

**STUDI KOMPARATIF ALGORITMA *MAXIMUM POWER POINT*
TRACKING PADA *PHOTOVOLTAIC STRING* DALAM KONDISI
BAYANGAN PARSIAL**

(Skripsi)

Oleh

**STEFANUS DEBIARTO MARUDUT SAGALA
NPM 1815031035**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

STUDI KOMPARATIF ALGORITMA *MAXIMUM POWER POINT TRACKING* PADA *PHOTOVOLTAIC STRING* DALAM KONDISI BAYANGAN PARSIAL

Oleh

STEFANUS BEBIARTO MARUDUT SAGALA

Matahari adalah sumber energi terbarukan yang digunakan dalam teknologi *photovoltaic* (PV) untuk menghasilkan listrik. Salah satu tantangan utama dalam penggunaan PV adalah penurunan energi yang dihasilkan akibat bayangan parsial, yang dapat diatasi menggunakan algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) seperti *Incremental Conductance* (IC), *Particle Swarm Optimization* (PSO), dan *Flower Pollination Algorithm* (FPA). Penelitian ini membandingkan efisiensi dan waktu pelacakan dari metode IC, PSO, dan FPA dalam kondisi bayangan parsial pada PV *string* dengan daya output 2,5 kW menggunakan simulasi MATLAB/SIMULINK. Pengujian dilakukan pada enam skenario bayangan parsial untuk menemukan titik *Maximum Power Point* (MPP). Hasil simulasi menunjukkan bahwa algoritma IC mengalami kesulitan melacak titik MPP pada skenario 4, 5, dan 6 dengan efisiensi rata-rata 94,78% dalam waktu 0,085 detik, sementara algoritma PSO terjebak pada skenario 6 dengan efisiensi rata-rata 96,19% dalam waktu 1,33 detik. Di sisi lain, algoritma FPA mampu melacak titik MPP pada semua skenario dengan efisiensi tertinggi yaitu 98,65% dalam waktu 0,86 detik. Meskipun demikian, algoritma IC unggul dalam kecepatan pelacakan dengan waktu rata-rata 0,068 detik berkat kesederhanaannya, dibandingkan PSO dan FPA yang memerlukan lebih banyak iterasi untuk mencapai konvergensi. Penelitian ini membuktikan bahwa algoritma FPA memiliki keunggulan dalam efisiensi pelacakan MPP pada PV *string* dalam kondisi bayangan parsial, menjadikannya metode paling efektif untuk menjaga performa optimal sistem PV. Di sisi lain, meskipun IC unggul dalam kecepatan pelacakan, efisiensi dan kestabilannya tidak lebih baik dibandingkan dengan FPA yang mampu melacak MPP dengan lebih akurat dan konsisten.

Kata kunci: PV String, Bayangan Parsial, MPPT, IC, PSO, FPA.

ABSTRACT

COMPARATIVE STUDY OF MAXIMUM POWER POINT TRACKING ALGORITHMS ON PHOTOVOLTAIC STRING UNDER PARTIAL SHADING CONDITIONS

By

STEFANUS DEBIARTO MARUDUT SAGALA

The sun is a renewable energy source used in photovoltaic (PV) technology to generate electricity. One of the main challenges in using PV is the reduced energy output due to partial shading, which can be addressed using Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms such as Incremental Conductance (IC), Particle Swarm Optimization (PSO), and Flower Pollination Algorithm (FPA). This study compares the efficiency and tracking time of the IC, PSO, and FPA methods under partial shading conditions on a PV string with an output power of 2.5 kW using MATLAB SIMULINK simulations. The tests were conducted on six partial shading scenarios to find the Maximum Power Point (MPP). The simulation results show that the IC algorithm struggles to track the MPP in scenarios 4, 5, and 6 with an average efficiency of 94.81% in 0.068 seconds, while the PSO algorithm gets stuck in scenario 6 with an average efficiency of 96.19% in 1.24 seconds. On the other hand, the FPA algorithm successfully tracks the MPP in all scenarios with the highest average efficiency of 98.65% in 0.95 seconds. However, the IC algorithm excels in tracking speed with an average time of 0.068 seconds due to its simplicity compared to PSO and FPA, which require more iterations to converge. This study demonstrates that the FPA algorithm has an advantage in MPP tracking efficiency in PV strings under partial shading conditions, making it the most effective method for maintaining optimal PV system performance. On the other hand, although the IC algorithm excels in tracking speed, its efficiency and stability are lower compared to FPA, which can track MPP more accurately and consistently.

Key words: PV String, Partial Shading, MPPT, IC, PSO, FPA.

**STUDI KOMPARATIF ALGORITMA *MAXIMUM POWER POINT*
TRACKING PADA *PHOTOVOLTAIC STRING* DALAM KONDISI
BAYANGAN PARSIAL**

Oleh

STEFANUS DEBIARTO MARUDUT SAGALA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Skripsi : **STUDI KOMPARATIF ALGORITMA
MAXIMUM POWER POINT TRACKING
PADA PHOTOVOLTAIC STRING DALAM
KONDISI BAYANGAN PARSIAL**

Nama Mahasiswa : **Stefanus Debiarto Marudut Sagala**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1815031035**

Program Studi : **Teknik Elektro**

Fakultas : **Teknik**



Dr.Eng. Ir. Dikpride Despa, S.T., Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng.
M.T., IPM., ASEAN Eng.
NIP 197204281998032001 NIP 198806242019031015

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Herlinawati, S.T., M.T.
NIP 197103141999032001

Sumadi, S.T., M.T.
NIP 197311042000031001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Dr.Eng. Ir. Dikpride Despa, S.T., M.T.,
IPM., ASEAN Eng.

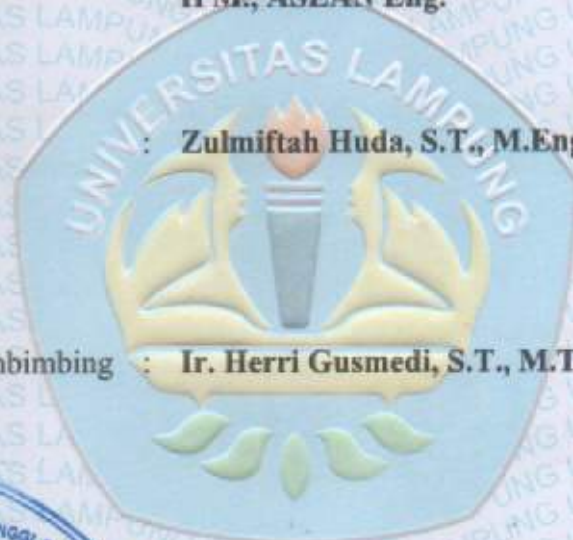
Sekretaris

: Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng.

Penguji

Bukan Pembimbing

: Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung

Dr. Eng. Ir. Henny Fitriawan, S.T., M.Sc. }

NIP 197509282001121002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 16 Desember 2024

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi akademik sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 20 Februari 2025



Stefanus Debiarto Marudut Sagala
NPM 1815031035

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung pada tanggal 9 Juli 1999, sebagai anak pertama dari dua bersaudara, dari Mendiang Bapak Liston Sagala dan Mendiang Ibu Ratna Masliana Silaen.

Riwayat pendidikan penulis dimulai dari SD Fransiskus 2 Pahoman pada tahun 2005 hingga 2011, SMP Negeri 5 Bandar Lampung pada tahun 2011 hingga 2014 dan SMKS Taman Karya Madya Teknik Tanjung Karang pada tahun 2015 hingga tahun 2018.

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, pada tahun 2018 melalui jalur SBMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis berkesempatan menjadi asisten Laboratorium Sistem Tenaga Listrik dari tahun 2020. Selain itu, penulis juga tergabung dalam organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (Himatro) yang pada tahun 2019 diamanahkan tergabung dalam Departemen Pengembangan Ketechnikan sebagai Anggota Divisi Pengabdian Masyarakat serta pada tahun 2020 diamanahkan sebagai Anggota Divisi Sosial dan Kewirausahaan. Penulis melaksanakan Kerja Magang di PT. Syntek Energy and Control, Jakarta dalam Divisi Konsultan sebagai *Junior Power Engineer* dan membuat laporan kerja praktek yang berjudul “Analisa Dampak Koneksi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terhadap Sistem Tenaga Listrik Nias.”

**“Ku persembahkan dan ku dedikasikan
Skripsi ini untuk Kedua Orangtua Ku,
Mendiang Ayahanda Liston Sagala dan
Mendiang Ibunda Ratna Masliana Silaen
yang memberikan semua hal terbaik demi
anaknya dalam mencapai kesuksesan”**

MOTTO

"Banyaklah rancangan di hati manusia, tetapi keputusan Tuhanlah yang terlaksana."

(Amsal 19: 21)

“Tetapi carilah dahulu Kerajaan Allah dan kebenarannya, maka semuanya itu akan ditambahkan kepadamu. Sebab itu janganlah kamu kuatir akan hari esok, karena hari esok mempunyai kesusahannya sendiri. Kesusahan sehari cukuplah untuk sehari"

(Matius 6: 33-34)

"Dan apa yang telah kamu pelajari dan apa yang telah kamu terima, dan apa yang telah kamu dengar dan apa yang telah kamu lihat padaku, lakukanlah itu. Maka Allah sumber damai sejahtera akan menyertai kamu"

(Filipi 4: 9)

SANWACANA

Segala puji bagi Tuhan Yesus Kristus, atas berkat dan karunianya yang diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan Skripsi ini yang berjudul “Studi Komparatif Algoritma *Maximum Power Point Tracking* pada *Photovoltaic String* dalam Kondisi Bayangan Parsial” ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Ucapan terima kasih yang tulus kami sampaikan kepada berbagai pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam proses penyusunan skripsi ini:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., ASEAN Eng. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Bapak Sumadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
5. Ibu Dr.Eng. Ir. Dikpride Despa, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng., selaku dosen pembimbing utama yang selalu memberikan motivasi dan pandangan kehidupan, mengarahkan dan membimbing dengan tulus dan penuh kesabaran.
6. Bapak Zulmiftah Huda, S.T., M.Eng., selaku dosen pembimbing pendamping yang telah memberikan saran, bimbingan dan arahan dengan baik dan ramah.

7. Bapak Ir. Herri Gusmedi, S.T., M.T., selaku dosen penguji yang telah memberikan saran, masukan, kritik dan arahan.
8. Bapak Yetti Yuniati, S.T., M.T., selaku dosen Pembimbing Akademik (PA) yang telah memberikan nasihat, arahan, bimbingan dengan baik dan tulus bagi penulis selama perkuliahan.
9. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu, pengajaran, dan pandangan hidup selama perkuliahan.
10. Staff administrasi Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam hal administrasi.
11. Mendiang Bapak Liston Sagala dan Mendiang Ibu Ratna Masliana Silaen selaku orangtua yang terus memberikan motivasi, dukungan, nasihat, dan doa tanpa henti kepada penulis untuk menyelesaikan perkuliahan dengan baik.
12. Surya Jonathan Sagala dan Nathalia Octa br. Sagala selaku adik yang menjadi motivasi penulis untuk menyelesaikan perkuliahan dengan baik.
13. Regyna, Matthew dan Raquella selaku keluarga kecilku yang telah menjadi motivasi buat menulis untuk menyelesaikan perkuliahan dengan baik.
14. Segenap Keluarga Besar Laboratorium Sistem Tenaga Listrik; Pak Rachman atas kerjasamanya selama menjadi asisten laboratorium; Azis, Reihan, Abdul, Iqbal, Rizki, Naftali dan Natasyah, serta tidak lupa adik-adik asisten 2019, 2020, 2021 dan 2022.
15. Keluarga kumpul Café Ibu; Icad, Ari, Denny, Andika, yang telah menjadi teman konsultasi setiap keluh kesah selama menyelesaikan studi.
16. Keluarga besar Angkatan ELTICS 2018, yang telah memberikan banyak motivasi, nilai-nilai sosial, dan bantuan dalam berbagai hal.
17. Keluarga besar HIMATRO UNILA, yang telah menjadi wadah dalam mengembangkan nilai-nilai organisasi bagi penulis.
18. Semua pihak yang terlibat dalam proses perkuliahan dan penulisan skripsi ini penulis ucapkan terima kasih atas bantuan dan kerjasamanya.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun guna menyempurnakan skripsi ini di masa mendatang. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis secara khusus dan masyarakat pada umumnya.

Bandar Lampung, 20 Februari 2025

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'S' followed by several vertical strokes and a horizontal line at the bottom.

Stefanus Debiarto Marudut Sagala

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK.....	ii
ABSTRACT.....	iii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Rumusan Masalah.....	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Hipotesis	4
1.7 Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Penelitian Terkait.....	6
2.2 Photovoltaic (PV)	7
2.2.1 Prinsip Kerja Sel PV	8
2.2.2 Model Matematis PV	8
2.2.3 Kurva karakteristik Modul PV	9

2.2.4 Karakteristik PV dalam kondisi bayangan parsial	10
2.3 <i>Boost Converter</i>	11
2.4 <i>Maximum Power Point Tracking (MPPT)</i>	13
2.4.1 <i>Incremental Conductance</i>	15
2.4.2 <i>Particle Swarm Optimization</i>	17
2.4.3 <i>Flower Pollination Algorithm</i>	18
III. METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	21
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	22
3.3 Diagram Alir Penelitian	22
3.3.1 Studi Literatur	22
3.3.2 Pengambilan Data Kurva Karakteristik	23
3.3.3 Simulasi MPPT dengan Algoritma IC, PSO dan FPA.....	24
3.3.4 Perbandingan Efektifitas Pelacakan Algoritma IC, PSO dan FPA.....	32
3.3.5 Penarikan Kesimpulan dan Saran	32
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Skenario Kasus Pengujian MPPT pada PV String	33
4.1.1 Pola Bayangan pada PV String untuk Skenario Kasus 1	33
4.1.2 Pola Bayangan pada PV String untuk Skenario Kasus 2.....	34
4.1.3 Pola Bayangan pada PV String untuk Skenario Kasus 3.....	35
4.1.4 Pola Bayangan pada PV String untuk Skenario Kasus 4.....	36
4.1.5 Pola Bayangan pada PV String untuk Skenario Kasus 5.....	37
4.1.6 Pola Bayangan pada PV String untuk Skenario Kasus 6.....	38
4.1.7 Perbandingan Pola Bayangan dari Berbagai Skenario Kasus.....	39
4.2 Hasil Pelacakan MPPT	41
4.2.1 Hasil Pelacakan MPPT pada Skenario Kasus 1	42

4.2.2 Hasil Pelacakan MPPT pada Skenario Kasus 2	44
4.2.3 Hasil Pelacakan MPPT pada Skenario Kasus 3	45
4.2.4 Hasil Pelacakan MPPT pada Skenario Kasus 4	47
4.2.5 Hasil Pelacakan MPPT pada Skenario Kasus 5	49
4.2.6 Hasil Pelacakan MPPT pada Skenario Kasus 6	51
4.3 Perbandingan Hasil Pelacakan MPPT dalam Berbagai Skenario Kasus	53
V. PENUTUP	57
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN	62

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Skema efek <i>photovoltaic</i>	8
Gambar 2.2 Model rangkaian sel PV	9
Gambar 2.3 Kurva karakteristik Arus-Tegangan dan kurva karakteristik Daya-Tegangan	10
Gambar 2.4 Kurva Karakteristik P-V kondisi bayangan parsial.....	11
Gambar 2.5 Rangkaian <i>Boost Converter</i>	12
Gambar 2.6 Karakteristik P-V dari sistem PV yang mempunyai <i>dual-peak</i>	14
Gambar 2.7 Kurva Kinerja MPPT <i>Incremental Conductance</i>	16
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	22
Gambar 3.2 Pemodelan pengambilan data kurva karakteristik.....	24
Gambar 3.3 Blok Diagram Sistem	25
Gambar 3.4 Diagram Alir MPPT dengan Metode IC	26
Gambar 3.5 Diagram Alir MPPT dengan Metode PSO.....	28
Gambar 3.6 Diagram Alir MPPT dengan Metode FPA.....	30
Gambar 4.1 Kurva karakteristik V-I dan V-P pada skenario kasus 1	34
Gambar 4.2 Kurva karakteristik V-I dan V-P pada skenario kasus 2	35
Gambar 4.3 Kurva karakteristik V-I dan V-P pada skenario kasus 3	36
Gambar 4.4 Kurva karakteristik V-I dan V-P pada skenario kasus 4	37
Gambar 4.5 Kurva karakteristik V-I dan V-P pada skenario kasus 5	38
Gambar 4.6 Kurva karakteristik V-I dan V-P pada skenario kasus 6	39
Gambar 4.7 Hasil Pelacakan (a) Tegangan (b) Daya MPPT pada Skenario Kasus 1	43
Gambar 4.8 Hasil Pelacakan (a) Tegangan (b) Daya MPPT pada Skenario Kasus 2	44

Gambar 4.9 Hasil Pelacakan (a) Tegangan (b) Daya MPPT pada Skenario Kasus 3	46
Gambar 4.10 Hasil Pelacakan (a) Tegangan (b) Daya MPPT pada Skenario Kasus 4.....	48
Gambar 4.11 Hasil Pelacakan (a) Tegangan (b) Daya MPPT pada Skenario Kasus 5.....	50
Gambar 4.12 Hasil Pelacakan (a) Tegangan (b) Daya MPPT pada Skenario Kasus 6.....	52

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Waktu Penelitian	21
Tabel 3.2 Spesifikasi modul PV Trina Solar 500Wp TSM-DE18M(II)	24
Tabel 3.3 Parameter Komponen <i>Boost Converter</i>	25
Tabel 3.4 Parameter Algoritma IC	27
Tabel 3.5 Parameter Algoritma PSO.....	29
Tabel 3.6 Parameter Algoritma FPA.....	31
Tabel 4.1 Hasil Perbandingan Pola Bayangan dari Berbagai Skenario Kasus	40
Tabel 4.2 Hasil Pelacakan Algoritma MPPT pada Skenario Kasus 1.....	43
Tabel 4.3 Hasil Pelacakan Algoritma MPPT pada Skenario Kasus 2.....	45
Tabel 4.4 Hasil Pelacakan Algoritma MPPT pada Skenario Kasus 3.....	47
Tabel 4.5 Hasil Pelacakan Algoritma MPPT pada Skenario Kasus 4.....	48
Tabel 4.6 Hasil Pelacakan Algoritma MPPT pada Skenario Kasus 5.....	50
Tabel 4.7 Hasil Pelacakan Algoritma MPPT pada Skenario Kasus 6.....	53
Tabel 4.8 Hasil Perbandingan Keseluruhan Pelacakan MPPT dalam Berbagai Skenario Kasus.....	54
Tabel 4.9 Hasil Efektifitas Algoritma dalam Pelacakan dari Berbagai Skenario Kasus	55

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Matahari memiliki peran penting dalam perkembangan kehidupan di bumi. Sebagai sumber energi terbarukan, matahari memberikan energi yang tidak pernah habis. Salah satu cara memanfaatkan energi matahari adalah melalui teknologi *Photovoltaic* (PV) yaitu dengan mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Teknologi PV memiliki berbagai keunggulan, seperti biaya perawatan yang rendah, ramah lingkungan, dan tanpa menggunakan bahan bakar.

Namun, tantangan utama dalam sistem PV adalah energi yang dikonversi tersebut seringkali rendah. Hal itu terjadi saat intensitas cahaya matahari rendah dan suhu permukaan PV berubah-ubah. Dalam situasi ini, terdapat titik di mana panel surya (PV) menghasilkan energi maksimal dengan efisiensi tertinggi, yang dikenal sebagai *Maximum Power Point* (MPP). Meskipun lokasi titik ini tidak diketahui secara pasti, teknologi algoritma pelacak MPP (*Maximum Power Point Tracking*/MPPT) memungkinkan kita untuk menemukan titik tersebut sehingga energi yang dihasilkan selalu optimal dalam kondisi apa pun [1][2].

Terdapat 2 kurva karakteristik utama pada modul surya yaitu arus terhadap tegangan (I-V) dan daya terhadap tegangan (P-V). Ketika intensitas cahaya matahari merata, kurva karakteristik ini hanya memiliki sebuah titik puncak. Dalam sistem PV, untuk menghasilkan daya yang optimal, beberapa modul PV dihubungkan secara seri untuk meningkatkan tegangan, dan secara paralel untuk meningkatkan arus. Pengaturan ini disesuaikan dengan kebutuhan. Beberapa modul PV yang terhubung secara seri disebut *string*. Tidak semua modul yang terhubung

dalam PV string menerima tingkat iradiasi yang sama, bahkan ada yang tertutup bayangan dari pepohonan, awan, atau benda lain akibat faktor alam atau rotasi bumi. Dalam keadaan tersebut, daya pada setiap modul PV menjadi tidak seimbang, menyebabkan penurunan daya total yang keluar dari PV *string* serta berdampak menghasilkan efek *hot spot* yang diakibatkan oleh bayangan parsial dapat merusak sel PV dan memengaruhi performa sistem PV secara keseluruhan [3].

Untuk itulah peran MPPT sangat penting dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya. MPPT awal dikembangkan menggunakan teknik konvensional, salah satunya metode *Incremental Conductance* (IC). *Incremental Conductance* (IC) adalah metode algoritma yang didasari dari konsep gradien kurva karakteristik P-V dari sel surya bila nilai MPP tersebut tercapai [4]. Algoritma metaheuristik sendiri merupakan algoritma yang disadari dari perilaku sekumpulan hewan untuk mencapai suatu tujuan yaitu mencari titik optimal dari suatu fungsi. Salah satunya yaitu *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Flower Pollination Algorithm* (FPA). *Particle Swarm Optimization* (PSO) adalah salah satu metode metaheuristik berbasis kumpulan yang sangat populer karena kesederhanaannya, fleksibel, dan memudahkan untuk diimplementasikan. Algoritma ini terinspirasi dari cara sekelompok burung dan ikan berkomunikasi dan berbagi informasi antar individu dalam suatu kelompok dalam mencari sumber makanan [5]. *Flower Pollination Algorithm* (FPA) adalah algoritma yang terinspirasi dari mekanisme penyerbukan bunga yang terjadi di alam pada sebuah tanaman buah atau bunga. Penyerbukan merupakan proses di mana serbuk sari dari satu bunga disalurkan ke bunga lain dari spesies yang sama atau berbeda [6]. Metode metaheuristic digunakan dalam implementasi supaya dapat mengatasi masalah pada PV yang menghasilkan kurva karakteristik V-P lebih dari 1 puncak.

Pada tugas akhir ini diusulkan studi komparatif algoritma menggunakan metode konvensional yaitu menggunakan metode IC dan 2 metode metaheuristik yaitu metode PSO dan FPA dalam PV dalam kondisi bayangan parsial. Performa metode yang akan dibandingkan adalah efisiensi dan waktu *tracking* pada masing-masing

metode. Pada penelitian ini diharapkan dapat mengatasi masalah yang diakibatkan oleh bayangan parsial permukaan PV *String* yang terhubung seri.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi kinerja algoritma MPPT pada PV *string* pada kondisi bayangan parsial dengan melakukan simulasi menggunakan MATLAB SIMULINK.
2. Mengevaluasi kinerja algoritma MPPT pada PV *string* dalam kondisi bayangan parsial dalam berbagai skenario berbeda.

1.3 Rumusan Masalah

Tujuan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana kinerja algoritma MPPT pada PV *string* pada kondisi bayangan parsial?
2. Algoritma apakah yang terbaik untuk MPPT pada PV *string* dalam kondisi bayangan parsial?

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Metode MPPT pada PV *string* pada kondisi bayangan parsial yang dibahas hanya algoritma IC, PSO dan FPA.
2. Jenis konfigurasi PV *String* pada penelitian ini yaitu disusun seri.
3. Data pelacakan simulasi yang digunakan pada kondisi *steady-state*.
4. Data kurva karakteristik daya-tegangan (P-V) dan arus-tegangan (I-V) dari PV *string* menggunakan MATLAB SIMULINK.

5. Tidak membahas secara detail mengenai komponen-komponen dalam pemodelan menggunakan MATLAB SIMULINK.
6. Simulasi algoritma menggunakan program MATLAB SIMULINK.
7. Penelitian tidak membahas bahan dari modul PV.
8. *Boost converter* yang disimulasikan dianggap ideal.
9. Simulasi dilakukan dengan standar STC (*Standard Test Condition*).

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat pada penelitian yaitu sebagai berikut:

1. Sebagai upaya dalam mencari solusi terbaik dalam mengatasi masalah permukaan PV *string* dalam kondisi bayangan parsial.
2. Menjadi referensi perbandingan metode yang terbaik dalam mengatasi masalah permukaan PV pada bayangan parsial.

1.6 Hipotesis

Pada studi komparatif algoritma MPPT dari ketiga algoritma yaitu IC, PSO dan FPA diharapkan mengidentifikasi kinerja dari masing-masing algoritma untuk mengatasi PV string dalam kondisi bayangan parsial. Hasil dari identifikasi kinerja algoritma MPPT diharapkan dapat mencari algoritma MPPT yang terbaik untuk mengatasi masalah bayangan parsial pada PV *String*.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam penelitian yang digunakan merupakan suatu gambaran sederhana dalam membahas detail tugas akhir dalam memberikan pemahaman materi dalam penelitian dapat dituliskan menjadi beberapa bab, adalah sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini menjabarkan latar belakang dari masalah yang diteliti, tujuan dari penelitian, rumusan masalah, batasan-batasan yang diterapkan, manfaat dari penelitian, hipotesis yang diajukan, serta struktur penulisan dari penelitian ini.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan teori-teori yang mendukung pemahaman dan relevan dengan materi penelitian, yang diambil dari berbagai sumber ilmiah seperti buku dan jurnal.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menguraikan metodologi yang digunakan dalam penelitian, mencakup waktu dan lokasi penelitian, alat dan bahan yang digunakan, serta metode dan diagram penelitian yang diterapkan dalam pengerjaan tugas akhir ini.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil penelitian dan menganalisis data yang diperoleh dari simulasi yang telah dilakukan pada penelitian tugas akhir ini.

BAB V. PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil analisis dan pembahasan, serta saran-saran yang dapat diberikan berdasarkan temuan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Berdasarkan topik penelitian yang bersumber dari beberapa referensi terkait. Referensi yang dimaksud berasal dari jurnal atau penelitian sebelumnya yang berkaitan. Adapun beberapa referensi pada penelitian diantaranya adalah penelitian oleh Farid Dwi Murdianto, Ainur Rofiq Nansur, dkk [7] yang berjudul “*Comparison Method of Flower Pollination Algorithm, Modified Particle Swarm Optimization, and Perturb & Observe in MPPT Coupled Inductor Sepic Converter on DC Microgrid Isolated System*”. Penelitian ini mengeksplorasi efektivitas tiga algoritma MPPT yang berbeda *Flower Pollination Algorithm (FPA)*, *Modified Particle Swarm Optimization (MPSO)*, dan *Perturb and Observe (P&O)* dalam konteks sistem mikrogrid DC yang terisolasi. Penerapan algoritma untuk mengoptimalkan daya yang dihasilkan *SEPIC converter* dengan induktor pada kondisi iradiasi yang berubah-ubah. Penelitian ini memodelkan sebuah modul PV dengan *sepic converter*.

Pada penelitian selanjutnya Prachi Makhija dan Fani Bhushan Sharma [8] dengan judul “*Performance Analysis of Solar MPPT techniques Under Partial Shading Condition*”. Penelitian ini melakukan perbandingan antara algoritma MPPT *Perturb and Observe (P&O)*, *Incremental Conductance (IC)* dan *Particle Swarm Optimization (PSO)* pada permukaan PV dengan kondisi parsial dan suhu pada PV yang berbeda. Pada penelitian ini memodelkan keempat modul PV yang dihubungkan dengan rangkaian seri dengan dua kondisi studi kasus.

Selanjutnya penelitian oleh Muhammad Rois Al Haqq, Imam Cholissodin, dkk [9] dengan judul “*Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada Panel Surya dalam*

Kondisi Berbayang Sebagian dengan *Particle Swarm Optimization* (PSO)”. Penelitian ini membahas tentang algoritma MPPT PSO pada permukaan PV pada kondisi parsial. Pada hasil penelitian, penelitian ini membandingkan algoritma MPPT PSO dengan P&O. Pada penelitian ini diimplementasikan 5 modul PV yang dihubungkan secara seri dengan 3 studi kasus.

Selanjutnya penelitian oleh Guntara Sukma Ragil Santoso, Epyk Sunarno, dkk [10] yang berjudul “Analisa Performa MPPT Algoritma *Flower Pollination Alghorithm* dan *Perthurb and Obserbve* Menggunakan *Zeta Converter*”. Penelitian ini mengaplikasikan dua algoritma MPPT yaitu P&O dan FPA yang berbeda untuk membandingkan kinerja dengan iradiasi yang berbeda. Pada penelitian ini memodelkan 4 panel surya dengan seri paralel dengan meggunakan *Zeta Converter*. Penelitian ini hanya membahas pada kondisi semua PV pada iradiasi yang sama dan berubah-ubah bukan pada kondisi panel surya bayangan parsial.

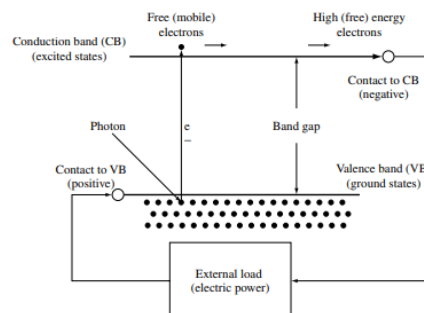
Selanjutnya penelitian oleh Mahbouba Brahmi, Chiheb Ben Regaya, dkk [11] dengan judul “*Comparative Study Of P&O and PSO Particle Swarm Optimization MPPT Controllers Under Partial Shading*”. Penelitian ini membahas tentang kedua algoritma MPPT PSO dan P&O pada permukaan PV dengan kondisi parsial. Pada penelitian ini mengimplementasikan simulasi SIMULINK dengan konfigurasi empat modul PV yang dihubungkan dengan seri dengan sebuah studi kasus.

2.2 Photovoltaic (PV)

Sel *Photovoltaic* (PV) adalah perangkat yang menghasilkan listrik arus searah dari bahan semikonduktor saat terkena sinar matahari. Selama bahan terkena sinar matahari maka sel tersebut akan menghasilkan energi listrik dan ketika tidak terkena sinar matahari, maka sel akan berhenti menghasilkan energi listrik [12].

2.2.1 Prinsip Kerja Sel PV

Sel fotovoltaik (PV) dibuat dari bahan semikonduktor yang mengandung elektron yang terikat secara lemah pada pita energi yang disebut pita valensi. Saat elektron di pita valensi menerima energi lebih besar dari ambang batas energi (band gap), ikatan elektron tersebut akan terputus. Elektron kemudian bergerak bebas di pita energi baru yang disebut pita konduksi. Elektron bebas ini dapat menghasilkan listrik. Energi yang diperlukan untuk melepaskan elektron ini berasal dari foton, partikel cahaya.



Gambar 2.1 Skema efek *photovoltaic*

Pada gambar 2.1, terlihat proses yang terjadi pada sel fotovoltaik (PV) saat terkena sinar matahari. Foton, yang merupakan partikel cahaya, mengenai elektron dalam pita valensi. Ketika energi foton melebihi ambang batas energi dari band gap, elektron tersebut akan keluar dari pita valensi (Valence Band/VB) dan melewati pita pemisah (band gap) menuju pita konduksi (Conduction Band/CB). Di pita konduksi, kontak selektif mengumpulkan elektron-elektron yang bebas dan menggerakkan mereka. Elektron-elektron bebas ini menghasilkan arus listrik [12].

2.2.2 Model Matematis PV

Persamaan eksponensial untuk memodelkan sel *photovoltaic* (PV) diturunkan dari hukum fisika untuk *pn junction* dan secara umum diterima sebagai representasi karakteristik PV pada sel PV ditunjukkan pada persamaan 2.1 berikut:

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \frac{q(V + I R_s)}{NKT} \right) - \left(\frac{V + I R_s}{R_{sh}} \right) \quad (2.1)$$

Dimana:

I_{ph} = Arus hubung singkat (A)

I_s = Arus saturasi balik diode (A)

q = Muatan elektron ($1,602 \times 10^{-19}$ C)

V = Tegangan diode (V)

K = Konstanta Boltzman ($1,381 \times 10^{-23}$ J/K)

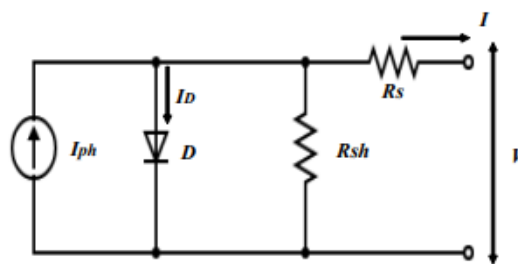
T = Suhu junction dalam Kelvin (K)

N = Faktor idealitas dari diode

R_s = Tahanan seri dari diode (Ω)

R_{sh} = Tahanan shunt dari diode (Ω)

Dari persamaan diatas rangkaian ekivalen PV ditentukan seperti pada gambar 2.2.

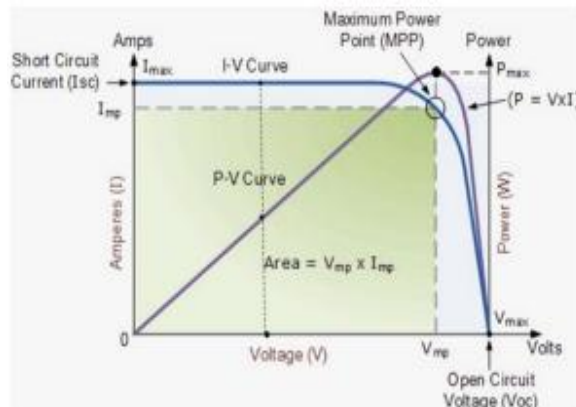


Gambar 2.2 Model rangkaian sel PV

Perilaku sel PV sepenuhnya dijelaskan oleh lima parameter model (I_{ph} , N , I_s , R_s , R_{sh}) yang mewakili karakteristik fisik sel/modul PV. Lima parameter ini dipengaruhi oleh dua faktor lingkungan utama, yaitu suhu dan radiasi matahari [12].

2.2.3 Kurva karakteritik Modul PV

Sel surya memiliki kurva karakteristik yang menggambarkan hubungan antara tegangan dan arus keluaran (kurva V-I) serta hubungan antara tegangan dan daya keluaran sel surya (kurva V-P). Kurva akan ditunjukkan pada gambar 2.3:



Gambar 2.3 Kurva karakteristik Arus-Tegangan dan kurva karakteristik Daya-Tegangan

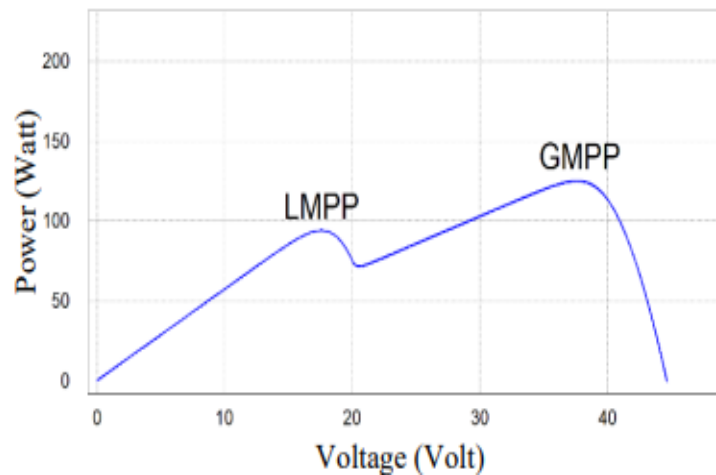
Ketika keluaran sel surya tidak terhubung dengan beban (*open circuit*), tidak ada arus yang mengalir, sehingga tegangan pada sel mencapai nilai maksimum, yang dikenal sebagai tegangan *open circuit* (V_{oc}). Sebaliknya, ketika keluaran sel surya dihubungkan singkat (*short circuit*), arus mencapai nilai maksimum yang disebut arus *short circuit* (I_{sc}). Selain itu, ada nilai daya maksimum (P_{mp}) yang dapat dihasilkan pada tegangan maksimum (V_{mp}) dan arus maksimum (I_{mp}). Titik di mana arus dan tegangan menghasilkan daya terbesar disebut *Maximum Power Point* (MPP).

Arus yang dihasilkan oleh modul surya menentukan daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh perangkat yang memanfaatkan modul tersebut. Perubahan dalam irradiansi, suhu, dan konfigurasi sel surya (baik disusun secara seri maupun paralel) memengaruhi parameter utama sel surya, yaitu arus, tegangan, dan daya keluaran. Karakteristik kurva hubungan antara arus dan tegangan (kurva I-V) serta daya dan tegangan (kurva P-V) dianalisis berdasarkan variasi irradiansi, suhu, dan susunan sel surya dalam modul [13].

2.2.4 Karakteristik PV dalam kondisi bayangan parsial

Bayangan parsial memiliki dampak negatif pada kinerja keseluruhan panel surya dan dapat menyebabkan kerusakan pada panel. Saat sisi sel terkena naungan, suhu

dapat meningkat dan menyebabkan munculnya *hotspot*. Panel surya dilengkapi dengan dioda bypass bertujuan untuk mencegah kerusakan akibat fenomena tersebut. Namun, pemasangan dioda bypass dapat memengaruhi kurva karakteristik I-V dan P-V pada modul. Dampak dari dioda bypass menyebabkan lebih dari satu puncak muncul pada kurva karakteristik P-V ketika kondisi naungan parsial terjadi [14]. Kondisi tersebut juga dapat menghasilkan puncak lokal dalam kedua titik daya maksimum, yakni puncak tertinggi disebut *global maximum power point* (GMPP) dan puncak terendah disebut *local maximum power point* (LMPP) selama fase naungan parsial [15]. Kondisi tersebut akan ditampilkan pada gambar 2.4 sebagai berikut:

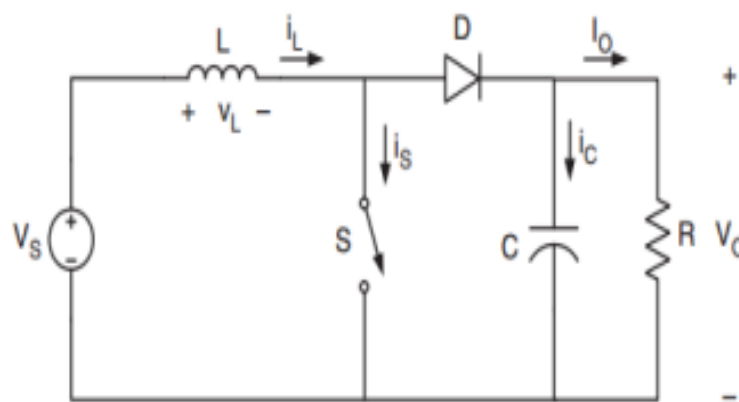


Gambar 2.4 Kurva Karakteristik P-V kondisi bayangan parsial

2.3 *Boost Converter*

Konverter ini merupakan perangkat konversi listrik arus searah yang dirancang untuk menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan input yang diterimanya. Fungsi utama konverter ini adalah untuk menaikkan tegangan sehingga sering disebut sebagai konverter penaik tegangan. Pada Gambar 2.5, kita dapat melihat susunan komponen utama yang membentuk konverter ini. Komponen tersebut meliputi MOSFET (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) yang berperan sebagai saklar elektronik untuk

mengendalikan aliran arus. Selain itu, ada juga dioda yang memungkinkan aliran arus dalam satu arah saja dan membantu dalam proses pemulihan energi ke sirkuit. Komponen induktor yang berfungsi untuk menyimpan energi dalam bentuk medan magnet, memainkan peran penting dalam proses peningkatan tegangan. Terakhir, kapasitor digunakan untuk menyimpan dan melepaskan energi secara cepat, membantu menstabilkan tegangan keluaran. Kombinasi dari komponen-komponen ini memungkinkan konverter penaik tegangan untuk mengubah tegangan input yang lebih rendah menjadi tegangan keluaran yang lebih tinggi secara efisien.



Gambar 2.5 Rangkaian *Boost Converter*

Dalam skema yang ditampilkan pada Gambar 2.5, ketika saklar atau *switch* dalam keadaan tertutup (selama waktu T_{on}), arus mengalir melalui induktor dan menyimpan energi di dalamnya. Ketika saklar MOSFET dalam posisi terbuka (selama waktu T_{off}), arus dari induktor kemudian mengalir ke beban melalui dioda, yang menyebabkan energi dalam induktor mengalir ke beban. Selama fase T_{off} ini, beban menerima daya baik dari tegangan sumber maupun dari tegangan yang dilepaskan oleh induktor. Hal ini menyebabkan tegangan keluaran menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan masukan. Perbandingan antara tegangan keluaran dan tegangan masukan berbanding lurus dengan rasio antara durasi saklar tertutup dan durasi saklar terbuka [16][17]. Dari gambar 2.5 didapatkan persamaan 2.2 sebagai berikut:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{D}{1 - D} \quad (2.2)$$

Dimana:

V_0 = Tegangan masukan

V_s = Tegangan keluaran

D = *Duty cycle*

Persamaan 2.3 untuk mencari nilai kapasitansi minimal yaitu:

$$C_{min} = \frac{V_0 \times D}{R \times \Delta V_0 \times f} \quad (2.3)$$

Dimana:

C_{min} = Nilai kapasitansi minimal

f = Frekuensi *switching*

D = *Duty cycle*

ΔV_0 = Nilai toleransi tegangan *ripple*

Persamaan 2.4 untuk mencari nilai induktansi minimal yaitu:

$$L_{min} = \frac{D (1 - D)^2}{2 \times f} \times R \quad (2.4)$$

Dimana:

L_{min} = Nilai induktor minimal

D = *Duty cycle*

f = Frekuensi *switching*

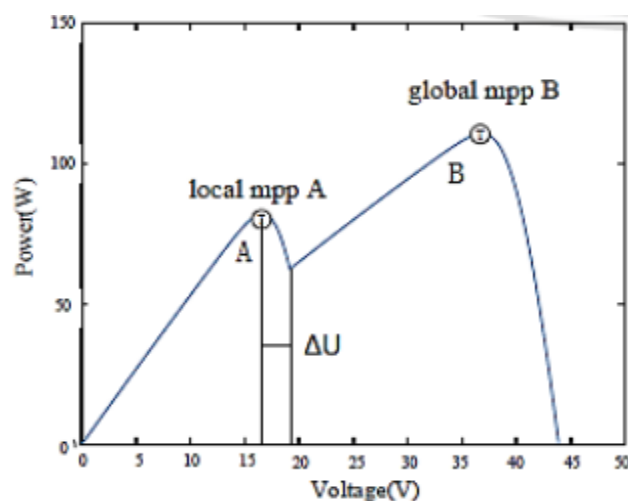
R = Kapasitansi

2.4 *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*

Modul PV umumnya tidak dapat secara otomatis beroperasi pada titik kerja maksimum tanpa kendali. *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* adalah metode yang dipakai dalam menemukan titik kerja maksimal pada PV dan mempertahankan operasinya pada titik MPP.

MPPT sering dikatakan sistem pergerakan pelacakan yang mengubah posisi modul terhadap matahari untuk mendapatkan energi maksimal. Melainkan, MPPT adalah sistem elektronik yang mengandung algoritma untuk menelusuri dan menjaga daya maksimal yang bisa dihasilkan oleh PV. Oleh karena itu, MPPT juga dikenal sebagai sistem pelacak elektrik [3].

Pada awalnya, penelitian MPPT yang populer menggunakan metode konvensional seperti *Perturb and Observe* (P&O), *Hill Climbing* (HC), dan *Incremental Conductance* (IC). Namun, metode konvensional ini sering kurang efektif karena kesulitan dalam membedakan antara puncak lokal dan puncak global. Berikut merupakan *local peak* dan *global peak* untuk pemodelan 2 modul PV dalam rangkaian seri dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Karakteristik P-V dari sistem PV yang mempunyai *dual-peak*

Saat ini, banyak penelitian mengembangkan metode MPPT menggunakan algoritma metaheuristik. Salah satu yang dipertimbangkan adalah *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Flower Pollination Algorithm* (FPA), yang akan diimplementasikan dalam skripsi ini. Algoritma metaheuristik telah terbukti efektif dalam mendeteksi puncak global pada kurva P-V yang memiliki banyak puncak.

2.4.1 Incremental Conductance

Incremental Conductance adalah salah satu algoritma yang dikembangkan untuk mengoptimalkan kinerja sistem *Photovoltaic* (PV) atau sel surya dalam penentuan titik daya maksimum *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Algoritma ini didasarkan pada prinsip analisis gradien atau kemiringan dari kurva karakteristik antara daya dan tegangan (P-V) yang dihasilkan oleh sel surya [4]. Titik operasi optimal dari sel surya, yang dikenal sebagai V_{MPP} (*Voltage at Maximum Power Point*) dan I_{MPP} (*Current at Maximum Power Point*), bervariasi tergantung pada kondisi lingkungan seperti intensitas cahaya dan suhu. Algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) digunakan untuk menyesuaikan tegangan referensi (V_{ref}) sehingga sel surya dapat beroperasi pada titik operasi maksimalnya. Pada gambar 2.7 yang menggambarkan hubungan antara daya (P) dan tegangan (V) pada sel surya dimana daya mencapai maksimum pada titik gradien atau kemiringan kurva terhadap tegangan adalah nol [18]. Hal dapat dituliskan dalam persamaan 2.5 sebagai berikut:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (2.5)$$

Dimana:

dP = Perubahan daya

dV = Perubahan tegangan

Karena $P = V \cdot I$, maka persamaan diatas dapat dijabarkan kembali menjadi persamaan-persamaan sebagai berikut :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} \quad (2.6)$$

$$I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2.8)$$

Dimana:

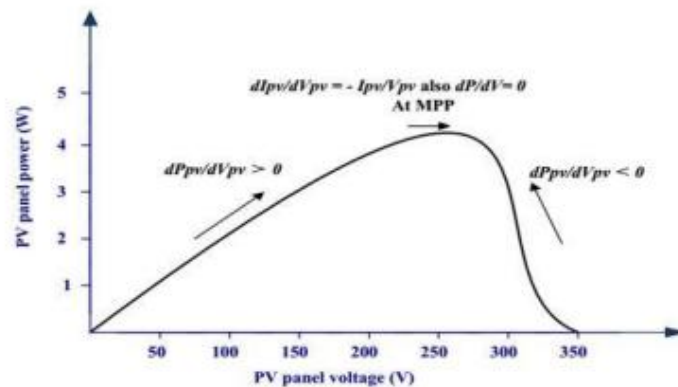
dI = Perubahan arus

dV = Perubahan tegangan

I = Arus

V = Tegangan

Sehingga dari persamaan-persamaan tersebut dapat menghasilkan kurva kinerja seperti gambar berikut:



Gambar 2.7 Kurva Kinerja MPPT *Incremental Conductance*

Prinsip dasar dari metode *Incremental Conductance* (IC) didasarkan pada karakteristik kurva daya terhadap tegangan dari sel surya. Pada kurva tersebut, gradien atau kemiringan daya panel surya mencapai nilai nol di titik daya maksimum (MPP). Ketika berada di sebelah kanan titik MPP maka kemiringan kurva menurun dan sebaliknya jika di sebelah kiri MPP, kemiringan kurva meningkat.

Dalam metode IC, perubahan tegangan referensi (V_{ref}) yang diterapkan bersifat konstan. Besarnya perubahan V_{ref} ini harus dipertimbangkan dengan cermat, karena berpengaruh pada waktu yang dibutuhkan untuk mencapai daya maksimum serta stabilitas di sekitar titik maksimum. Kedua faktor ini memiliki hubungan terbalik. Peningkatan besar dalam perubahan V_{ref} dapat mempercepat proses pencapaian MPP tetapi dapat juga menyebabkan sistem berosilasi di sekitar titik maksimum, sehingga sulit untuk menetapkan nilai yang tepat. Oleh karena itu, adaptasi terbaru dari algoritma IC sering kali melibatkan perubahan nilai V_{ref} secara dinamis untuk mengoptimalkan keseimbangan antara kecepatan pelacakan dan stabilitas di sekitar MPP.

2.4.2 Particle Swarm Optimization

Particle Swarm Optimization (PSO) adalah sebuah metode pengomptimalan yang ditemukan Kennedy dan Eberhart pada tahun 1995. Algoritma ini memanfaatkan prinsip-prinsip kecerdasan kolektif dan termasuk dalam kategori komputasi evolusioner. Kennedy dan Eberhart mengembangkan PSO dengan mengamati dan meniru cara burung berkoordinasi saat mencari makanan dalam kawanan. Mereka menggunakan wawasan ini untuk menciptakan sebuah algoritma yang mampu memecahkan berbagai masalah pencarian dan optimasi dengan meniru pola perilaku kolaboratif tersebut [5].

Dalam konteks PSO, setiap elemen dalam algoritma diibaratkan sebagai burung yang disebut partikel yang bergerak dalam sebuah ruang pencarian. Setiap partikel ini dilengkapi dengan dua jenis memori yaitu P_{best} dan G_{best} . P_{best} adalah catatan posisi terbaik yang pernah dicapai oleh partikel tersebut, sementara G_{best} adalah posisi terbaik yang pernah dicapai oleh seluruh kawanan atau grup partikel. Kedua nilai ini berperan penting dalam menentukan arah dan seberapa jauh setiap partikel akan bergerak dalam ruang pencarian tersebut.

Partikel-partikel ini menjelajahi ruang pencarian multidimensional dan secara dinamis menyesuaikan posisi mereka berdasarkan pengalaman mereka sendiri (dikenali melalui P_{best}) dan pengalaman dari partikel-partikel lain di sekitarnya (ditunjukkan oleh G_{best}). Melalui proses ini, PSO secara efektif menggabungkan pendekatan pencarian, dimana partikel memanfaatkan pengetahuan dari posisi terbaik mereka sendiri, dan pencarian global, dimana mereka juga mempertimbangkan pengetahuan yang diperoleh dari seluruh populasi partikel. Hal tersebut memungkinkan PSO untuk mencari solusi optimal dengan efisiensi yang lebih tinggi [1]. Berikut merupakan persamaan 2.9 dari kecepatan partikel diperbaharui sebagai berikut:

$$V_i^{j+1} = W \times V_i^j + C_1 \times rand1(\cdot) \times (P_{best,i} - P_i^j) + C_2 \times rand2(\cdot) \times (G_{best} - P_i^j) \quad (2.9)$$

Dimana:

C_1 = *Cognition-only learning factor*

C_2 = *Social-only learning factor*

W = Bobot inersia

V_i^j = Variabel kecepatan pergerakan partikel ke- i selama iterasi ke- j

P_i^j = Variabel posisi partikel ke- i selama iterasi ke- j

$rand1(\cdot)$ = Variabel nilai antara 0 dan 1 dari generator bilangan acak pertama

$rand2(\cdot)$ = Variabel nilai antara 0 dan 1 dari generator bilangan acak kedua

$P_{best,i}$ = Menunjukkan posisi terbaik dari partikel ke- i .

G_{best} = Menunjukkan posisi terbaik untuk semua partikel

Persamaan 2.10 untuk mencari posisi partikel yang diperbaharui sebagai berikut:

$$P_i^{j+1} = V_i^{j+1} + P_i^j \quad (2.10)$$

Dimana:

P_i^{j+1} = Variabel posisi partikel diperbaharui ke- i selama iterasi ke- j

V_i^{j+1} = Variabel kecepatan partikel diperbaharui ke- i selama iterasi ke- j

P_i^j = Variabel posisi partikel ke- i selama iterasi ke- j

2.4.3 Flower Pollination Algorithm

Flower Pollination Algorithm (FPA) adalah algoritma ditemukan sejak tahun 2012, yang terinspirasi dari mekanisme penyerbukan bunga alami yang terjadi di alam. Penyerbukan merupakan proses di mana serbuk sari dari satu bunga disalurkan ke bunga lain dari spesies yang sama atau berbeda [19]. Secara umum, penyerbukan dapat dibagi menjadi dua jenis utama: penyerbukan abiotik dan penyerbukan biotik. Penyerbukan abiotik adalah proses di mana penyerbukan terjadi pada tanaman atau spesies yang sama tanpa keterlibatan makhluk hidup lain. Sedangkan, penyerbukan biotik (penyerbukan silang) melibatkan tanaman atau spesies yang berbeda dengan bantuan makhluk hidup seperti lebah, burung, dan kelelawar sebagai agen penyerbukan. Diketahui bahwa sekitar 90% proses penyerbukan adalah

penyerbukan silang, sementara hanya sekitar 10% merupakan penyerbukan sendiri. Pengaturan penyerbukan sendiri dan penyerbukan silang dibatasi oleh probabilitas switch p yang berada dalam rentang $[0,1]$. Dalam penerapan Algoritma Penyerbukan Bunga (FPA), terdapat aturan-aturan tertentu yang harus diikuti [20][21].

Penyerbukan biotik atau dikenal juga sebagai penyerbukan silang adalah proses penyerbukan yang melibatkan perpindahan serbuk sari secara global. Dalam proses ini, perpindahan serbuk sari mengikuti pola penerbangan *Levy* (*Levy flight*), yang bertindak sebagai mekanisme utama dalam penyebaran serbuk sari. *Levy flight* berperan sebagai agen pembawa yang memfasilitasi distribusi serbuk sari dalam penyerbukan [10]. Proses penyerbukan silang ini dapat dijelaskan melalui persamaan 2.11:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + L + (gbest - x_i^k) \quad (2.11)$$

Dimana:

x_i^{k+1} = Posisi solusi yang diperbaharui i pada iterasi k

x_i^k = Posisi solusi i pada iterasi k

G_{best} = Solusi terbaik dari serbuk sari (x_i^k)

L = *Levy factor*

Faktor L atau *Levy factor* memainkan peran penting dalam perpindahan serbuk sari selama proses penyerbukan silang. Karena *Levy factor* mempengaruhi bagaimana serbuk sari berpindah, aliran perpindahan serbuk sari melalui mekanisme *Levy factor* dapat diwakili oleh persamaan 2.12 sebagai berikut:

$$L = \frac{\lambda \Gamma(\lambda) \sin\left(\frac{\pi\lambda}{2}\right)}{\pi} \frac{1}{S^{1+\lambda}} (S \gg S^0 > 0) \quad (2.12)$$

Dimana:

L = *Levy factor*

$\Gamma(\lambda)$ = Standar fungsi gamma berlaku untuk lebih besar dari ($S \gg S^0 > 0$)

λ = Nilai lambda yang berdasarkan konvergensi sebesar 1,5

Penyerbukan abiotik atau yang sering disebut sebagai penyerbukan sendiri adalah suatu mekanisme alami dimana tanaman berbunga melakukan proses penyerbukan secara mandiri. Proses ini terjadi secara lokal di dalam tanaman yang sama, tanpa melibatkan perantara eksternal seperti serangga atau angin untuk memindahkan serbuk sari antara bunga-bunga yang berbeda [19]. Persamaan 2.13 dari karakteristik penyerbukan ini dinyatakan sebagai:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + \varepsilon(x_m^k - x_j^k) \quad (2.13)$$

Dimana:

x_j^k dan x_m^k = Posisi solusi acak a dan b dari populasi pada iterasi k

ε = Representasi pencarian lokal ($\varepsilon \in (0,1)$)

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu dan tempat penelitian dilaksanakan sejak bulan Juli 2024 hingga November 2024 bertempat di Laboratorium Sistem Tenaga Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Berikut merupakan tabel waktu penelitian:

Tabel 3.1 Waktu Penelitian

No.	Kegiatan	Bulan					
		Jul	Agust	Sept	Okt	Nov	Des
1	Studi Literatur						
2	Seminar Proposal						
3	Membuat Pemodelan Simulasi untuk MPPT						
4	Penulisan Laporan, Analisis dan Pembahasan						
5	Seminar Hasil						
6	Perbaikan Laporan						
7	Komprehensif						

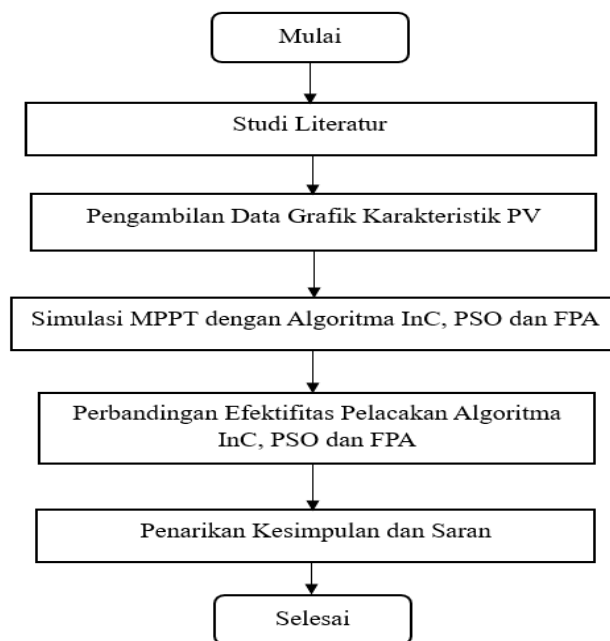
3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Laptop Acer Nitro AN515-45
2. *Software* Matlab 2021a
3. *Datasheet* Spesifikasi PV Trina Solar 500Wp TSM-DE18M(II)

3.3 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir penelitian pada penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.3.1 Studi Literatur

Studi literatur mencakup proses mengambil dan mengumpulkan materi yang digunakan sebagai landasan dalam penelitian. Ini melibatkan teori-teori yang

mendukung topik *Photovoltaic* (PV), *boost converter*, MPPT, algoritma metaheuristik, serta bahasa pemrograman yang digunakan untuk analisis metode ini. Sumber acuan untuk studi literatur menggunakan referensi dari buku, jurnal, *application note*, dan internet.

3.3.2 Pengambilan Data Kurva Karakteristik

Panel surya yang digunakan terdiri dari 5 modul yang disusun secara seri. Penggunaan 5 modul bertujuan untuk mendapatkan kurva yang memiliki nilai maksimum 5 puncak. Pemodelan juga dapat melihat dampak yang diakibatkan output daya PV string yang terkena bayangan parsial. Dari hasil pemodelan didapatkan skenario untuk menguji algoritma MPPT dalam melacak titik MPP pada hasil pemodelan PV string yang kompleks. Dampak yang diakibatkan oleh bayangan parsial akan mempengaruhi *performance ratio* yang dapat dihitung berdasarkan persamaan sebagai berikut [22]:

$$PR = \frac{E_{ac}}{E_{ideal}} \times 100\% \quad (2.14)$$

Dimana:

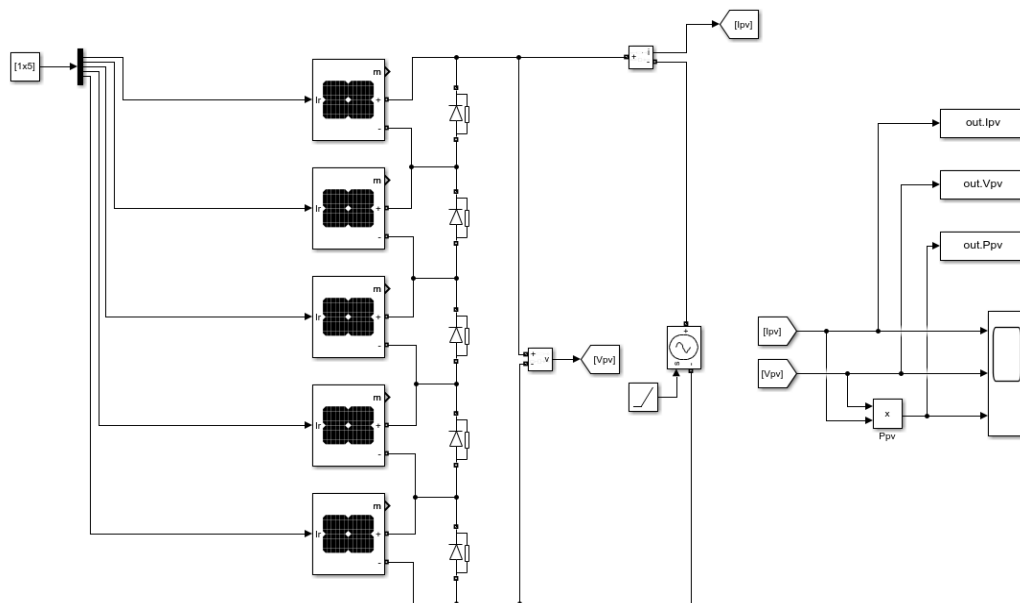
E_{ac} = Energi aktual yang dihasilkan oleh sistem PV.

E_{ideal} = Energi yang dihasilkan oleh sistem PV dalam kondisi ideal.

Pemodelan menggunakan MATLAB SIMULINK, yang kemudian disimulasikan pada berbagai skenario bayangan parsial untuk memperoleh kurva karakteristik P-V dengan letak MPP (*Maximum Power Point*) yang berbeda untuk membentuk nilai maksimum 5 puncak. Berikut tabel spesifikasi modul PV Trina Solar 500Wp TSM-DE18M(II) dan gambar pemodelan pengambilan data untuk penelitian dibawah ini:

Tabel 3.2 Spesifikasi modul PV Trina Solar 500Wp TSM-DE18M(II)

Parameter	Value
Maximum Power (P_{Max})	500 Wp
Maximum Voltage (V_{MPP})	42,8 V
Maximum Current (I_{MPP})	11,69 A
Open Circuit Voltage (V_{OC})	51,7 V
Short Circuit Current (I_{SC})	12,28 A
Temperature coefficient of V_{OC}	-0,25%/°C
Temperature coefficient of I_{SC}	0,04%/°C



Gambar 3.2 Pemodelan pengambilan data kurva karakteristik

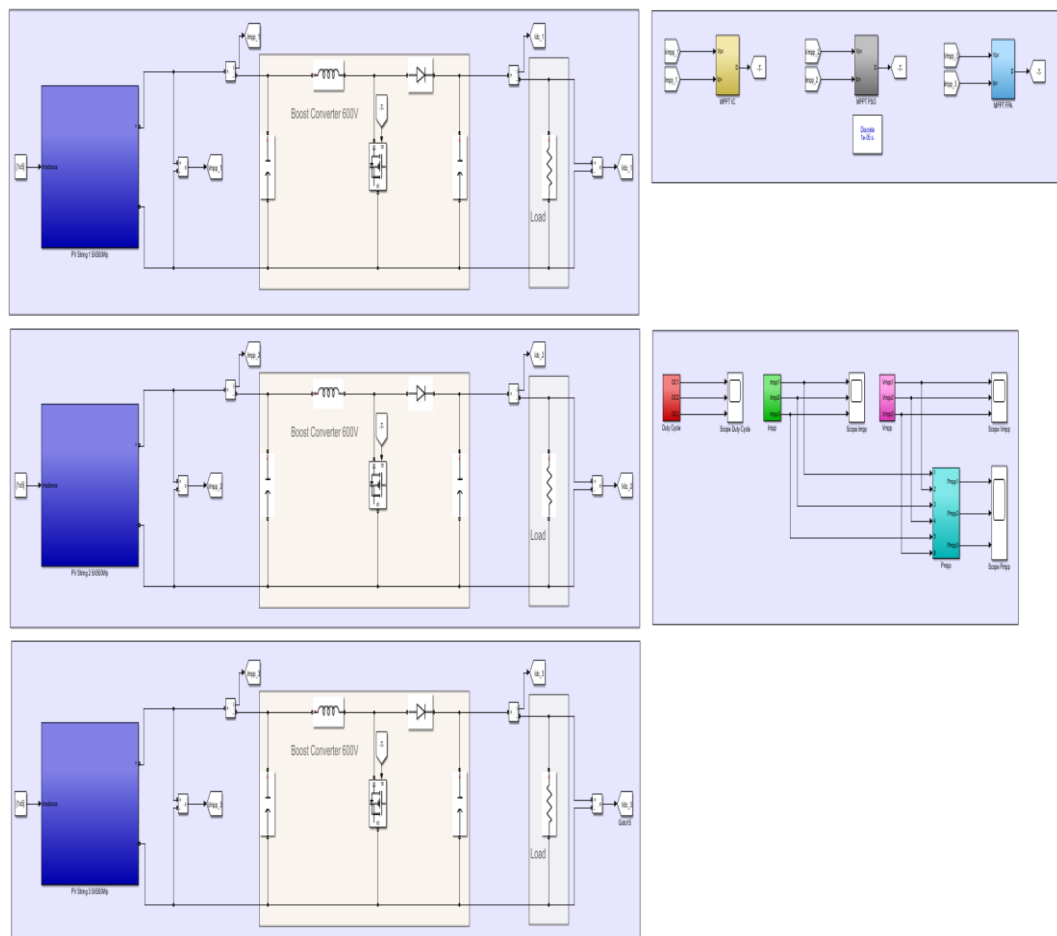
3.3.3 Simulasi MPPT dengan Algoritma IC, PSO dan FPA

Setelah variasi kurva telah disimulasikan, MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) akan melacak MPP (*Maximum Power Point*) dengan menggunakan metode Algoritma *Incremental Conductance* (IC), Particle Swarm Optimization (PSO) dan *Flower Pollination Algorithm* (FPA). Pelacakan akan disimulasikan dengan program MATLAB SIMULINK.

Tujuan dari MPPT ini akan memperoleh nilai keluaran *duty cycle* yang akan diteruskan ke *Boost Converter* yang akan mengontrol tegangan keluaran dari panel surya. Berikut merupakan tabel parameter nilai komponen *boost converter* dan Blok diagram pada sistem akan ditunjukkan dibawah ini:

Tabel 3.3 Parameter Komponen *Boost Converter*

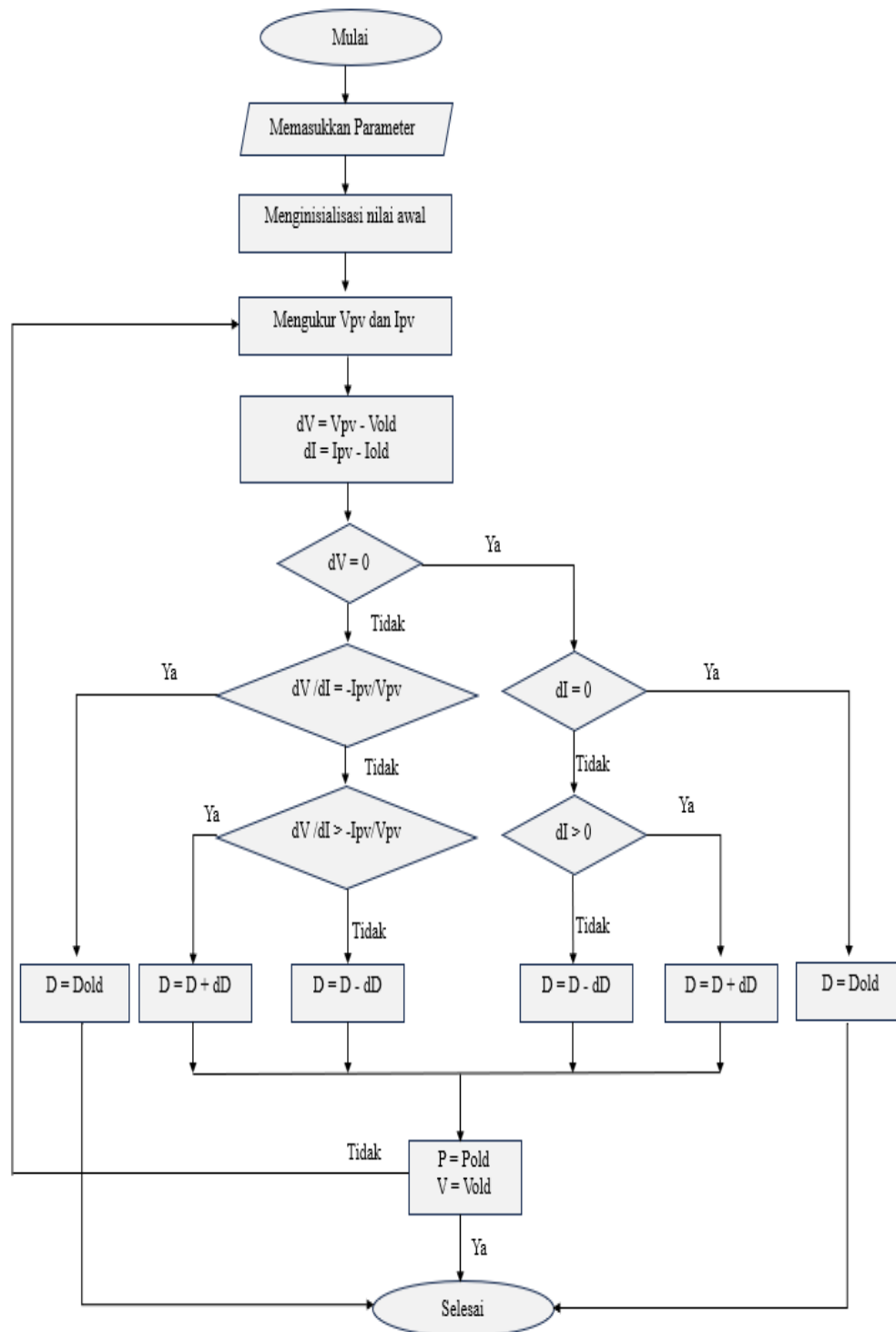
Parameter	Value
C1	$90\mu F$
C2	$90\mu F$
L	1.2 mH
F	5 kHz
R	$144\ \Omega$



Gambar 3.3 Blok Diagram Sistem

3.3.3.1 MPPT dengan Metode IC

Berikut merupakan gambar diagram alir MPPT dengan metode IC sebagai berikut:



Gambar 3.4 Diagram Alir MPPT dengan Metode IC

Pada gambar 3.4 menjelaskan proses dimulai dengan memasukkan parameter-parameter awal yang dibutuhkan. Berikut merupakan parameter awal pada algoritma IC:

Tabel 3.4 Parameter Algoritma IC

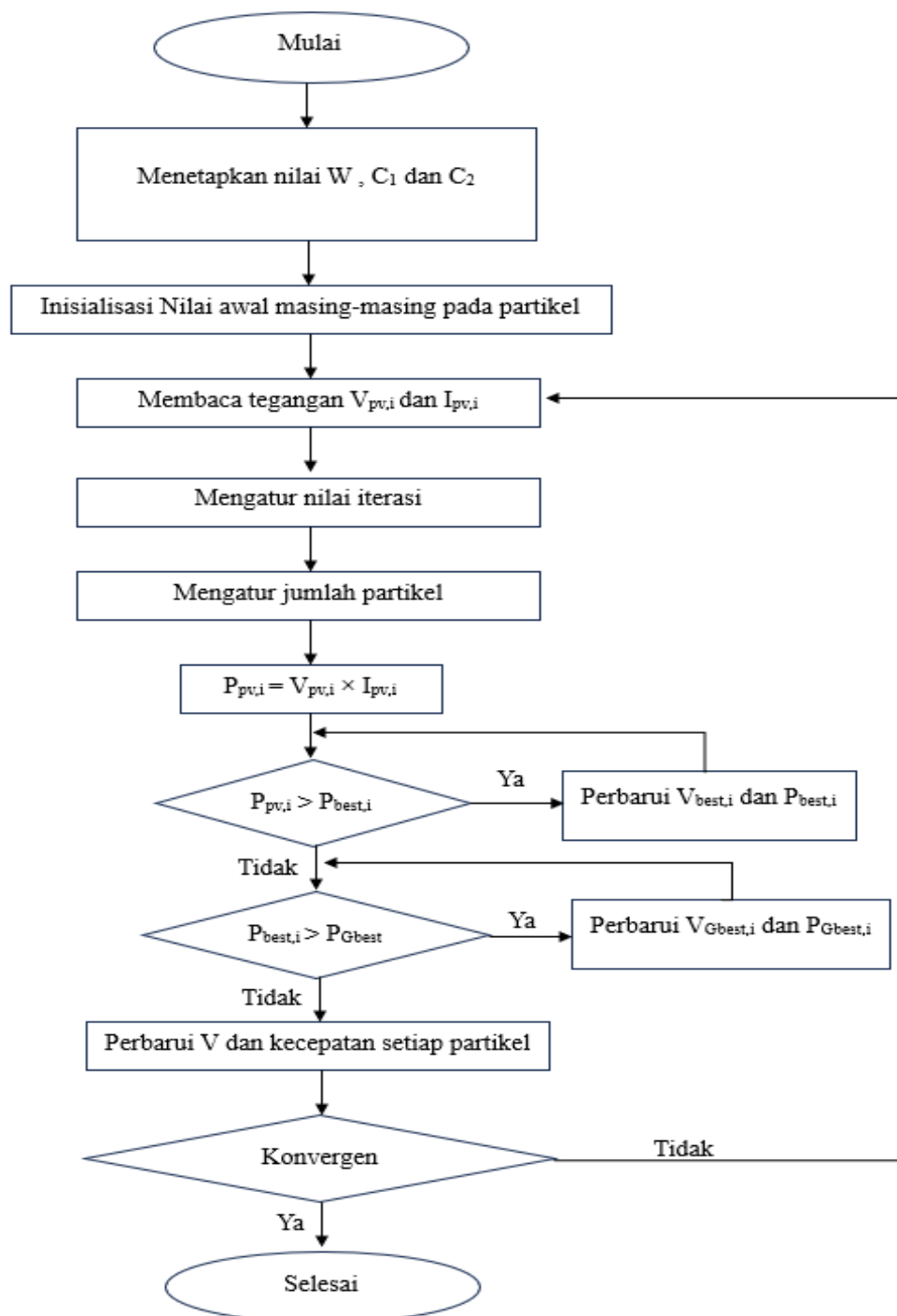
Parameter	Nilai
<i>Initial Duty Cycle</i>	0,7
<i>Maximum Duty Cycle (D_{Max})</i>	1
<i>Minimum Duty Cycle (D_{Min})</i>	0
ΔD	0,001

Selanjutnya menginisialisasi nilai-nilai awal untuk variabel-variabel yang akan digunakan dalam perhitungan. Setelah itu, tegangan (V_{pv}) dan arus (I_{pv}) dari panel surya diukur. Perubahan tegangan dan arus dihitung dengan rumus $dV = V_{PV} - V_{old}$ dan $dI = I_{PV} - I_{old}$. Selanjutnya, terdapat beberapa cabang keputusan. Jika $dV = 0$, maka jika $dI = 0$, nilai duty cycle (D) tetap sama. Jika $dI > 0$, nilai D dikurangi $D = D - \Delta D$. Jika $dI < 0$, nilai D ditambah $D = D + \Delta D$. Jika $dV \neq 0$, maka nilai dV/dI dibandingkan dengan $-I_{PV}/V_{PV}$. Jika sama, kemudian jika $dV > 0$, nilai D ditambah $D = D + \Delta D$, dan jika $dV < 0$, nilai D dikurangi $D = D - \Delta D$. Jika $dV/dI \neq -I_{PV}/V_{PV}$, maka jika $dV/dI < -I_{PV}/V_{PV}$, nilai D dikurangi $D = D - \Delta D$, dan jika $dV/dI > -I_{PV}/V_{PV}$, nilai D ditambah $D = D + \Delta D$.

Setelah itu, nilai-nilai lama diperbarui dengan $P = P_{old}$ dan $V = V_{old}$. Proses selesai setelah semua langkah ini dilakukan. Setiap langkah dalam diagram ini bertujuan untuk menyesuaikan nilai *duty cycle* (D) guna mengoptimalkan daya yang diperoleh dari panel surya, dengan menggunakan metode pengukuran tegangan dan arus, sehingga sistem dapat secara otomatis mencapai titik daya maksimum (MPP).

3.3.3.2 MPPT dengan Metode PSO

Berikut merupakan gambar diagram alir MPPT dengan metode PSO sebagai berikut:



Gambar 3.5 Diagram Alir MPPT dengan Metode PSO

Pada gambar 3.5 menjelaskan proses dari algoritma optimisasi *Particle Swarm Optimization* (PSO). Langkah pertama adalah menetapkan nilai parameter-parameter penting seperti W (faktor inersia), C_1 (*Cognition-only learning factor*), dan C_2 (*Social-only learning factor*). Nilai-nilai tersebut akan mempengaruhi perilaku partikel dalam pencarian solusi. Selanjutnya, dilakukan inisialisasi nilai awal posisi dan kecepatan untuk setiap partikel dalam swarm. Algoritma kemudian membaca nilai $V_{PV,i}$ dan arus $I_{PV,i}$ dari setiap partikel. Setelah itu, algoritma mengatur nilai iterasi dan jumlah partikel yang akan digunakan dalam proses pencarian. Berikut merupakan parameter untuk algoritma PSO:

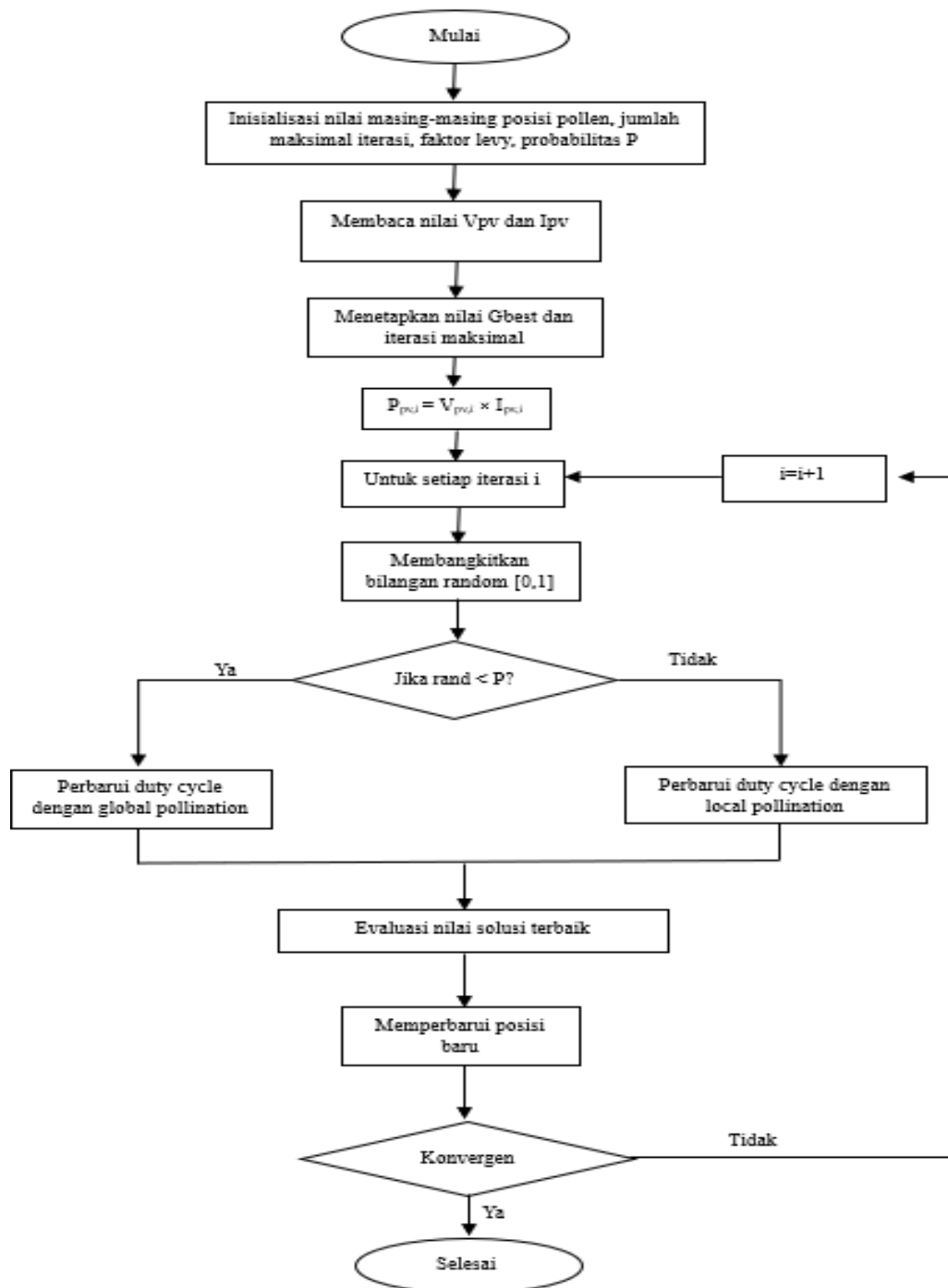
Tabel 3.5 Parameter Algoritma PSO

Parameter	Nilai
Jumlah Partikel	5
Jumlah Iterasi	500
Faktor Inersia	0,5
<i>Cognition-only learning factor</i> (C_1)	1,4
<i>Social-only learning factor</i> (C_2)	1

Setiap partikel kemudian menghitung daya $P_{PV,i}$ berdasarkan tegangan dan arus. Daya yang dihasilkan kemudian dibandingkan dengan daya terbaik partikel sebelumnya $P_{Best,i}$. Jika daya partikel saat ini lebih besar, maka posisi dan daya terbaik partikel diperbarui. Setelah itu, daya terbaik partikel $P_{Best,i}$ dibandingkan dengan daya global terbaik P_{GBest} . Jika daya terbaik partikel lebih besar, maka posisi global terbaik dan daya global terbaik diperbarui. Jika tidak, algoritma melanjutkan ke langkah berikutnya yaitu memperbarui kecepatan dan posisi partikel menggunakan persamaan 2.9 dan 2.10. Langkah terakhir adalah mengecek apakah hasil yang diperoleh sudah konvergen. Jika hasil sudah konvergen, maka algoritma selesai. Jika belum, proses kembali ke langkah membaca tegangan dan arus, dan iterasi berlanjut hingga solusi optimal ditemukan. Akhirnya, setelah semua langkah dilalui dan solusi optimal ditemukan, algoritma mencapai tahap "Selesai".

3.3.3.3 MPPT dengan Metode FPA

Berikut merupakan gambar diagram alir MPPT dengan metode FPA sebagai berikut:



Gambar 3.6 Diagram Alir MPPT dengan Metode FPA

Pada gambar 3.6 menjelaskan Flowchart ini menggambarkan proses dari algoritma optimisasi *Flower Pollination Algorithm* (FPA) yang digunakan untuk mencari nilai optimal. Langkah pertama adalah inisialisasi nilai masing-masing posisi pollen, jumlah iterasi maksimal, faktor *Levy*, dan probabilitas P. Berikut merupakan parameter algoritma FPA:

Tabel 3.6 Parameter Algoritma FPA

Parameter	Nilai
Jumlah serbuk sari	5
Probabilitas P	0.8
Faktor <i>Levy</i> (<i>Lambda</i>)	1,5
Jumlah iterasi	500

Setelah inisialisasi, algoritma membaca nilai tegangan V_{pv} dan arus I_{pv} . Kemudian, menetapkan nilai G_{best} (solusi terbaik global) dan iterasi maksimal. Daya P_{pv} dihitung dengan rumus $P_{pv} = V_{pv} \times I_{pv}$. Untuk setiap iterasi i , algoritma membangkitkan bilangan random antara $[0,1]$. Jika bilangan random yang dibangkitkan lebih kecil dari probabilitas P, algoritma memperbarui duty cycle dengan menggunakan *global pollination*. Jika tidak, algoritma memperbarui *duty cycle* dengan menggunakan *local pollination*. Setelah pembaruan, algoritma mengevaluasi nilai solusi terbaik. Proses selanjutnya adalah memperbarui posisi baru berdasarkan evaluasi solusi. Algoritma kemudian mengecek apakah hasil sudah konvergen. Jika hasil sudah konvergen, algoritma selesai. Jika belum, iterasi berlanjut dengan kembali ke langkah membangkitkan bilangan random hingga solusi optimal ditemukan. Akhirnya, setelah semua langkah dilalui dan solusi optimal ditemukan, algoritma mencapai tahap "Selesai".

3.3.4 Perbandingan Efektifitas Pelacakan Algoritma IC, PSO dan FPA

Perbandingan efisiensi dan waktu pelacakan dari setiap algoritma adalah hal yang penting untuk menentukan performa keseluruhan dari algoritma tersebut. Efisiensi dapat dihitung dalam persamaan sebagai berikut [9]:

$$\eta = \frac{P_o}{P_{max}} \times 100\% \quad (2.15)$$

Dimana:

η = Efisiensi *Tracking*.

P_o = Daya keluaran yang terlacak.

P_{max} = Daya maksimum sebenarnya.

Algoritma yang dianggap terbaik tidak hanya harus memiliki efisiensi yang tinggi dalam pemanfaatan sumber daya, tetapi juga harus mampu menyelesaikan tugas pelacakan dengan cepat. Dengan kata lain, algoritma yang ideal adalah yang mampu mencapai keseimbangan antara efisiensi operasional dan kecepatan pelacakan, sehingga menghasilkan kinerja yang optimal dalam berbagai kondisi dan aplikasi.

3.3.5 Penarikan Kesimpulan dan Saran

Dari hasil dan pembahasan yang telah disampaikan, dapat dirumuskan sebuah kesimpulan yang menjadi inti dari penulisan skripsi ini. Penulis juga menyertakan beberapa saran untuk pengembangan penelitian lebih lanjut yang berkaitan dengan permasalahan ini.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan 6 skenario pola bayangan yang menunjukkan variasi kurva tegangan dan daya dalam kondisi bayangan parsial untuk menguji algoritma MPPT mencari GMPP. Hasil simulasi pelacakan masing-masing algoritma, algoritma IC tidak optimal dalam melacak titik MPP pada skenario 4, 5, dan 6. Hal ini dipengaruhi oleh penentuan parameter yaitu *initial duty cycle* yang pada penelitian ini sudah ditentukan yaitu sebesar 0,7. Hal tersebut memungkinkan algoritma IC berfokus eksploitasi yaitu memperbaiki solusi dari iterasi *duty cycle* sebelumnya, bukan mengeksplorasi yaitu mencari solusi baru sehingga algoritma sulit membedakan puncak lokal dan puncak global dalam menentukan titik MPP. Sedangkan pada algoritma PSO, algoritma terjebak pada LMPP pada skenario kasus 6. Hal ini dikarenakan penentuan parameter PSO dalam penelitian ini yaitu bobot inersia yang digunakan yaitu sebesar 0,5 yang membuat algoritma lebih condong ke eksploitasi dimana algoritma menjelajahi disekitar posisi sebelumnya yang mengakibatkan algoritma terjebak pada puncak lokal.
2. Algoritma FPA menunjukkan efisiensi terbaik dalam pelacakan MPPT dengan rata-rata 98,6537%, dibandingkan dengan PSO dan IC yang lebih rendah karena sering terjebak pada puncak lokal. Meskipun demikian, algoritma IC unggul dalam kecepatan pelacakan, dengan waktu rata-rata 0,0850 s, karena implementasi yang sederhana dibandingkan PSO dan FPA yang membutuhkan iterasi lebih lama untuk mencapai konvergen.

5.2 Saran

Adapun penulis memberikan saran untuk penelitian selanjutnya adalah melakukan modifikasi berupa penggabungan metode dari ketiga metode ataupun penelitian lanjutan untuk ketiga algoritma untuk memperoleh performa metode yang lebih baik. Selain itu perlu, mempertimbangkan konverter lain dan respon kontrol terhadap algoritma.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. A. Hakim, T. Al Ghufuran, M. Effendy, and N. Setyawan, "MPPT Menggunakan Algoritme Particle Swarm Optimization dan Artificial Bee Colony," *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 9, no. 2, pp. 218–224, 2020, doi: 10.22146/jnteti.v9i2.81.
- [2] R. I. Putri, S. Wiyanto, I. N. Syamsiana, M. Junus, M. Rifa'I, and E. S. Putra, "Maximum power point tracking based on particle swarm optimization for photovoltaic system on greenhouse application," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1402, no. 3, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1402/3/033104.
- [3] O. Ferlita, "Maximum Power Point Tracking Optimization in Photovoltaic Array Using Particle Swarm Optimization and Firefly Algorithm," Universitas Brawijaya, 2018.
- [4] A. Assegaf, D. Aming, and F. Alvianto, "Perancangan maximum power point tracking dengan algoritma incremental conductance untuk PLTS 100 Wp," *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga)*, vol. 1, no. 1, pp. 1–8, 2021.
- [5] James Kennedy and Russell Eberhart, "Particle Swarm Optimization," *IEEE*, pp. 1942–1948, 1995.
- [6] M. M. A. Awan and T. Mahmood, "Modified flower pollination algorithm for an off-grid solar photovoltaic system," *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 41, no. 4, p. 95, 2022, doi: 10.22581/muet1982.2204.10.
- [7] F. D. Murdianto, A. S. L. Hermawan, A. R. Nansur, and R. E. Setiawan, "Comparison method of flower pollination algorithm, modified particle swarm optimization and perturb & observe in MPPT coupled inductor sepic converter on DC microgrid isolated system," *Proceeding - ICAMIMIA 2017*:

International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation, pp. 291–296, 2018, doi: 10.1109/ICAMIMIA.2017.8387604.

- [8] Prachi Makhija, “Performance Analysis of Solar MPPT techniques Under Partial Shading Condition,” *International Journal of Engineering Research and*, vol. V9, no. 08, pp. 408–413, 2020, doi: 10.17577/ijertv9is080180.
- [9] M. R. Al Haqq, I. Chlissodin, and A. A. Soebroto, “Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada Panel Surya dalam Kondisi Berbayang Sebagian dengan Particle Swarm Optimization (PSO),” *Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 5, no. 8, pp. 3524–3537, 2021, [Online]. Available: <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- [10] G. S. R. Santoso, “Analisa Performa MPPT Algoritma Flower Pollination Alghorithm dan Perthurb and Obserbve Menggunakan Zeta Converter,” *JTT (Jurnal Teknologi Terpadu)*, vol. 10, no. 1, pp. 41–52, 2022, doi: 10.32487/jtt.v10i1.1436.
- [11] 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, 2022, doi: 10.37394/232027.2022.4.7.
- [12] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 2003. doi: 10.1002/0470014008.ch6.
- [13] G. B. Sitanggang, T. Andromeda, and E. W. Sinuraya, “Perancangan Kontrol Mppt Dengan Metode P&O Pada Sistem Pv Di Gedung Teknik Sipil Universitas Diponegoro,” *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 222–228, 2021, doi: 10.14710/transient.v10i1.222-228.
- [14] M. D. Haq, “Perancangan Maximum Power Point Tracking (MPPT) Pada Panel Surya Dengan Kondisi Partial Shading Menggunakan Differential Evolution,” *Suara Teknik: Jurnal Ilmiah*, vol. 12, no. 1, p. 38, 2021, doi: 10.29406/stek.v12i1.2844.
- [15] Ritu, D. Mishra, and D. K. Wadhwani, “Simulation And Analysis Of Particle Swarm Optimization Algorithm Based MPPT For PV System Operating

Under Partial Shading Condition,” *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 9, no. 9, pp. 356–363, 2020, [Online]. Available: www.ijstr.org

- [16] F. Yuniar, R. N. Hasanah, and O. Setyawati, “Pengendalian MPPT Berbasis Metode P&O Menggunakan Boost Converter,” *Jurnal Arus Elektro Indonesia (JAEI)*, vol. 3, no. 1, pp. 1–6, 2017, [Online]. Available: <https://jurnal.unej.ac.id/index.php/E-JAEI/article/view/5497>
- [17] W. Hart Danial, *Power Electronics*. Valparaiso, Indiana: McGraw-Hill Companies, 2010.
- [18] N. A. Prakoso, Dimas Nur; Afandi, Achmad; Arrijal, Miftahul; Abdurrahman, Rizqy; Windarko, “Perbandingan Metode MPPT Incremental Conductance,” vol. 17, no. 2, pp. 175–190, 2019.
- [19] N. M. Elbehairy, R. A. Swief, A. M. Abdin, and T. S. Abdelsalam, “Maximum Power Point Tracking for a Stand Alone PV System under Shading Conditions Using Flower Pollination Algorithm,” *2019 21st International Middle East Power Systems Conference, MEPCON 2019 - Proceedings*, pp. 840–845, 2019, doi: 10.1109/MEPCON47431.2019.9008230.
- [20] M. J. Alshareef, “A New Flower Pollination Algorithm Strategy for MPPT of Partially Shaded Photovoltaic Arrays,” *Intelligent Automation and Soft Computing*, vol. 38, no. 3, pp. 297–313, 2023, doi: 10.32604/iasc.2023.046722.
- [21] D. Yousri, T. S. Babu, D. Allam, V. K. Ramachandaramurthy, and M. B. Etiba, “A novel chaotic flower pollination algorithm for global maximum power point tracking for photovoltaic system under partial shading conditions,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 121432–121445, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2937600.
- [22] L. Ramdhan, D. Pravitasari, and A. A. Setiawan, “Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap On-Grid Residensial Berkapasitas 46,6 Kwp Serpong, Tangerang,” *Journal of Electrical Engineering, Computer, and Information Technology.*, vol. 4, no. 1, pp. 35–42, 2023.