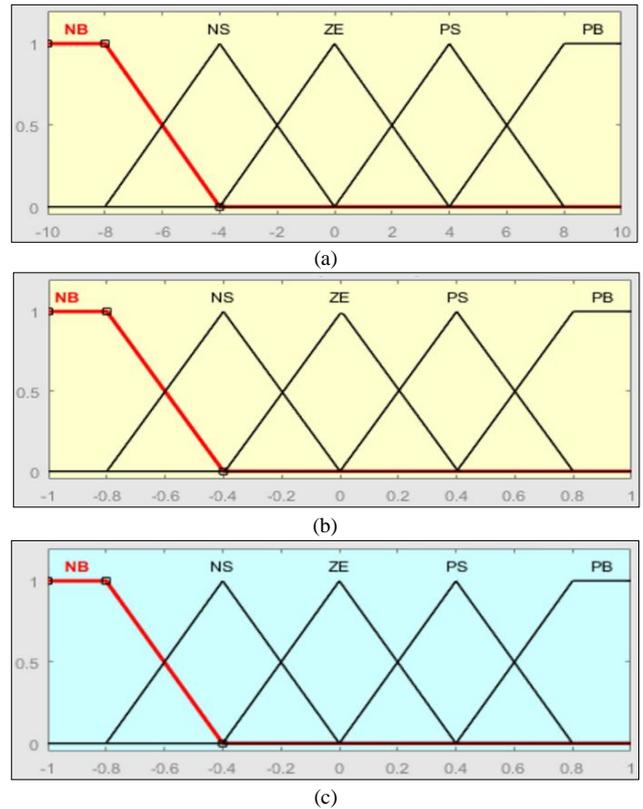


Gambar 4. Rangkaian konverter dc-dc tipe boost

Dalam penelitian ini metode PSO digunakan sebagai pengganti metode tradisional *trial and error* untuk menemukan penyesuaian faktor penskalaan optimal untuk pengendali fuzzy-MPPT. Fungsi keanggotaan fuzzy yang digunakan adalah fungsi keanggotaan berbentuk segitiga yang berjumlah 5 (lima). Masing-masing fungsi keanggotaan diberi nama NB (*negative big*), NS (*negative small*), ZE (*zero*), PS (*positive small*), dan PB (*positive big*). Fungsi keanggotaan ini merepresentasikan dua masukan (*error E* dan *delta error CE*) dan satu keluaran sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Fungsi-fungsi keanggotaan ini disusun dalam suatu aturan yang menyatakan hubungan antara masukan dan keluaran. Aturan fuzzy yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel II.

Model logika fuzzy yang dipakai adalah model Takagi-Sugeno (TS) karena kemampuannya mendekati sifat nonlinier dan tidak menggunakan persamaan matematika yang kompleks. Kinerja model fuzzy TS tergantung pada kompleksitasnya yaitu jumlah aturan fuzzy, jenis fungsi keanggotaan, variabel anteseden, dan regresor konsekuen. Aturan fuzzy diekspresikan dengan bantuan operator *IF*, *AND*, dan *THEN* untuk menghasilkan relasi yang sesuai antara masukan dan keluaran. Aturan fuzzy diimplementasikan dalam perangkat lunak Simulink dengan diagram blok untuk masukan dan keluaran dari pengendali fuzzy-PSO seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Pengendali MPPT berbasis fuzzy-PSO pada sistem solar photovoltaic ditandai dengan blok pengendali berwarna merah dengan dua masukan (*error E* dan *delta error CE*) dan satu keluaran.

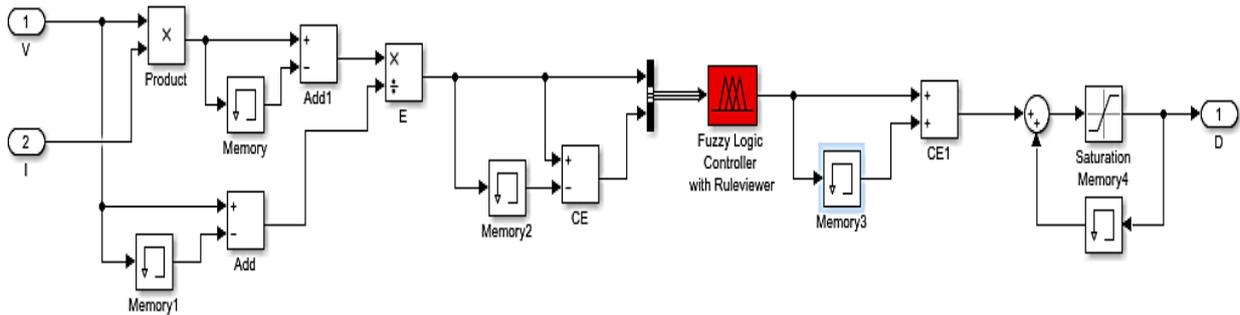
Pada Gambar 7 ditunjukkan diagram blok sistem pengendalian MPPT pada solar photovoltaic menggunakan pengendali fuzzy-PSO. Ada dua masukan yang digunakan pada solar photovoltaic yaitu sinyal yang merepresentasikan iradiasi surya dan temperatur. Selanjutnya keluaran dari solar photovoltaic langsung terhubung dengan rangkaian converter dc-dc tipe boost. Keluaran dari solar photovoltaic diamati tegangan dan arusnya secara real-time untuk mengetahui kondisi asli tegangan dan arus dari solar photovoltaic tanpa pengendalian MPPT. Tegangan dan arus keluaran dari solar photovoltaic tersebut menjadi masukan dari pengendali MPPT berbasis fuzzy-PSO. Pengendali MPPT ini mengendalikan *duty cycle* dari konverter sehingga menghasilkan daya pada kondisi maksimum. Daya hasil pengendalian MPPT ini diamati untuk dibandingkan dengan daya asli yang dihasilkan solar photovoltaic untuk menganalisis kinerja pengendali MPPT berbasis fuzzy-PSO.



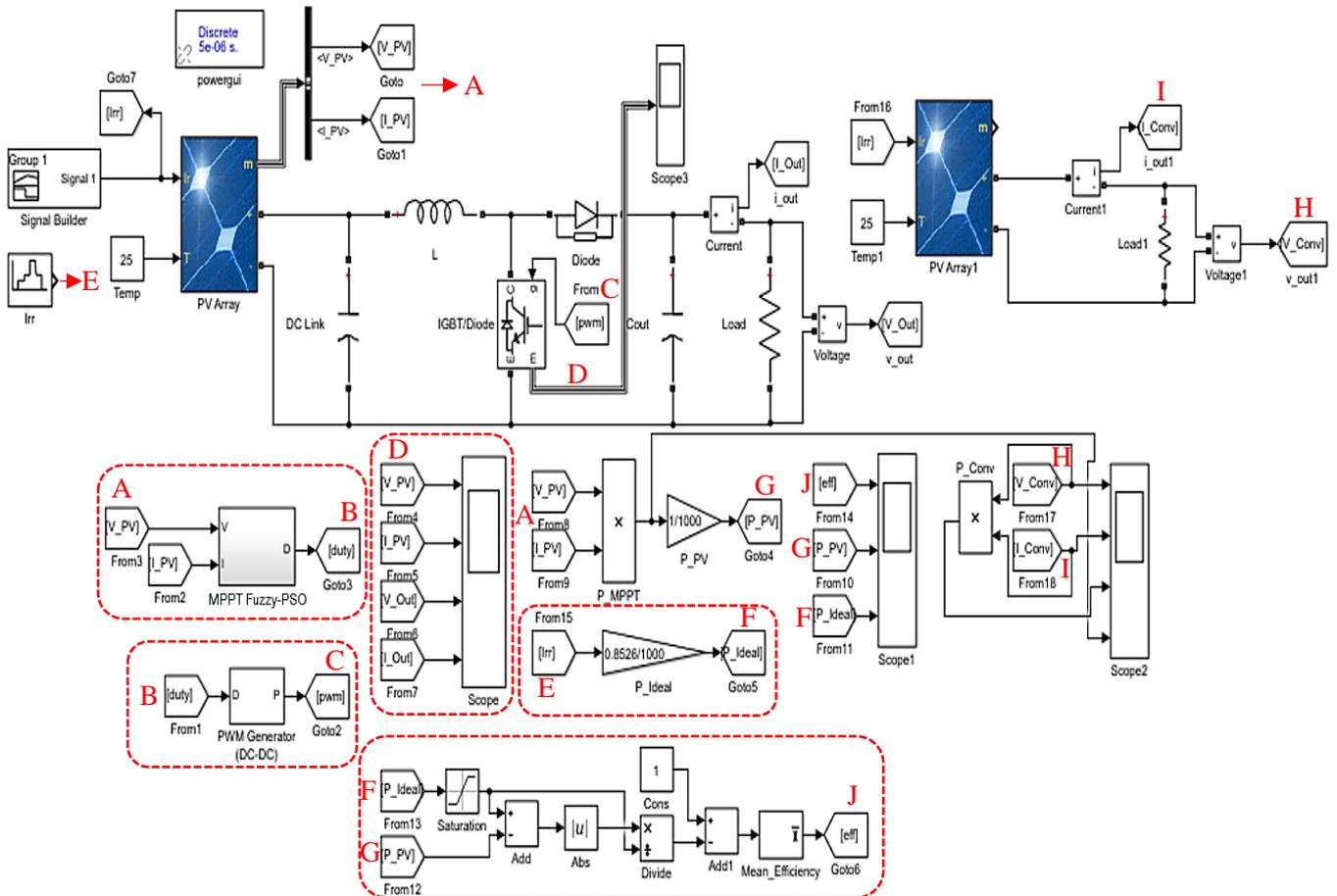
Gambar 5. Fungsi keanggotaan fuzzy yang merepresentasikan: (a) masukan *error E*, (b) masukan *delta error CE*, dan (c) keluaran

TABEL II. ATURAN FUZZY UNTUK PENGENDALI FUZZY-PSO

No.	Masukan E	Masukan CE	Keluaran
1	NB	NB	ZE
2	NS	NS	ZE
3	ZE	ZE	ZE
4	PS	PS	ZE
5	PB	PB	ZE
6	NB	NS	PB
7	NB	ZE	PB
8	NB	PS	PB
9	NB	PB	PS
10	NS	ZE	PS
11	NS	PS	PS
12	NS	PB	ZE
13	NS	NB	ZE
14	ZE	NB	PS
15	ZE	NS	ZE
16	ZE	PS	ZE
17	ZE	PB	ZE
18	PS	NS	NS
19	PS	NS	NS
20	PS	NS	NS
21	PS	ZE	ZE
22	PB	NB	NB
23	PB	NS	NB
24	PB	ZE	NB
25	PB	PS	NS



Gambar 6. Diagram blok untuk masukan dan keluaran dari pengendali *fuzzy-PSO*



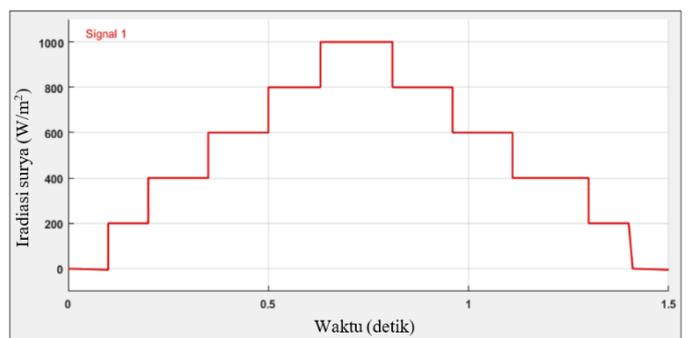
Gambar 7. Diagram blok sistem pengendalian MPPT pada *solar photovoltaic* menggunakan pengendali *fuzzy-PSO*

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini diuraikan hasil uji *solar photovoltaic* dengan pengendalian MPPT menggunakan metode *fuzzy-PSO*. Simulasi *solar photovoltaic* dilakukan dengan uji pembebanan resistif yang bervariasi dengan nilai 10 Ohm, 50 Ohm, 100 Ohm, dan 200 Ohm. Uji ini dilakukan untuk menganalisis karakteristik kinerja dari pengendali MPPT yang digunakan. Hasil uji ditunjukkan pada Gambar 8 sampai dengan Gambar 12.

Gambar 8 menunjukkan sinyal iradiasi surya yang menerpa *solar photovoltaic* dalam penelitian ini. Sinyal yang digunakan berjenis *step function*, terdapat 11 *step* yang merepresentasikan iradiasi surya selama 24 jam dalam sehari. Nilai iradiasi surya yang digunakan adalah 0 W/m<sup>2</sup> hingga dan 1000 W/m<sup>2</sup>. Sebagaimana iradiasi surya sesungguhnya bahwa sejak pagi hari pukul 06.00 iradiasi surya pada nilai 0 W/m<sup>2</sup> perlahan semakin tinggi hingga mencapai puncaknya pada siang hari

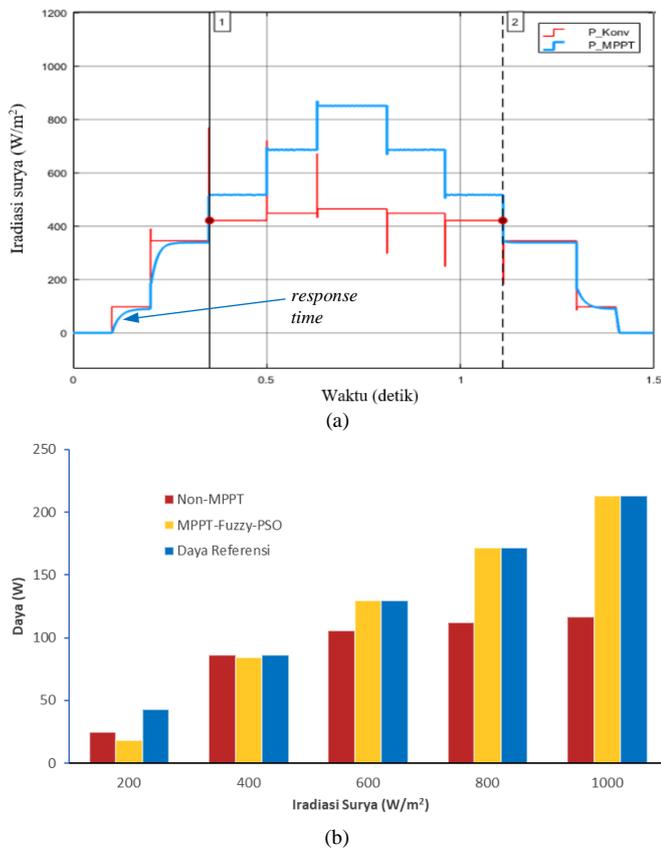
pukul 12.00 bernilai 1000 W/m<sup>2</sup>. Selanjutnya iradiasi surya mengalami penurunan hingga pada posisi terendah di sore hari pukul 18.00.



Gambar 8. Sinyal iradiasi surya yang menerpa *solar photovoltaic*

A. Skenario 1: Uji Beban 10 Ohm

Uji pembebanan skenario pertama pada sistem *solar photovoltaic* adalah pemasangan beban resistif 10 Ohm dengan hasil uji ditunjukkan pada Gambar 9. Gambar 9(a) menunjukkan sinyal daya keluaran MPPT dan non-MPPT pada berbagai iradiasi surya dan Gambar 9(b) menunjukkan grafik daya keluaran MPPT dan non-MPPT. Pada iradiasi surya 200 W/m<sup>2</sup> diperlukan *response time* 0,1181 detik untuk menghasilkan daya 18,25 W oleh pengendali MPPT. *Response time* adalah waktu untuk mencapai daya maksimum.



Gambar 9. Hasil pengendalian MPPT pada sistem *solar photovoltaic* dengan beban resistif 10 Ohm: (a) sinyal daya, dan (b) grafik perbandingan daya

Pada kondisi awal ini pengendali MPPT membutuhkan waktu untuk memproses aturan *fuzzy* teroptimasi PSO dalam merespon perubahan iradiasi surya. Perubahan arus dan tegangan konverter belum signifikan karena iradiasi surya masih rendah dengan beban konverter yang kecil. Pada iradiasi 400 W/m<sup>2</sup> mulai terjadi *overshoot* akibat perubahan iradiasi mendadak yang menyebabkan kenaikan arus sesaat pada konverter dan beban. Pengendali MPPT melacak daya maksimum dari sistem *solar photovoltaic* dengan menghitung perubahan yang diperlukan dalam *duty cycle* konverter. *Duty cycle* konverter ini dihasilkan dengan mengintegrasikan keluaran dari pengendali MPPT. Pelacakan menggunakan aturan *fuzzy* teroptimasi PSO menghasilkan daya 84,25 W dengan *response time* 0,1207 detik, sementara non-MPPT menghasilkan daya 86,20 W. Konverter tanpa pengendali MPPT pada kondisi ini masih mampu menghasilkan tegangan keluaran yang baik karena *duty cycle* yang masih bisa maksimal. Hal ini disebabkan beban konverter relatif kecil yaitu 10 Ohm dan iradiasi surya yang masih rendah.

Selanjutnya pada iradiasi 600 W/m<sup>2</sup> hingga maksimum 1000 W/m<sup>2</sup> pengendali MPPT menunjukkan kinerja yang memuaskan. Daya maksimum tertinggi yang berhasil dilacak

adalah 213,10 W pada iradiasi 1000 W/m<sup>2</sup>. Pengendali MPPT berbasis *fuzzy*-PSO menghitung perubahan yang diperlukan dalam *duty cycle* konverter untuk melacak titik daya maksimum dari sistem *solar photovoltaic*. *Duty cycle* konverter dc-dc dihasilkan dengan mengintegrasikan keluaran dari pengendali MPPT. Seperti yang terlihat pada Gambar 9(a), daya keluaran konverter mampu melacak variasi iradiasi surya yang berhubungan langsung dengan tingkat daya *solar photovoltaic* yang dapat dihasilkan. Gambar 9(a) juga menunjukkan pengendali MPPT berbasis *fuzzy*-PSO memiliki kinerja yang baik, tidak hanya pada kondisi perubahan yang lambat dan keadaan tunak, tetapi juga kondisi atmosfer yang berubah dengan cepat. Dapat dilihat juga bahwa riak daya keluaran konverter hasil MPPT sangat rendah jika dibandingkan dengan non-MPPT, dan osilasi daya juga sangat kecil. Secara keseluruhan terlihat bahwa hasil pengendalian memiliki kekokohan (*robustness*) yang sangat baik. *Duty cycle* konverter dc-dc selalu disesuaikan oleh pengendali MPPT untuk melacak titik daya maksimum sistem *solar photovoltaic* sesuai dengan tingkat iradiasi surya.

Kinerja pengendali MPPT berbasis *fuzzy*-PSO dalam penelitian ini dibandingkan dengan hasil penelitian pada pustaka [9], [17], [22], [23], dan [25] seperti ditunjukkan pada Tabel III. Parameter kinerja yang dapat dibandingkan adalah *response time* dan kekokohan (*robustness*) dalam merespon perubahan iradiasi surya. Kekokohan diukur berdasarkan kinerja *steady state* dari sinyal kendali MPPT. Jika tanpa osilasi maka dikategorikan sangat baik, dengan sedikit osilasi masuk kategori baik, dan osilasi yang banyak masuk kategori buruk. Pengendali MPPT berbasis *fuzzy*-PSO memiliki kinerja lebih baik dibandingkan dengan beberapa metode lain, dengan *response time* yang dihasilkan adalah 0,1181 detik dan kekokohan sangat baik.

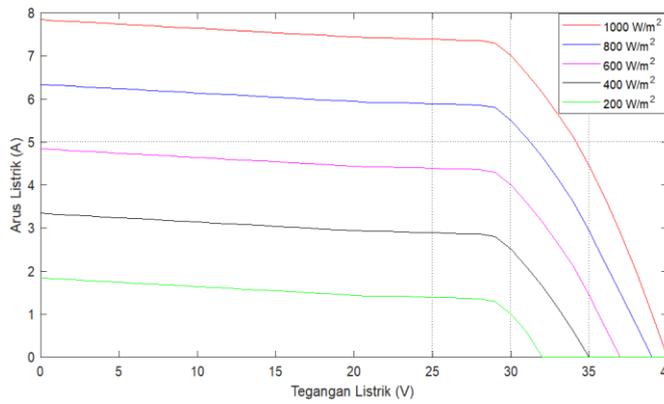
TABEL III. PERBANDINGAN KINERJA METODE-METODE MPPT

No.	Metode MPPT	Response Time (detik)	Robustness
1	QOCGWO-RFA [9]	0,1400	Sangat baik
2	HC [17]	0,4300	Buruk
3	P&O [17]	0,4100	Baik
4	Fuzzy-DQNR [22]	0,2165	Sangat baik
5	FLC [23]	0,2000	Baik
6	BAT-FLC [25]	0,1300	Sangat baik
7	Fuzzy-PSO diusulkan	0,1181	Sangat baik

Kurva arus *versus* tegangan hasil pengendalian MPPT pada sistem *solar photovoltaic* dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 10. Kurva tersebut telah sesuai dengan karakteristik teoritis *solar photovoltaic*. Titik daya maksimum diperoleh pada tegangan 29 volt dan arus listrik 7,35 ampere dengan iradiasi surya 1000 W/m<sup>2</sup>.

B. Skenario 2: Uji Beban 50 Ohm

Uji pembebanan skenario kedua adalah pemasangan beban resistif 50 Ohm. Uji ini bertujuan menganalisis kinerja pengendali MPPT berbasis *fuzzy*-PSO. Gambar 11(a) menunjukkan sinyal daya keluaran MPPT dan non-MPPT pada berbagai iradiasi surya dan Gambar 11(b) menunjukkan grafik daya keluaran MPPT dan non-MPPT. Beban yang lima kali lebih besar dibanding sebelumnya membuat sistem konvensional non-MPPT tidak mampu mendeteksi titik daya maksimum sistem *solar photovoltaic*. Beban yang relatif besar ini membuat arus beban menjadi lebih besar. Arus beban ini menyebabkan medan magnet pada induktor di rangkaian

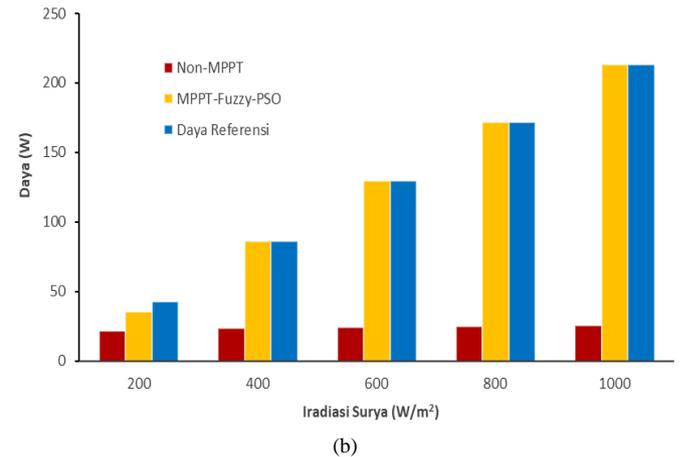
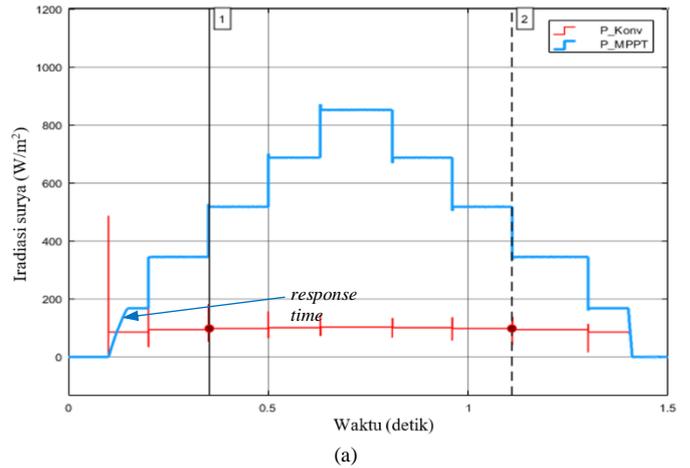


Gambar 10. Kurva arus versus tegangan hasil pengendalian MPPT pada sistem solar photovoltaic

konverter menjadi lebih besar dan memaksa *duty cycle* berada pada posisi yang rendah. Posisi *duty cycle* yang rendah ini berakibat tegangan keluaran inverter menjadi rendah, sebagaimana dinyatakan dalam (1). Hasilnya adalah daya keluaran sistem yang rendah. Gejala ini dibuktikan dengan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 11(a). Kenaikan iradiasi surya tidak diikuti dengan kenaikan daya sistem tetapi tetap pada kisaran 21,50 W hingga 25,74 W.

Dalam kondisi inilah diperlukan pengendali MPPT *fuzzy-PSO*. Pada iradiasi surya 200 W/m<sup>2</sup> diperlukan *response time* 0,0829 detik untuk menghasilkan daya 35,69 W oleh pengendali MPPT. Pada awal perubahan iradiasi surya, pengendali MPPT membutuhkan waktu untuk memproses aturan *fuzzy* teroptimasi PSO. Selanjutnya pada iradiasi 400 W/m<sup>2</sup> hingga maksimum 1000 W/m<sup>2</sup> pengendali MPPT menunjukkan kinerja yang memuaskan. Daya maksimum tertinggi yang berhasil dilacak adalah 213,12 W, dengan daya referensi adalah 213,15 W pada iradiasi 1000 W/m<sup>2</sup>. Pengendali MPPT berbasis *fuzzy-PSO* menghitung perubahan yang diperlukan dalam *duty cycle* konverter untuk melacak titik daya maksimum dari sistem solar photovoltaic. *Duty cycle* konverter dc-dc dihasilkan dengan mengintegrasikan keluaran dari pengendali MPPT. Seperti yang terlihat pada Gambar 11(a), daya keluaran konverter mampu melacak variasi iradiasi surya yang berhubungan langsung dengan tingkat daya solar photovoltaic yang dapat dihasilkan. Gambar 11(a) juga menunjukkan pengendali MPPT berbasis *fuzzy-PSO* memiliki kinerja yang baik, tidak hanya pada kondisi perubahan yang lambat dan keadaan tunak, tetapi juga kondisi atmosfer yang berubah dengan cepat. Dapat dilihat juga bahwa riak daya keluaran konverter hasil MPPT sangat rendah jika dibandingkan dengan non-MPPT, dan osilasi daya juga sangat kecil. Secara keseluruhan terlihat bahwa hasil pengendalian memiliki kekokohan (*robustness*) yang sangat baik. *Duty cycle* konverter dc-dc selalu disesuaikan oleh pengendali MPPT untuk melacak titik daya maksimum sistem solar photovoltaic sesuai dengan tingkat iradiasi surya. Riak daya keluaran konverter sangat rendah jika dibandingkan dengan non-MPPT.

Kinerja pengendali MPPT berbasis *fuzzy-PSO* dalam penelitian ini dibandingkan dengan hasil penelitian yang relevan pada pustaka [14], [21], dan [23] seperti ditunjukkan pada Tabel IV. Parameter kinerja yang dapat dibandingkan adalah *response time* dan kekokohan (*robustness*) dalam merespon perubahan iradiasi surya. Pengendali MPPT berbasis *fuzzy-PSO* memiliki kinerja lebih baik dibandingkan dengan beberapa metode lain, dengan *response time* yang dihasilkan adalah 0,0829 detik dan kekokohan sangat baik.



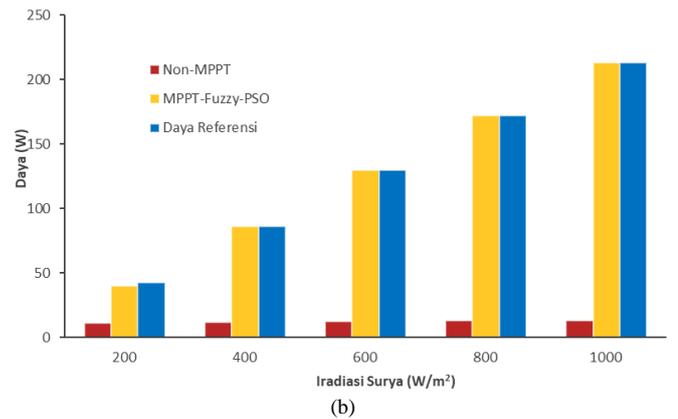
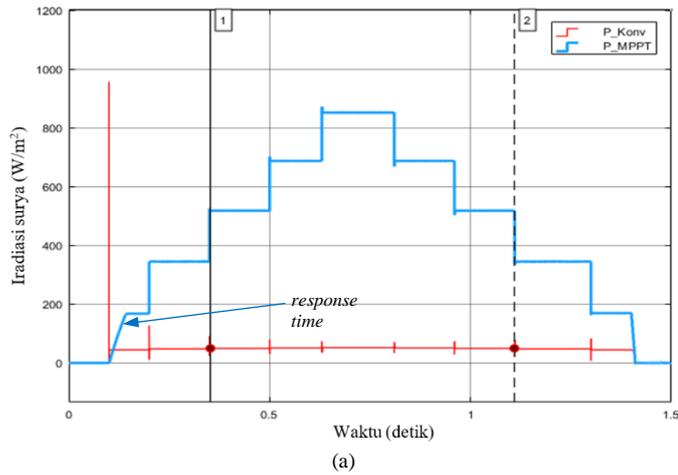
Gambar 11. Hasil pengendalian MPPT pada sistem solar photovoltaic dengan beban resistif 50 Ohm: (a) sinyal daya, dan (b) grafik perbandingan daya

TABEL IV. PERBANDINGAN KINERJA METODE-METODE MPPT

No.	Metode MPPT	Response Time (detik)	Robustness
1	P&O [14]	0,2600	Baik
2	ANFIS [21]	0,1500	Sangat baik
3	NN-P&O [21]	0,1100	Sangat baik
4	FLC [23]	0,1700	Baik
5	Fuzzy-PSO diusulkan	0,0829	Sangat baik

C. Skenario 3: Uji Beban 100 Ohm

Skenario berikutnya adalah uji sistem dengan beban resistif 100 Ohm. Hasil uji ini ditunjukkan pada Gambar 12(a) yang menampilkan sinyal daya keluaran dan Gambar 12(b) yang menampilkan grafik daya keluaran MPPT dan non-MPPT. Beban resistif 100 Ohm membuat sistem konvensional non-MPPT tidak mampu mendeteksi titik daya maksimum. Sebagaimana diuraikan pada bagian sebelumnya bahwa beban yang semakin besar maka arus beban juga semakin besar. Kondisi ini mengakibatkan medan magnet pada induktor di rangkaian konverter menjadi besar dan memaksa *duty cycle* berada pada posisi rendah. Dengan demikian tegangan keluaran inverter menjadi rendah, sebagaimana dinyatakan dalam (1), yang berakibat daya keluaran sistem menjadi rendah. Hasil uji menunjukkan fenomena ini sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 12(a), dengan daya keluaran sistem tetap pada kisaran 11,16 W hingga 13,03 W.



Gambar 12. Hasil pengendalian MPPT pada sistem *solar photovoltaic* dengan beban resistif 100 Ohm: (a) sinyal daya dan (b) grafik perbandingan daya

Peran pengendali MPPT *fuzzy*-PSO sangat penting untuk mengatasi permasalahan ini. Pada iradiasi surya 200 W/m<sup>2</sup> diperlukan *response time* 0,0818 detik untuk menghasilkan daya 40,00 W dari referensi 42,50 W. Pada awal perubahan iradiasi surya, pengendali MPPT membutuhkan waktu untuk memproses aturan *fuzzy* teroptimasi PSO. Selanjutnya pada iradiasi 400 W/m<sup>2</sup> hingga maksimum 1000 W/m<sup>2</sup> pengendali MPPT menunjukkan kinerja yang memuaskan. Daya maksimum tertinggi yang berhasil dilacak adalah 213 W, dengan daya referensi adalah 213 W pada iradiasi 1000 W/m<sup>2</sup>. Pengendali MPPT berbasis *fuzzy*-PSO menghitung perubahan yang diperlukan dalam *duty cycle* konverter untuk melacak titik daya maksimum dari sistem *solar photovoltaic*. *Duty cycle* konverter dc-dc dihasilkan dengan mengintegrasikan keluaran dari pengendali MPPT. Seperti yang terlihat pada Gambar 12(a), daya keluaran konverter mampu melacak variasi iradiasi surya yang berhubungan langsung dengan tingkat daya *solar photovoltaic* yang dapat dihasilkan. Gambar 12(a) juga menunjukkan pengendali MPPT berbasis *fuzzy*-PSO memiliki kinerja yang baik, tidak hanya pada kondisi perubahan yang lambat dan keadaan tunak, tetapi juga kondisi atmosfer yang berubah dengan cepat. Dapat dilihat juga bahwa riak daya keluaran konverter hasil MPPT sangat rendah jika dibandingkan dengan non-MPPT, dan osilasi daya juga sangat kecil. Secara keseluruhan terlihat bahwa hasil pengendalian memiliki kekokohan (*robustness*) yang sangat baik. *Duty cycle* konverter dc-dc selalu disesuaikan oleh pengendali MPPT untuk melacak titik daya maksimum sistem *solar photovoltaic* sesuai dengan tingkat iradiasi surya. Riak daya keluaran konverter sangat rendah jika dibandingkan dengan non-MPPT.

Kinerja pengendali MPPT berbasis *fuzzy*-PSO dalam penelitian ini dibandingkan dengan hasil penelitian pada

pustaka [15] dan [21] seperti ditunjukkan pada Tabel V. Parameter kinerja yang dapat dibandingkan adalah *response time* dan kekokohan (*robustness*) dalam merespon perubahan iradiasi surya. Pengendali MPPT berbasis *fuzzy*-PSO memiliki kinerja lebih baik dibandingkan dengan beberapa metode lain, dengan *response time* yang dihasilkan adalah 0,0818 detik dan kekokohan sangat baik.

TABEL V. PERBANDINGAN KINERJA METODE-METODE MPPT

No.	Metode MPPT	Response Time (detik)	Robustness
1	Intelligence P&O [15]	0,0851	Baik
2	ANFIS [21]	0,1700	Sangat baik
3	NN-P&O [21]	0,1500	Sangat baik
4	<i>Fuzzy</i> -PSO diusulkan	0,0818	Sangat baik

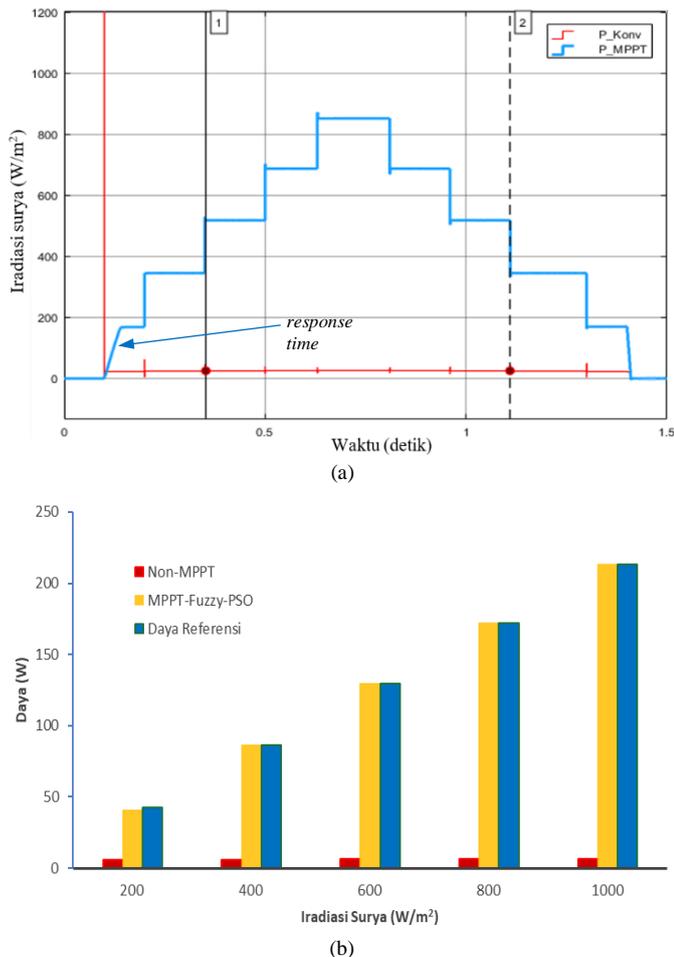
#### D. Skenario 4: Uji Beban 200 Ohm

Skenario terakhir adalah uji sistem dengan beban resistif 200 Ohm. Hasil uji ini ditunjukkan pada Gambar 13(a) yang menampilkan sinyal daya keluaran dan Gambar 13(b) yang menampilkan grafik daya keluaran MPPT dan non-MPPT. Beban resistif 200 Ohm membuat sistem konvensional non-MPPT tidak mampu mendeteksi titik daya maksimum. Sebagaimana diuraikan pada bagian sebelumnya bahwa beban yang semakin besar maka arus beban juga semakin besar. Kondisi ini mengakibatkan medan magnet pada induktor di rangkaian konverter menjadi besar dan memaksa *duty cycle* berada pada posisi rendah. Dengan demikian tegangan keluaran inverter menjadi rendah, sebagaimana dinyatakan dalam (1), yang berakibat daya keluaran sistem menjadi rendah. Hasil uji menunjukkan fenomena ini sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 13(a), dengan daya keluaran sistem stagnan pada kisaran 5,66 W hingga 6,51 W.

Peran pengendali MPPT *fuzzy*-PSO sangat penting untuk mengatasi permasalahan ini. Pada iradiasi surya 200 W/m<sup>2</sup> diperlukan *response time* 0,0809 detik untuk menghasilkan daya 40,80 W dari referensi 42,50 W. Pada awal perubahan iradiasi surya, pengendali MPPT membutuhkan waktu untuk memproses aturan *fuzzy* teroptimasi PSO. Selanjutnya pada iradiasi 400 W/m<sup>2</sup> hingga maksimum 1000 W/m<sup>2</sup> pengendali MPPT menunjukkan kinerja yang memuaskan. Daya maksimum tertinggi yang berhasil dilacak adalah 213,10 W, dengan daya referensi adalah 213,15 W pada iradiasi 1000 W/m<sup>2</sup>. Pengendali MPPT berbasis *fuzzy*-PSO menghitung perubahan yang diperlukan dalam *duty cycle* konverter untuk melacak titik daya maksimum dari sistem *solar photovoltaic*. *Duty cycle* konverter dc-dc dihasilkan dengan mengintegrasikan keluaran dari pengendali MPPT. Seperti yang terlihat pada Gambar 13(a), daya keluaran konverter mampu melacak variasi iradiasi surya yang berhubungan langsung dengan tingkat daya *solar photovoltaic* yang dapat dihasilkan. Gambar 13(a) juga menunjukkan pengendali MPPT berbasis *fuzzy*-PSO memiliki kinerja yang baik, tidak hanya pada kondisi perubahan yang lambat dan keadaan tunak, tetapi juga kondisi atmosfer yang berubah dengan cepat. Dapat dilihat juga bahwa riak daya keluaran konverter hasil MPPT sangat rendah jika dibandingkan dengan non-MPPT, dan osilasi daya juga sangat kecil.

Secara keseluruhan terlihat bahwa hasil pengendalian memiliki kekokohan (*robustness*) yang sangat baik. *Duty cycle* konverter dc-dc selalu disesuaikan oleh pengendali MPPT untuk melacak titik daya maksimum sistem *solar photovoltaic* sesuai dengan tingkat iradiasi surya. Riak daya keluaran konverter sangat rendah jika dibandingkan dengan non-MPPT.

Pada Gambar 13(a) terlihat bahwa perubahan iradiasi dari 0 ke 200 W/m<sup>2</sup> terjadi *overshoot* yang sangat tinggi pada non-MPPT, sementara pengendali MPPT mampu memberikan kinerja yang baik. Dari keseluruhan hasil uji yang didapatkan maka terbukti bahwa pengendali MPPT berbasis *fuzzy*-PSO mempunyai kinerja yang relatif lebih baik jika dibandingkan dengan metode-metode sebelumnya.



Gambar 13. Hasil pengendalian MPPT pada sistem *solar photovoltaic* dengan beban resistif 200 Ohm: (a) sinyal daya dan (b) grafik perbandingan daya

#### IV. PENUTUP

Pengendali MPPT berbasis *fuzzy*-PSO yang diusulkan dalam penelitian ini mampu bekerja optimal. Kinerja optimal pengendali MPPT ditunjukkan dengan uji operasi *solar photovoltaic* dengan beban resistif mulai beban relatif kecil 10 Ohm hingga beban besar 200 Ohm. Pada kondisi tanpa pengendali MPPT, semakin besar beban yang dilayani oleh *solar photovoltaic* maka semakin jauh dari titik maksimum daya. Dengan penerapan pengendali MPPT berbasis *fuzzy*-PSO, ketika beban yang dilayani oleh *solar photovoltaic* semakin besar maka tetap dihasilkan daya keluaran pada titik maksimum. Adanya beban resistif di sisi keluaran, yang dapat membatasi konverter dalam menghasilkan *duty cycle* menemukan daya maksimum, dapat diatasi dengan penerapan pengendali MPPT berbasis *fuzzy*-PSO. Hasil terbaik diperoleh pada skenario 3: uji beban 100 Ohm dengan *response time* 0,0818 detik dan *robustness* yang sangat baik. Penelitian ini dapat dilanjutkan dengan implementasi perangkat keras purwarupa sistem pengendalian MPPT pada *solar photovoltaic* menggunakan pengendali logika *fuzzy* teroptimasi PSO. Pengendalian MPPT

juga difokuskan pada konverter dc-dc yang terhubung langsung dengan beban listrik.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia atas dukungannya dalam penelitian ini.

#### REFERENSI

- [1] M.H. Rahmat, Setkab RI Website. [Online]. Available: <https://setkab.go.id/rueen-rencana-umum-energi-nasional/>.
- [2] JDIH ESDM Website. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/5523/pp-no-79-tahun-2014>.
- [3] A. Raj, S. R. Arya, and J. Gupta, "Solar PV array-based DC-DC converter with MPPT for low power applications," *Renew. Energy Focus*, vol. 34, September 2020, pp. 109–119, doi: 10.1016/j.ref.2020.05.003.
- [4] S. Salman, X. Ai, and Z. Wu, "Design of a P-&O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200W PV system," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 3, 2018, pp. 1-8.
- [5] K. Pal, S. Kumar, B. Singh, and T.C. Kandpal, "Implementation of frequency integrated multi-order generalized integrator for solar energy sourced grid," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 131, October 2021, p. 106918.
- [6] H. Suryawinata, D. Purwanti, dan S. Sunardiyo, "Sistem Monitoring pada Panel Surya Menggunakan Data logger Berbasis ATmega 328 dan Real Time Clock DS1307," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 9 no. 1, Januari-Juni 2017, pp. 30–36.
- [7] EBTKE Kementerian ESDM Website. [Online]. Available: <https://ebtke.esdm.go.id/post/2019/09/26/2348/pejuang.besar.kejar.targ.et.ebt.melalui.energi.surya>.
- [8] R. Singh, S.M. Amr, and M.S.J. Asghar, "Supervisory control strategy for the effective solar energy utilization in a residential microgrid system using a cost-effective controller," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 132, November 2021, p. 107170.
- [9] A. Arther Jain, B. J. Rabi, and S. S. Darly, "Application of QOCGWORFA for maximum power point tracking (MPPT) and power flow management of solar PV generation system," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 7, pp. 4122–4136, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.071.
- [10] R.B. Ballipo, S. Mikkili, and P.K. Bonthagorla, "Hybrid, Optimal, Intelligent and Classical PV MPPT Techniques: A Review," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 7, no. 1, January 2021.
- [11] H. Tao, M. Ghahremani, F. W. Ahmed, W. Jing, M. S. Nazir, and K. Ohshima, "A novel MPPT controller in PV systems with hybrid whale optimization-PS algorithm based ANFIS under different conditions," *Control Eng. Pract.*, vol. 112, February 2021, doi: 10.1016/j.conengprac.2021.104809.
- [12] A.F.C. Borray, A. Garces, J. Merino, E. Torres, and J. Mazon, "New energy bound-based model for optimal charging of electric vehicles with solar photovoltaic considering low-voltage network's constraints," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 129, July 2021, p. 106862.
- [13] A. Ali, K. Almutairi, S. Padmanaban, V. Tirth, S. Algarni, K. Irshad, S. Islam, M.H. Zahir, M. Shafiullah, and M.Z. Malik, "Investigation of MPPT Techniques Under Uniform and Non-Uniform Solar Irradiation Condition—A Retrospection," *IEEE Access*, vol. 8, 2020.
- [14] M. Hebchi, A. Kouzou, and A. Choucha, "A modified variable step size for Maximum Power Point tracking based on Perturb and observe algorithm," *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, vol. 66, no. 4, 2018, pp. 05-14.
- [15] I.A. Ayad, E. Elwarraki, and M. Baghdadi, "Intelligent Perturb and Observe Based MPPT Approach Using Multilevel DC-DC Converter to Improve PV Production System," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2021, pp. 1-13, 2021.
- [16] Y. Shi, Y. Sun, J. Liu, and X. Du, "Model and stability analysis of grid-connected PV system considering the variation of solar irradiance and cell temperature," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 132, November 2021, p. 107155.
- [17] V. Q. B. Ngo, M. Latifi, R. Abbassi, H. Jerbi, K. Ohshima, and M. khaksar, "Improved krill herd algorithm based sliding mode MPPT controller for variable step size P&O method in PV system under simultaneous change of irradiance and temperature," *J. Franklin Inst.*, vol. 358, pp. 3491–3511, 2021, doi: 10.1016/j.jfranklin.2021.02.021.

- [18] M. Rastogi, A. Ahmad, and A. H. Bhat, "Performance investigation of two-level reduced-switch D-STATCOM in grid-tied solar-PV array with stepped P&O MPPT algorithm and modified SRF strategy," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences.*, vol. 2021, doi: 10.1016/j.jksues.2021.06.008.
- [19] M. Jiang, M. Ghahremani, S. Dadfar, H. Chi, Y. N. Abdallah, and N. Furukawa, "Implementation of improved Perturb & Observe MPPT technique with confined search space for standalone photovoltaic system," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 32, No. 7, November 2020, pp. 432-441.
- [20] M. Mohammadinodoushan, R. Abbassi, H. Jerbi, F.W. Ahmed, H.A.K. Ahmed, and A. Rezvani, "A new MPPT design using variable step size perturb and observe method for PV system under partially shaded conditions by modified shuffled frog leaping algorithm- SMC controller," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 45, 2021, p. 101056.
- [21] M. Jiang, M. Ghahremani, S. Dadfar, H. Chi, and Y.N. Abdallah, "A novel combinatorial hybrid SFL-PS algorithm based neural network with perturb and observe for the MPPT controller of a hybrid PV-storage system," *Control Engineering Practice*, vol. 114, June 2021, p. 104880.
- [22] Y. Singh and N. Pal, "Reinforcement learning with fuzzified reward approach for MPPT control of PV systems," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 48, October 2021, p. 101665.
- [23] S.D. Al-Majidiab, M.F. Abboda, and H.S. Al-Raweshidya, "A novel maximum power point tracking technique based on fuzzy logic for photovoltaic systems," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 31, 2018, pp. 14158-14171.
- [24] B. Laxman, A. Annamraju, and N. V. Srikanth, "A grey wolf optimized fuzzy logic based MPPT for shaded solar photovoltaic systems in microgrids," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 18, pp. 10653-10665, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.158.
- [25] X. Ge, F. W. Ahmed, A. Rezvani, N. Aljojo, S. Samad, and L. K. Foong, "Implementation of a novel hybrid BAT-Fuzzy controller based MPPT for grid-connected PV-battery system," *Control Eng. Pract.*, vol. 98, March 2020, doi: 10.1016/j.conengprac.2020.104380.
- [26] A. Iqbal, "PSO Based Controlled Six-phase Grid Connected Induction Generator for Wind Energy Generation," *CES Transactions on Electrical Machines and Systems.*, vol. 5 No. 1, pp. 41-49, March 2021.
- [27] Q. Zhao and C. Li, "Two-Stage Multi-Swarm Particle Swarm Optimizer for Unconstrained and Constrained Global Optimization", *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 124905 - 124927.