

Optimasi *Maximum Power Point Tracking* pada *Array Photovoltaic* Menggunakan Algoritma *Ant Colony Optimization* dan *Particle Swarm Optimization*

Fuad Hasan¹, Hadi Suyono², Abraham Lomi³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Email: fuadhasan1993@gmail.com, *hadis@ub.ac.id, abraham@lecturer.itn.ac.id

Abstract— Solar power plants in general cannot work at maximum power by themselves, the characteristics of the PV voltage generally follow the battery voltage or the load that is connected directly to the PV. The light intensity received by the PV modules certainly does not all get uniform irradiation, so the power produced is not optimal and causes multi-peak. To optimize power from PV, a Maximum Power Point Tracking (MPPT) system is needed. However, the method that is often used is still often trapped in local peaks and long convergence times. This journal compares tracking performance and tracking time using 2 methods, namely Ant Colony Optimization (ACO) and Particle Swarm Optimization (PSO). The experimental results show that the ACO algorithm has an overall average efficiency that is 1.58% superior to the PSO, but the ACO algorithm is slower in tracking.

Index Terms— *Ant Colony Optimization, Particle Swarm Optimization, Maximum Power Point Tracking, convergent time.*

Abstrak— Pembangkit listrik tenaga surya pada umumnya tidak dapat bekerja pada daya maksimum dengan sendirinya, karakteristik tegangan PV pada umumnya mengikuti tegangan baterai atau beban yang terhubung langsung ke PV. Intensitas cahaya yang diterima oleh modul-modul PV pasti tidak semuanya mendapatkan iradiasi yang seragam, sehingga daya yang dihasilkan tidak optimal dan menimbulkan *multi-peak*. Untuk mengoptimalkan daya dari PV diperlukan sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Namun metode yang sering digunakan masih sering terjebak dalam *local peak* dan waktu konvergen yang lama. Jurnal ini membandingkan performa pelacakan dan waktu pelacakan menggunakan 2 metode, yaitu *Ant Colony Optimization* (ACO) dan *Particle Swarm Optimization* (PSO). Hasil percobaan menunjukkan algoritma ACO mempunyai efisiensi rata-rata keseluruhan yang lebih unggul 1,58% dari PSO, namun algoritma ACO lebih lambat dalam pelacakannya.

Kata Kunci—*Ant Colony Optimization, Particle Swarm Optimization, Maximum Power Point Tracking, Waktu Konvergen.*

I. PENDAHULUAN

Energi baru terbarukan merupakan salah satu energi alternatif yang ramah lingkungan, Diantaranya yaitu tenaga panas bumi, tenaga matahari, biomassa dan tenaga air. Tenaga matahari adalah salah satu energi listrik dengan menggunakan panel surya. *Photovoltaic* (PV)

menjadi sumber energi terbarukan yang populer dikarenakan mempunyai beberapa keunggulan, terutama biaya operasional yang rendah dan ramah lingkungan. Terlepas dari biaya tinggi modul surya, sistem pembangkit listrik PV, khususnya tipe yang terhubung ke jaringan, telah dikomersialkan di banyak negara karena potensi manfaat jangka panjangnya [1].

Pada umumnya PV tidak bisa bekerja secara maksimum, karena tegangan PV biasanya akan mengikuti tegangan baterai yang terhubung dengan PV. *Teknologi Maximum Power Point Tracking (MPPT)* dapat membantu untuk mengontrol modul PV bekerja pada titik daya maksimum atau *Maximum Power Point (MPP)*, sehingga dihasil daya PV yang optimal.

Para peneliti PV banyak tertarik dalam meneliti *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* untuk mendapatkan daya keluaran maksimum. Pada dasarnya MPPT merupakan koordinat titik operasi antara modul PV dan konversi DC-DC. Arus dan tegangan dari PV merupakan variabel kontrol untuk MPPT untuk memberikan instruksi kepada konversi DC-DC.

Supaya PV dapat menghasilkan arus dan tegangan maksimum yang lebih tinggi, perlu digunakan beberapa modul PV yang dihubungkan secara seri atau paralel supaya mendapatkan arus dan tegangan yang lebih tinggi. Modul-modul yang terhubung paralel atau seri disebut *array PV*. Pada modul-modul *array PV* jika sebagian tertutup bayangan pepohonan, awan, gedung dan sebagainya, maka pada setiap modul tidak semuanya mendapatkan iradiasi yang sama, dimana setiap modul PV mempunyai hasil yang berbeda-beda atau tidak seimbang, sehingga daya keluaran total *array PV* sangat menurun. Selain itu, efek *hot-spot* yang disebabkan oleh bayangan parsial cenderung merusak sel-sel PV dan mempengaruhi keamanan sistem PV [2]. Oleh karena itu, diperlukan pelacakan yang lebih konferhensif apabila mengalami bayangan parsial.

Metode konvensional yang banyak digunakan untuk MPPT salah satunya seperti *Perturb and Observe (P&O)*, *fractional open-circuit voltage and incremental conductance*. Metode konvensional ini memiliki respon yang lambat dan kurang memuaskan dalam memecahkan masalah perubahan lingkungan yang cepat dan mengatasi non linearitas PV. Perubahan iradiasi yang begitu cepat karena faktor cuaca metode P&O gagal melacak MPP [3].

Penelitian terbaru saat ini terkait dengan pembuatan algoritma MPPT yang dapat bekerja lebih baik pada kondisi *Partial Shading* adalah menggunakan metode kontrol berbasis *Artificial Intelligence (AI)* seperti *Artificial Neural Network* [4] dan *Fuzzy Logic Control* [5]. Akan tetapi, kebutuhan data yang sangat besar untuk *fuzzification* dan *defuzzification* pada kontrol logika *fuzzy* akan menjadi beban pada proses komputasi. Begitu juga dengan metode *neural network*, jumlah data yang besar membuat proses *training* menjadi lambat.

Beberapa peneliti selanjutnya mengajukan beberapa metode untuk meningkatkan kualitas pelacakan MPPT, seperti *extremum-seeking control*, *ripple correlation control*, *automatic step size tuning*, dan sebagainya. Metode-metode ini dapat melacak MPP secara akurat dan meningkatkan kinerja pelacakan yang dinamis maupun *steady-state*. Namun, metode -metode ini masih belum dapat mengatasi kurva output dengan *multi-peak* yang ditimbulkan oleh kondisi bayangan parsial pada *array PV*[6]. Oleh sebab itu, sangat penting untuk dilakukan pengembangan algoritma yang mampu melacak secara akurat MPP global pada kurva output yang kompleks dan non-linier.

Masalah MPPT di bawah bayangan parsial menjadi masalah optimasi. Pada permasalahan ini, algoritma *metaheuristik* dapat memperoleh global peak dengan memanfaatkan pengacakan untuk menghindari algoritma pada *local peak* dan memungkinkan pencarian secara global.

Algoritma *metaheuristik* adalah algoritma yang menirukan perilaku hewan dengan suatu tujuan mencari optimasi dari suatu fungsi. Dalam algoritma *metaheuristik* yang populer diantaranya, *Genetic Algorithm (GA)*, *Harmony Search (HS)*, *Artificial Bee Colony (ABC)*, *Ant Colony Optimization (ACO)*[7].

Penelitian ini akan membahas perbandingan efisiensi dan waktu *tracking* dari masing-masing *algorithm Ant Colony Optimization (ACO)* dan *Particle Swarm Optimization (PSO)* dalam MPPT di bawah bayangan parsial. *Ant Colony Optimization (ACO)* adalah salah satu algoritma optimasi *metaheuristik*[8]. Algoritma ini terinspirasi dalam menemukan jalur dari koloninya menuju makanan. Jadi, algoritma ini untuk memecahkan sebuah masalah komputasi yang dapat diselesaikan melalui jalur yang terpendek dan tercepat. *Particle Swarm Optimization (PSO)* adalah salah satu algoritma *metaheuristik* yang banyak digunakan oleh para peneliti karena sederhana, fleksibilitas, dan mudah dalam mengimplementasikan. Algoritma ini terinspirasi dari hewan yaitu burung.

Penelitian ini akan membahas tentang perbandingan dari kinerja algoritma ACO dan PSO dalam MPPT pada PV di bawah kondisi bayangan parsial. Performansi algoritma yang akan dibandingkan adalah efisiensi dan waktu *tracking* dari masing-masing algoritma.

II. METODOLOGI

Keluaran tegangan dan arus PV mempunyai karakteristik yang berubah ubah (*nonlinier*), seiring

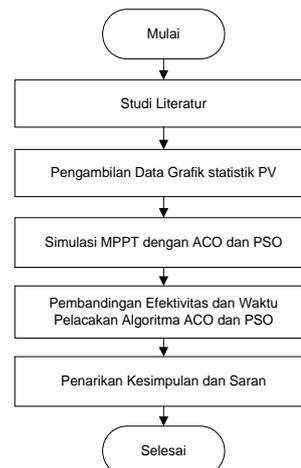
berubahnya irradiansi dan suhu mengakibatkan titik puncak daya maksimum PV berubah-ubah. PV tidak dapat bekerja secara otomatis untuk menemukan titik daya maksimumnya sehingga perlu pengontrolan untuk menemukan titik daya maksimumnya. Maka peran MPPT sangat diperlukan untuk melacak titik daya maksimum dari PV.

MPPT merupakan system elektronik yang difungsikan untuk melacak titik daya maksimum PV dan menjaga untuk tetap di titik maksimumnya. Pada penelitian ini dilakukan studi perbandingan antara 2 algoritma untuk MPPT dibawah bayangan parsial.

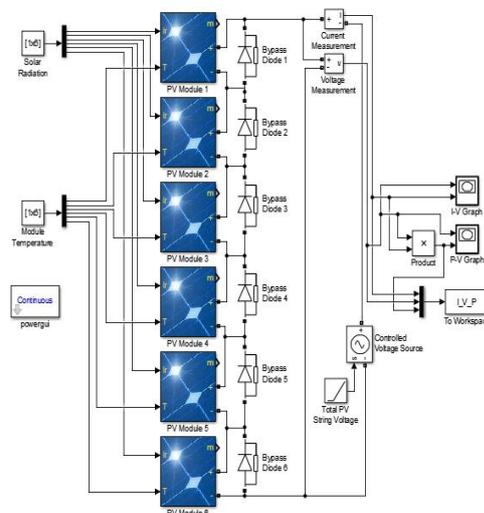
III. PENGAMBILAN DATA

Penelitian ini menggunakan 6 modul PV yang dipasang secara seri, tujuan dipasang secara seri tujuan dipasangnya modul PV dipasang secara seri yaitu untuk mendapatkan grafik yang memiliki 6 *peak*.

Enam modul PV ini dimodelkan menggunakan software *Matlab Simulink*, dan disimulasikan dengan merubah-ubah iradiansi matahari di setiap modul PV untuk mendapatkan grafik PV arus dan tegangan dan letak titik daya maksimum yang berbeda-beda.



Gambar.1 Diagram alir penelitian



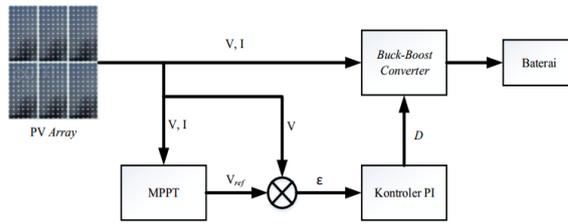
Gambar. 2 pemodelan 6 modul PV dengan Software Matlab Simulink

Modul PV yang digunakan dalam pemodelan array PV dengan SIMULINK adalah modul SunPower SPR-X20-250-BLK. Spesifikasi modul SunPower SPR-X20-250-BLK pada STC, yaitu intensitas cahaya 1000 W/m² dan suhu modul 25°C, ditunjukkan pada Tabel 1.

TABEL 1
SPESIFIKASI MODUL PV

Daya maksimum (P_{mp})	249,952 W
Tegangan pada MPP (V_{mp})	42,8 V
Arus pada MPP (I_{mp})	5,84 A
Tegangan open-circuit (V_{oc})	50,93 V
Arus short-circuit (I_{sc})	6,2 A

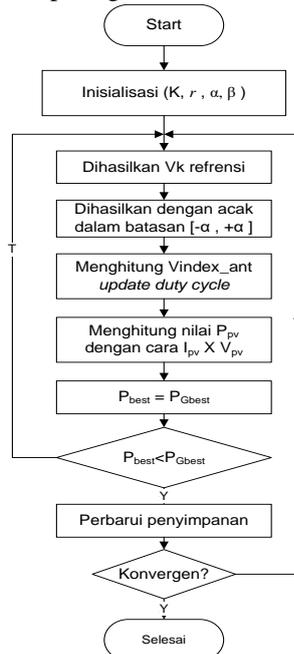
Tujuan dari MPPT ini adalah memperoleh V_{ref} yang akan dibandingkan dengan V dari array PV sehingga diperoleh error yang menjadi masukan dari kontroler PI. Kontroler PI ini yang nantinya akan mengatur duty cycle dari Boost Converter untuk mengontrol tegangan keluaran array PV. Blok diagram sistem PV yang menggunakan MPPT ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Block diagram system PV untuk MPPT

Variabel yang dikontrol dengan MPPT ini adalah tegangan referensi yang masuk ke komparator, maka posisi partikel adalah V_{ref} dan yang dibandingkan nilai terbaiknya dari hasil kali tegangan (V) dengan arus (I) yaitu daya keluaran dari PV (P) pada posisi tersebut. Variabel lain dari ACO yang dikonversi ke sistem PV dapat dilihat pada Tabel 2.

Flowchat control MPPT menggunakan algoritma ACO ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. flowchat MPPT dengan ACO

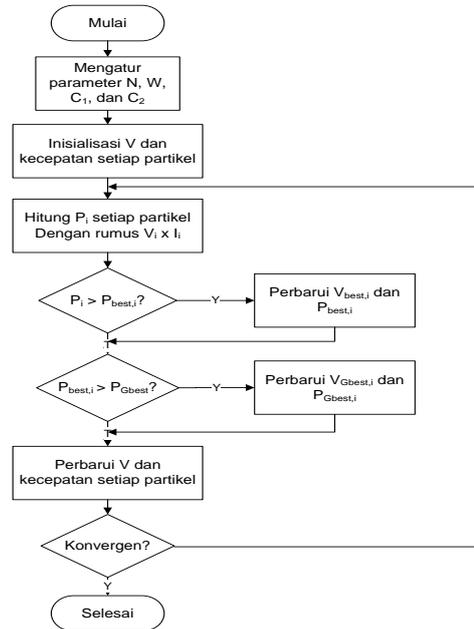
TABEL 2
PENGATURAN PARAMETER ACO

Parameter	Nilai
Jumlah semut (k)	5
Pheromone (τ)	1
Evaporasi (ρ)	0.5
Pengaruh Pheromone (α)	1
Pengaruh Pheromone (β)	2
Toleransi ($\epsilon 1$)	1

Probabilitas yang akan dikunjungi [9].

$$P_{ij} = \frac{\tau_{ij}^\alpha \times \eta_{ij}^\beta}{\sum \tau_{ij}^\alpha \times \eta_{ij}^\beta} \quad (1)$$

Flowchat control MPPT menggunakan algoritma PSO ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. flowchat MPPT dengan PSO

TABEL 3
PENGATURAN PARAMETER PSO

Parameter	Nilai
Jumlah partikel (k)	5
Bobot inersia (w)	0.4
Cognition-only learning factor (C1)	2.1
Social-only learning factor (C1)	2.1
Toleransi ($\epsilon 1$)	1

Kecepatan gerak partikel diperbarui dengan Persamaan [10].

$$V_i^{j+1} = W \times V_i^j + C_1 \times rand1(\cdot) \times (P_{best,i} - P_i^j) + C_2 \times rand2(\cdot) \times (P_{gbest} - P_i^j) \quad (2)$$

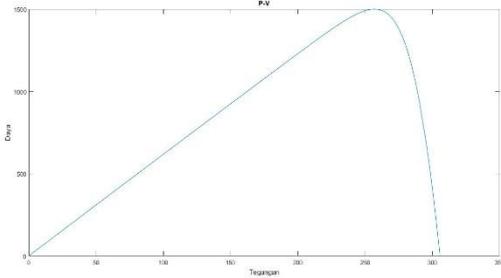
posisi partikel diperbarui dengan Persamaan

$$P_i^{j+1} = V_i^{j+1} + P_i^j \quad (3)$$

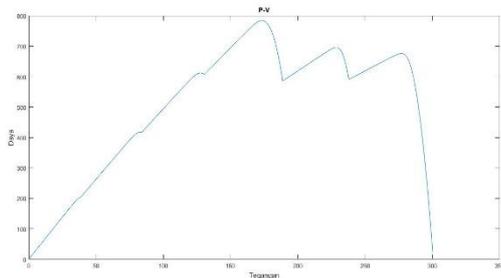
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Algoritma ACO, PSO dan FF diuji dalam melacak MPP dengan menggunakan 6 buah modul PV dengan

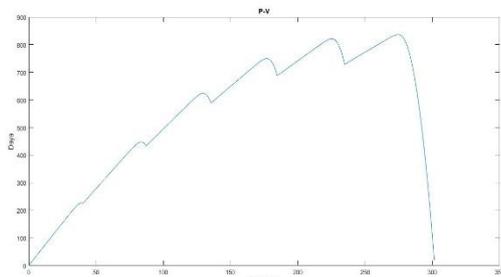
memfariasiakan iradiasi matahari di *Software Matlab Simulink*. Pada penelitian ini ada 6 skenario pengujian untuk mengetahui efisiensi pelacakan dan lamanya waktu pelacakan dalam pencarian MPP global.



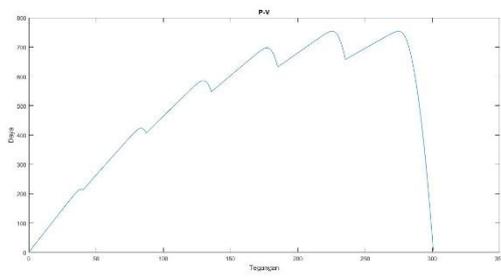
Gambar 7. Karakteristik P-V yang dihasilkan kasus 1 dengan iradiasi (M1= 1000 W/m², M2 = 1000 W/m², M3 = 1000 W/m², M4 = 1000 W/m², M5 = 1000 W/m², M6 = 1000 W/m²) hasil MPP 1299,71



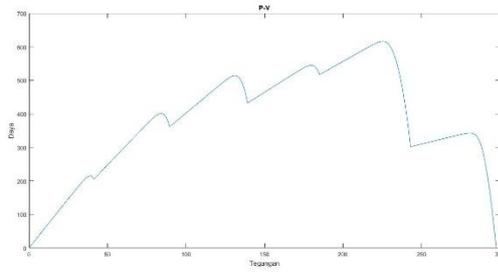
Gambar 8. Karakteristik P-V yang dihasilkan kasus 2 dengan iradiasi (M1= 1000 W/m², M2 = 900 W/m², M3 = 800 W/m², M4 = 700 W/m², M5 = 600 W/m², M6 = 500 W/m²) hasil MPP 836,395



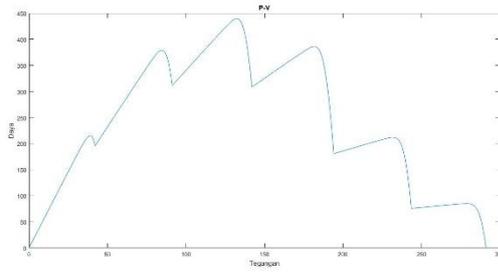
Gambar 9. Karakteristik P-V yang dihasilkan kasus 3 dengan iradiasi (M1= 400 W/m², M2 = 750 W/m², M3 = 900 W/m², M4 = 850 W/m², M5 = 800 W/m², M6 = 500 W/m²) hasil MPP 784,216



Gambar 10. Karakteristik P-V yang dihasilkan kasus 4 dengan iradiasi (M1= 950 W/m², M2 = 850 W/m², M3 = 750 W/m², M4 = 650 W/m², M5 = 550 W/m², M6 = 450 W/m²) hasil MPP 753,905



Gambar 11. Karakteristik P-V yang dihasilkan kasus 5 dengan iradiasi (M1= 950 W/m², M2 = 800 W/m², M3 = 650 W/m², M4 = 500 W/m², M5 = 450 W/m², M6 = 200 W/m²) hasil MPP 616,5526



Gambar 12. Karakteristik P-V yang dihasilkan kasus 46 dengan iradiasi (M1= 950 W/m², M2 = 750 W/m², M3 = 550 W/m², M4 = 350 W/m², M5 = 150 W/m², M6 = 50 W/m²) hasil MPP 439,5945

A. Hasil Tracking Algoritma ACO

TABEL 5
HASIL PELACAKAN ACO KASUS 1

Perc.	Ppv (W)	Vref (V)	Iter	Waktu Konvergen (s)	Efisiensi Algoritma (%)
1	490,3441	250	7	0,419	99,3749
2	490,3441	250	4	0,239	99,3749
3	490,3441	250	4	0,239	99,3749
4	490,3441	250	5	0,299	99,3749
5	490,3441	250	5	0,299	99,3749
6	490,3441	250	4	0,239	99,3749
7	490,3441	250	4	0,239	99,3749
8	490,3441	250	4	0,239	99,3749
9	490,3441	250	7	0,419	99,3749
10	490,3441	250	4	0,239	99,3749
Rata-rata	490,3441	-	4	0,287	99,3749
Terbaik	490,3441	250	4	0,239	99,3749
Terburuk	490,3441	250	7	0,419	99,3749

Dari tabel 5, dapat disimpulkan bahwa hasil pelacakan ACO untuk mencari MPP pada kasus pertama sangat baik. Dari 10 kali percobaan, ACO berhasil melacak MPP pada kasus pertama tanpa ada kegagalan dalam pelacakannya. Sehingga peluang keberhasilan algoritma ACO dalam melacak MPP kasus 1 yaitu 99%.

Pelacakan dengan efisiensi terbaik yaitu pada tegangan 250 V dengan daya sebesar 1490,3441W dan efisiensi algoritma 99,3749%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 4 kali iterasi dengan waktu pelacakan 0,239 detik.

TABEL 6.
HASIL PELACAKAN ACO KASUS 2

Perc.	Ppv (W)	Vref (V)	Iter	Waktu Konvergen (s)	Efisiensi Algoritma (%)
1	821,4726	225	34	2,039	98,2157
2	821,4662	225	23	1,379	98,2150
3	821,4705	225	25	1,499	98,2155
4	821,477	225	25	1,499	98,2163
5	821,476	225	17	1,019	98,2162
6	821,4667	225	47	2,819	98,2150
7	821,4536	225	15	0,899	98,2135
8	821,4081	225	14	0,839	98,2080
9	821,4766	225	75	4,499	98,2162
10	821,4677	225	22	1,319	98,2152
Rata-rata	821,4635	-	25	1,781	98,2147
Terbaik	821,477	225	25	1,499	98,2163
Terburuk	821,4081	225	14	0,839	98,2080

Dari table 6, dapat disimpulkan bahwa hasil pelacakan ACO untuk mencari MPP pada kasus kedua sangat baik. Dari 10 kali percobaan, ACO berhasil melacak MPP pada kasus kedua tanpa ada kegagalan dalam pelacakannya. Sehingga peluang keberhasilan algoritma ACO dalam melacak MPP pada kasus kedua yaitu 98%.

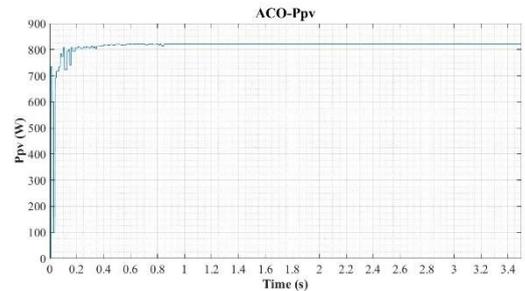
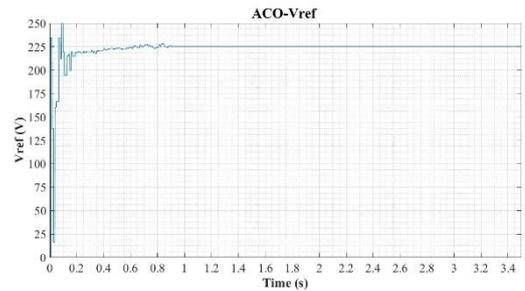
Pelacakan dengan efisiensi terbaik yaitu pada tegangan 225 V dengan daya sebesar 821,477W dan efisiensi algoritma 98,2163%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 25 kali iterasi dengan waktu pelacakan 1,499 detik.

TABEL 7.
HASIL PELACAKAN ACO KASUS 3

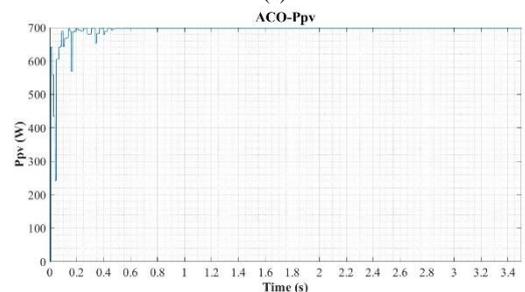
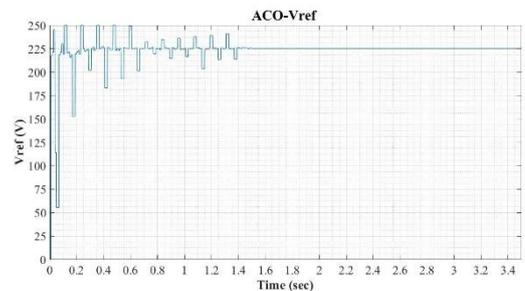
Perc.	Ppv (W)	Vref (V)	Iter.	Waktu Konvergen (s)	Efisiensi Algoritma (%)
1	784,1572	173,00	21	1,259	99,9925
2	784,2052	173,22	19	1,139	99,9986
3	784,2108	173,28	12	0,719	99,9993
4	695,3778	228,60	41	2,459	88,6717
5	784,2023	173,20	15	0,899	99,9982
6	784,211	173,25	12	0,719	99,9993
7	784,2134	173,26	25	1,499	99,9996
8	695,375	228,61	39	2,339	88,6713
9	784,2052	173,29	25	1,499	99,9986
10	784,1874	173,14	12	0,719	99,9963
Rata-rata	766,4345	-	22	1,325	97,7325
Terbaik	784,2134	173,26	25	1,499	99,9996
Terburuk	695,375	228,61	39	2,339	88,6713

Dari tabel 7, dapat disimpulkan bahwa hasil pelacakan ACO untuk mencari MPP pada kasus ketiga. Dari 10 kali percobaan, algoritma ACO, 8 kali berhasil melacak MPP dan 2 kali gagal dalam melacakannya. Sehingga peluang keberhasilan algoritma ACO dalam melacak MPP pada kasus ketiga yaitu 80%.

Pelacakan dengan efisiensi terbaik yaitu pada tegangan 173 V dengan daya sebesar 784,2134W dan efisiensi algoritma 99,99967%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 25 kali iterasi dengan waktu pelacakan 1,499 detik. Pelacakan dengan efisiensi terburuk yaitu pada tegangan 228 V dengan daya sebesar 695,375W dan efisiensi algoritma 88,67136%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 39 kali iterasi dengan waktu pelacakan 2,339 detik.



Gambar 13. (a) perubahan Vref (b) perubahan Ppv pada pelacakan terbaik algoritma ACO kasus 3



Gambar 14. (a) perubahan Vref (b) perubahan Ppv pada pelacakan terburuk algoritma ACO kasus 3

TABEL 8.
HASIL PELACAKAN ACO KASUS 4

Perc.	Ppv (W)	Vref (V)	Iter.	Waktu Konvergen (s)	Efisiensi Algoritma (%)
1	753,8942	225,6806	69	4,139	99,9985
2	596,9241	176,9121	33	1,979	92,4419
3	753,9032	225,6505	43	2,579	99,9997
4	753,8281	225,371	14	0,839	99,9898
5	753,9047	225,6446	13	0,779	99,9999
6	753,8529	225,4586	18	1,079	99,9930
7	753,9004	225,656	79	4,739	99,9993
8	753,8934	225,604	21	1,259	99,9984
9	753,892	225,6871	18	1,029	99,9982
10	753,8092	225,3045	11	0,659	99,9872
Rata-rata	748,1802	-	31	1,908	99,2406

Terbaik	753,9047	225,6446	13	0,779	99,9999
Terburuk	596,9241	176,9121	33	1,979	92,4419

Dari tabel 8, dapat disimpulkan bahwa hasil pelacakan ACO untuk mencari MPP pada kasus empat. Dari 10 kali percobaan, algoritma ACO, 9 kali berhasil melacak MPP dan 1 kali gagal dalam melacakannya. Sehingga peluang keberhasilan algoritma ACO dalam melacak MPP pada kasus keempat yaitu 90%.

Pelacakan dengan efisiensi terbaik yaitu pada tegangan 225 V dengan daya sebesar 753,9047W dan efisiensi algoritma 99,9999%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 13 kali iterasi dengan waktu pelacakan 0,779detik. Pelacakan dengan efisiensi terburuk yaitu pada tegangan 176 V dengan daya sebesar 696,9241W dan efisiensi algoritma 92,4419%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 33 kali iterasi dengan waktu pelacakan 1,979 detik.

TABEL 9.
HASIL PELACAKAN ACO KASUS 5

Perc.	Ppv (W)	Vref (V)	Iter	Waktu Konvergen (s)	Efisiensi Algoritma (%)
1	616,5503	225,3001	12	0,719	99,9996
2	616,5525	225,247	21	1,259	99,9999
3	616,5464	225,3828	15	0,899	99,9989
4	616,5526	225,2507	18	1,079	99,9999
5	616,5518	225,2683	26	1,559	99,9998
6	616,5521	225,2418	60	3,599	99,9999
7	616,5483	225,3428	15	0,899	99,9993
8	616,5435	225,158	13	0,779	99,9985
9	616,5488	225,3318	47	2,819	99,9993
10	616,5519	225,2388	20	1,199	99,9998
Rata-rata	616,5498	-	24	1,481	99,9995
Terbaik	616,5526	225,2507	18	1,079	99,9999
Terburuk	616,5435	225,158	13	0,779	99,9985

Dari tabel 5, dapat disimpulkan bahwa hasil pelacakan ACO untuk mencari MPP pada kasus kelima sangat baik. Dari 10 kali percobaan, ACO berhasil melacak MPP pada kasus kelima tanpa ada kegagalan dalam pelacakannya. Sehingga peluang keberhasilan algoritma ACO dalam melacak MPP pada kasus kelima yaitu 99%.

Pelacakan dengan efisiensi terburuk yaitu pada tegangan 225 V dengan daya sebesar 616,5526W dan efisiensi algoritma 99,9999%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 18 kali iterasi dengan waktu pelacakan 1,079 detik.

TABEL 10.
HASIL PELACAKAN ACO KASUS 6

Perc.	Ppv (W)	Vref (V)	Iter	Waktu Konvergen (s)	Efisiensi Algoritma (%)
1	439,5947	132,3447	36	2,159	99,9999
2	439,5947	132,3298	58	3,479	99,9999
3	439,5947	132,3251	37	2,219	99,9999
4	439,5947	132,3121	46	2,759	99,9999
5	439,5947	132,3921	25	1,499	99,9999
6	439,5785	132,1573	11	0,659	99,9963
7	439,5947	132,2917	22	1,319	99,9999
8	439,5947	132,3165	44	2,639	99,9999
9	439,5948	132,3387	76	4,559	99,9999
10	439,5947	132,3902	18	1,079	99,9999
Rata-rata	439,5930	-	37	2,237	99,9995
Terbaik	439,5948	132,3387	76	4,559	99,9999
Terburuk	439,5785	132,1573	11	0,659	99,9963

Dari tabel 10, dapat disimpulkan bahwa hasil pelacakan ACO untuk mencari MPP pada kasus keenam sangat baik. Dari 10 kali percobaan, ACO berhasil melacak MPP pada kasus keenam tanpa ada kegagalan dalam pelacakannya. Sehingga peluang keberhasilan algoritma ACO dalam melacak MPP pada kasus keenam yaitu 99%.

Pelacakan dengan efisiensi terbaik yaitu pada tegangan 132 V dengan daya sebesar 439,5948W dan efisiensi algoritma 99,9999%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 76 kali iterasi dengan waktu pelacakan 4,559detik.

B. Hasil Tracking Algoritma PSO

TABEL 11.
HASIL PELACAKAN PSO KASUS 1

Perc.	Ppv (W)	Vref (V)	Iter	Waktu Konvergen (s)	Efisiensi Algoritma (%)
1	1483,7549	247,64	16	0,959	99,1885
2	1490,3441	250	9	0,539	99,3749
3	1410,2737	231,1077	25	1,499	94,0359
4	1490,3441	250	12	0,719	99,3749
5	1490,3441	250	10	0,599	99,3749
6	1459,6023	241,2161	17	1,019	97,3251
7	1490,3441	250	8	0,419	99,3749
8	1490,3441	250	7	0,419	99,3749
9	1490,3441	250	10	0,599	99,3749
10	1490,3441	250	8	0,479	99,3749
Rata-rata	1345,1039	-	12	0,725	89,6904
Terbaik	1490,3441	250	7	1,499	99,3749
Terburuk	1410,2737	231,1077	25	1,449	99,3749

Dari Tabel 11, dapat disimpulkan bahwa hasil pelacakan PSO untuk mencari MPP pada kasus pertama memperoleh hasil yang baik. Dari 10 kali percobaan, PSO berhasil melacak MPP pada kasus pertama, berhasil tanpa ada kegagalan dalam pelacakannya, Sehingga peluang keberhasilan algoritma PSO dalam melacak MPP pada kasus pertama 90%.

Pelacakan dengan efisiensi terbaik yaitu pada tegangan 250 V dengan daya sebesar 1490,3441 W dan efisiensi algoritma 99,374%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 7 kali iterasi dengan waktu tracking 0,419 detik. Pelacakan dengan efisiensi terburuk yaitu pada tegangan 247 V dengan daya sebesar 1410,2737 W dan efisiensi algoritma 94,0359%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 25 kali iterasi dengan waktu tracking 1,449 detik.

TABEL 12.
HASIL PELACAKAN PSO KASUS 2

Perc.	Ppv (W)	Vref (V)	Iter	Waktu Konvergen (s)	Efisiensi Algoritma (%)
1	821,477	225,405	12	0,719	98,2162
2	821,474	225,417	11	0,659	98,2159
3	821,46	225,417	10	0,599	98,2142
4	821,42	225,46	11	0,659	98,2095
5	821,468	225,435	12	0,219	98,2152
6	821,461	225,338	11	0,659	98,2144
7	749,689	176,933	9	0,539	89,6332

8	821,471	225,382	12	0,719	98,2156
9	821,469	225,371	15	0,899	98,2153
10	623,691	129,263	13	0,779	74,5688
Rata-rata	794,508	-	11	0,645	94,9918
Terbaik	821,477	225,405	12	0,719	98,2162
Terburuk	623,691	129,263	13	0,779	74,5688

Dari tabel diatas dapat disimpulkan bahwa hasil pelacakan PSO untuk mencari MPP pada kasus kedua memperoleh hasil yang baik. Dari 10 kali percobaan, PSO berhasil melacak MPP pada kasus kedua, berhasil 9 kali dan 1 kali gagal dalam pelacakannya, Sehingga peluang keberhasilan algoritma PSO dalam melacak MPP pada kasus kedua 90%.

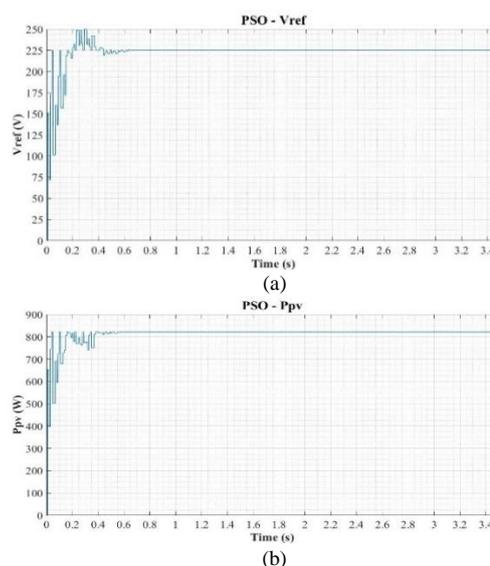
Pelacakan dengan efisiensi terbaik yaitu pada tegangan 225 V dengan daya sebesar 821,477W dan efisiensi algoritma 98,2162%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 12 kali iterasi dengan waktu tracking 0,719 detik. Pelacakan dengan efisiensi terburuk yaitu pada tegangan 129 V dengan daya sebesar 623,691W dan efisiensi algoritma 74,5688%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 13 kali iterasi dengan waktu tracking 0,779 detik.

TABEL 13.
HASIL PELACAKAN PSO KASUS 3

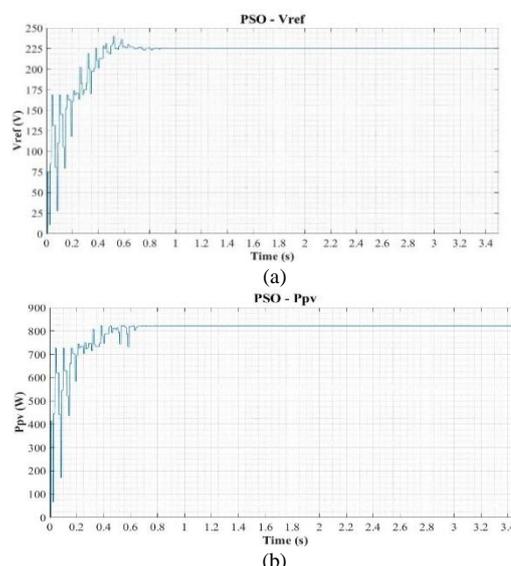
Perc.	Ppv (W)	Vref (V)	Iter	Waktu Konvergen (s)	Efisiensi Algoritma (%)
1	84,2039	173,2202	12	0,719	99,9985
2	84,2051	173,299	12	0,719	99,9986
3	84,1883	173,1459	11	0,659	99,9965
4	84,208	173,2395	13	0,779	99,999
5	84,2089	173,2916	13	0,779	99,9991
6	84,2145	173,2709	10	0,599	99,9998
7	84,2061	173,2307	10	0,779	99,9987
8	84,2134	173,2656	13	0,779	99,9997
9	95,3571	228,5417	11	0,659	88,6691
10	84,2081	173,2401	10	0,599	99,999
Rata-rata	75,3213	-	11	0,707	98,8658
Terbaik	84,2145	173,2709	10	0,599	99,9998
Terburuk	95,3571	228,5417	11	0,659	88,6691

Dari Tabel 13, dapat disimpulkan bahwa hasil pelacakan PSO untuk mencari MPP pada kasus ketiga memperoleh hasil yang baik. Dari 10 kali percobaan, PSO berhasil melacak MPP pada kasus ketiga, berhasil 9 kali dan 1 kali gagal dalam pelacakannya,

Pelacakan dengan efisiensi terbaik yaitu pada tegangan 173 V dengan daya sebesar 784,2145W dan efisiensi algoritma 99,9998%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 10 kali iterasi dengan waktu tracking 0,599 detik. Pelacakan dengan efisiensi terburuk yaitu pada tegangan 228 V dengan daya sebesar 695,3571 W dan efisiensi algoritma 88,6691%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 11 kali iterasi dengan waktu tracking 0,659 detik.



Gambar 15. (a) Perubahan Vref (b) perubahan Ppv pada pelacakan terbaik algoritma PSO kasus 3



Gambar 16. Perubahan Vref (b) perubahan Ppv pada pelacakan terburuk algoritma PSO kasus 3

TABEL 14.
HASIL PELACAKAN PSO KASUS 4

Perc.	Ppv (W)	Vref(V)	Iter	Waktu Konvergen (s)	Efisiensi Algoritma (%)
1	753,8856	225,5757	14	0,839	99,9974
2	753,8971	225,6713	11	0,659	99,999
3	753,8673	225,7484	11	0,659	99,995
4	753,9028	225,592	9	0,539	99,9997
5	753,8964	225,6146	12	0,719	99,9989
6	753,8964	225,6146	13	0,779	99,9989
7	696,9245	176,9162	13	0,779	92,442
8	753,9038	225,649	13	0,779	99,9998
9	753,9763	225,5422	12	0,719	99,999
10	695,6341	250	5	0,299	92,2708
Rata-rata	742,3784	-	11	0,677	99,9999
Terbaik	753,9763	225,5422	12	0,719	99,9999
Terburuk	695,6341	250	5	0,299	92,2708

Dari tabel 14, dapat disimpulkan bahwa hasil pelacakan PSO untuk mencari MPP pada kasus keempat memperoleh hasil yang baik. Dari 10 kali percobaan, PSO berhasil melacak MPP pada kasus keempat, berhasil

9 kali dan 1 kali gagal dalam pelacakannya, Sehingga peluang keberhasilan algoritma PSO dalam melacak MPP pada kasus keempat 90%.

Pelacakan dengan efisiensi terbaik yaitu pada tegangan 225 V dengan daya sebesar 753,9763W dan efisiensi algoritma 99,9999%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 12 kali iterasi dengan waktu tracking 0,719 detik. Pelacakan dengan efisiensi terburuk yaitu pada tegangan 250 V dengan daya sebesar 695,6341W dan efisiensi algoritma 92,2708%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 5 kali iterasi dengan waktu tracking 0,299 detik.

TABEL 15.
HASIL PELACAKAN PSO KASUS 5

Perc	Ppv (W)	Vref (V)	Iter	Waktu Konvergen (s)	Efisiensi Algoritma (%)
1	616,5113	225,5519	12	0,719	99,9933
2	545,1524	179,6603	11	0,659	88,4194
3	616,5522	225,2429	13	0,779	99,9999
4	545,1389	179,6273	14	0,839	88,4173
5	616,5509	225,2262	13	0,779	99,9997
6	616,5525	225,2513	11	0,659	99,9999
7	616,552	225,2407	14	0,839	99,9999
8	545,1288	178,6025	11	0,659	88,4156
9	545,1389	179,6273	15	0,869	88,4173
10	616,5133	225,5466	11	0,659	99,9936
Rata-rata	587,9791	-	12	0,746	95,3655
Terbaik	616,5525	225,2513	11	0,659	99,9999
Terburuk	545,1288	178,6025	11	0,659	88,4156

Dari tabel 15, dapat disimpulkan bahwa hasil pelacakan PSO untuk mencari MPP pada kasus kelima memperoleh hasil yang tidak baik. Dari 10 kali percobaan, PSO berhasil melacak MPP pada kasus kelima, berhasil 7 kali dan 4 kali gagal dalam pelacakannya, Sehingga peluang keberhasilan algoritma PSO dalam melacak MPP pada kasus kelima 60%.

Pelacakan dengan efisiensi terbaik yaitu pada tegangan 225 V dengan daya sebesar 616,5525W dan efisiensi algoritma 99,9999%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 11 kali iterasi dengan waktu tracking 0,659 detik. Pelacakan dengan efisiensi terburuk yaitu pada tegangan 178 V dengan daya sebesar 545,1288W dan efisiensi algoritma 88,4156%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 11 kali iterasi dengan waktu tracking 0,659 detik.

TABEL 16.
HASIL PELACAKAN PSO KASUS 6

Perc	Ppv (W)	Vref(V)	Iter	Waktu Konvergen (s)	Efisiensi Algoritma (%)
1	439,5917	132,455	12	0,719	99,9994
2	439,5947	132,383	11	0,659	99,9999
3	439,5947	132,379	13	0,779	99,9999
4	439,5947	132,333	12	0,719	99,9999
5	378,8598	84,7934	25	1,499	86,1839
6	439,5946	132,314	11	0,659	99,9999
7	378,8598	84,7934	20	1,299	86,1839
8	439,5947	132,362	11	0,659	99,9999
9	439,5928	132,449	11	0,659	99,9996
10	439,5947	132,359	12	0,719	99,9999
Rata-rata	427,4472	-	13	0,837	97,2366
Terbaik	439,5947	132,383	11	0,659	99,9999
Terburuk	378,8598	84,7934	25	1,499	86,1839

Dari tabel 16, dapat disimpulkan bahwa hasil pelacakan PSO untuk mencari MPP pada kasus keenam memperoleh hasil yang baik. Dari 10 kali percobaan, PSO berhasil melacak MPP pada kasus keenam, berhasil 9 kali dan 2 kali gagal dalam pelacakannya, Sehingga peluang keberhasilan algoritma PSO dalam melacak MPP pada kasus keenam 80%.

Pelacakan dengan efisiensi terbaik yaitu pada tegangan 132 V dengan daya sebesar 439,5947 W dan efisiensi algoritma 99,9999%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 11 kali iterasi dengan waktu tracking 0,659 detik. Pelacakan dengan efisiensi terburuk yaitu pada tegangan 84 V dengan daya sebesar 378,8598 W dan efisiensi algoritma 86,1839%. Jumlah iterasi untuk pelacakan dengan efisiensi terbaik adalah 25 kali iterasi dengan waktu tracking 1,499 detik.

TABEL 17.
PERSENTASE KEUNGGULAN EFISIENSI RATA-RATA ALGORITMA

Skenario	Efisiensi rata-rata		Persentase Keunggulan ACO
	ACO	PSO	
kasus 1	99,3749	89,6904	9,68
kasus 2	98,2147	94,9918	3,22
kasus 3	97,7325	98,8658	-1,13
kasus 4	99,2406	99,999	-0,76
kasus 5	99,9995	95,3655	4,63
kasus 6	99,9995	97,2366	2,76
Rata-rata Persentase			1,58

Dari 6 skenario kasus, efisiensi algoritma ACO lebih unggul 1,58% dari algoritma PSO. Algoritma PSO mempunyai efisiensi rata-rata lebih buruk karena sering terjebak dalam maksimum local. Algoritma ACO lebih cocok untuk pelacakan banyak puncak karena tidak mudah terjebak dalam maksimum local.

TABEL 18.
PERSENTASE KEUNGGULAN WAKTU TRACKING

Skenario	Waktu Tracking (s)		Persentase Keunggulan	
	ACO	PSO	ACO-PSO	PSO-ACO
kasus 1	0,287	0,725	0,44	-0,44
kasus 2	1,781	0,645	-1,14	1,14
kasus 3	1,325	0,707	-0,62	0,62
kasus 4	1,908	0,677	-1,23	1,23
kasus 5	1,481	0,746	-0,74	0,74
kasus 6	2,237	0,837	-1,40	1,40
Rata-rata Persentase			-0,78	0,78

Banyaknya koefisien yang mengontrol dalam pelacakan menyebabkan algoritma ACO lebih lambat 0,78 s dalam waktu pelacakan dibandingkan dengan algoritma PSO.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh oleh simulasi MPPT menggunakan algoritma ACO dan PSO, efisiensi rata-rata algoritma ACO sebesar 99,0936% dalam 6 kasus dan 10 kali percobaan dari setiap kasus. Waktu pelacakan 0,78 s lebih lambat dari PSO. Efisiensi rata-rata algoritma PSO 97,5086% dalam 6 kasus dan 10 kali percobaan dari setiap kasus. Waktu pelacakan 0,78 s lebih cepat dari ACO. Algoritma ACO mempunyai efisiensi rata-rata keseluruhan yang lebih unggul 1,58% dari PSO, tetapi mempunyai waktu pelacakan 0,78 s lebih

lama dari algoritma PSO.

REFERENCES

- [1] Ishaque, K., Salam, Z., Amjad, M., & Mekhilef, S. 2012. *An Improved Particle Swarm Optimization (PSO)-Based MPPT for PV With Reduced Steady-State Oscillation*. IEEE Transactions On Power Electronics, 3627.
- [2] Zhang, Q., Sun, X., Zhong, Y., & Matsui, M. 2009. "A Novel Topology for Solving the Partial Shading Problem in Photovoltaic Power Generation System". IEEE, 2130-2135.
- [3] Khanaki, R., Radzi, M. A., & Marhaban, M. H. 2013. *Comparison of ANN and P&O MPPT Methods for PV Applications under Changing Solar Irradiation*. Clean Energy and Technology (CEAT) (hal. 287-292). Selangor, Malaysia: IEEE.
- [4] Divyasharon, R., Banu, R. N., & Devaraj, D. 2019. *Artificial Neural Network based MPPT with CUK Converter Topology for PV Systems Under Varying Climatic Conditions*. IEEE.
- [5] Yetayew, T. T., Jyothsna, T. R., & Kusuma, G. 2016. *Evaluation of Incremental Conductance and Firefly Algorithm for PV MPPT Application under Partial Shade Condition*. IEEE.
- [6] K. H. Chao, Y. S. Lin and U. D. Lai. 2015. "Improved Particle Swarm Optimization for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Module Arrays," Applied Energy 158, pp. 609-618
- [7] Purnomo, H. D. 2014. Cara Mudah Belajar Metode Optimasi Metaheuristik Menggunakan Matlab. Yogyakarta: GAVA MEDIA.
- [8] Yang, X. S. 2010. *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms Second Edition*. United Kingdom: Luniver Press.
- [9] Hindriyanto, D.P. 2014. Belajar metode Optimasi Metaheuristik Menggunakan Matlab. Yogyakarta: Gava Media.
- [10] Suyanto. 2017. *Swarm Intelligencea Komputasi Modern untuk Optimasi*. Bandung: Informatika