



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PENINGKATAN PERFORMANSI MPPT PADA
SOLAR ENERGY STATION BERBASIS ANT COLONY
OPTIMIZED FUZZY LOGIC ALGORITHM**

RAIHAN SERGI PERDANA
NRP. 02311640000009

Dosen Pembimbing:
Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

***ENHANCEMENT OF MPPT PERFORMANCE
ON SOLAR ENERGY STATION USING ANT COLONY
OPTIMIZED FUZZY LOGIC ALGORITHM***

RAIHAN SERGI PERDANA
NRP. 0231164000009

Supervisor:
Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.

*Department Of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020*

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Raihan Sergi Perdana
NRP : 02311640000009
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini, menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul ‘‘Peningkatan Performansi MPPT pada *Solar Energy Station* Berbasis *Ant Colony Optimized Fuzzy Logic Algorithm*’’ adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 04 April 2020
Yang membuat pernyataan,



Raihan Sergi Perdana
NRP. 02311640000009

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

**PENINGKATAN PERFORMANSI MPPT PADA SOLAR
ENERGY STATION BERBASIS ANT COLONY OPTIMIZED
FUZZY LOGIC ALGORITHM**

Oleh:


Raihan Sergi Perdana

NRP. 02311640000009

Surabaya, 2 Agustus 2020

Menyetujui,

Pembimbing



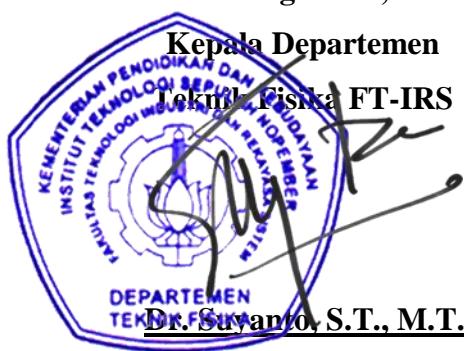
Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.

NIP. 19761006 199903 1 002

Mengetahui,

Kepala Departemen

Lekti Fisika FT-IRS



Dr. Syafrano, S.T., M.T.

NIP. 19711113 199512 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

PENINGKATAN PERFORMANSI MPPT PADA *SOLAR ENERGY STATION* BERBASIS ANT COLONY OPTIMIZED FUZZY LOGIC ALGORITHM

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

pada

Progam Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FT-IRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

RAIHAN SERGI PERDANA

NRP. 02311640000009

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.

(Pembimbing)

2. Dr. Ir. Ali Musyafa, M.Sc.

(Ketua Penguji)

3. Dr. Ir. Ronny Dwi Noriyati, M.Kes.

(Penguji I)

4. Dyah Sawitri, S.T., M.T.

(Penguji II)

5. Irwansyah, S.T., M.T., M.Phil., Ph.D.

(Penguji III)

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PENINGKATAN PERFORMANSI MPPT PADA SOLAR
ENERGY STATION BERBASIS ANT COLONY OPTIMIZED
FUZZY LOGIC ALGORITHM**

Nama : Raihan Sergi Perdana
NRP : 02311640000009
Departemen : Teknik Fisika FT-IRS ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.

ABSTRAK

Dilakukan penelitian mengenai implementasi Maximum Power Point Tracking (MPPT). Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan metode MPPT yang lebih baik daripada metode MPPT konvensional (P&O), agar dapat mengeliminasi kelemahan metode MPPT konvensional tersebut. Dilakukan perancangan kontrol MPPT berbasis sistem Fuzzy (FLC-MPPT) dan sistem kontrol MPPT berbasis sistem Fuzzy yang di-optimisasi dengan algoritma Ant Colony Optimization (ACO-FLC MPPT). ACO-FLC MPPT melampaui beberapa kriteria performansi FLC-MPPT, seperti pada pengujian *Varying Irradiance*, menghasilkan Avg. Ess berturut-turut 0.3%, 0.1%, dan 0.34% lebih rendah dari FLC-MPPT. Pada uji *Varying Temperature* kami dapatkan penurunan akurasi akibat kenaikan temperatur, dengan penurunan akurasi sebesar 2.3% dan 1.9% pada ACO-FLC MPPT dengan kenaikan temperatur 25-30 °C dan 30-35 °C, lebih baik daripada P&O namun sedikit dibelakang FLC-MPPT. ACO-FLC MPPT menghasilkan performansi dan efisiensi terbaik secara umum, namun belum dapat melampaui FLC-MPPT pada beberapa kriteria.

Kata Kunci: PV, MPPT, Optimisasi, Performansi, Efisiensi

Halaman ini sengaja dikosongkan

***ENHANCEMENT OF MPPT PERFORMANCE ON SOLAR
ENERGY STATION USING ANT COLONY OPTIMIZED FUZZY
LOGIC ALGORITHM***

Name : Raihan Sergi Perdana
NRP : 02311640000009
Department : Engineering Physics FT-IRS ITS
Supervisors : Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.

ABSTRACT

Research on the implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) on PV systems was conducted. This study aims to produce a better MPPT method than conventional MPPT (P&O) methods, in order to eliminate the weaknesses of said conventional MPPT method. The design of MPPT control is based on Fuzzy system (FLC-MPPT) and the MPPT control system based on Fuzzy system is optimized with the Ant Colony Optimization algorithm (ACO-FLC MPPT). The MPPT ACO-FLC exceeds several of FLC-MPPT's performance criteria, such as in the Varying Irradiance test, resulting in Avg. Ess respectively 0.3%, 0.1%, and 0.34% lower than FLC-MPPT. In the varying temperatur test, we saw accuracy degradation as temperatur rose, with a decrease of 2.3% and 1.9% accuracy with ACO-FLC MPPT in 25-30 °C and 30-35 °C rise, besting P&O-MPPT but slightly behind FLC-MPPT. The proposed MPPT ACO-FLC was better almost in all performance and efficiency test, but still could not exceed the FLC-MPPT on some criteria.

Keywords: PV, MPPT, Optimization, Performance, Efficiency

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Allah Ta’ala yang telah memberi ‘ilmu dan izin atas kemudahan yang Ia berikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan laporan penelitian ini. Tidak lupa penulis menyampaikan banyak terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Suyanto, sebagai Kepala Departemen Teknik Fisika FT-IRS ITS,
2. Dosen pembimbing penelitian, Dr. Imam Abadi, S.T, M.T,
3. Dr. Katherin sebagai sekretaris Departemen yang telah banyak membantu perihal administrasi skripsi dan kelulusan,
4. Kepala Laboratorium Pengukuran, Keandalan, Resiko, dan Safety, beserta jajaran dosen laboratorium juga seluruh dosen penguji,
5. Dila, Agam, Kartini dan Ira untuk moral support-nya dikala merasa sulit, dan seluruh rekan se-penelitian saya dibawah Dr. Imam, serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.
6. Yang terakhir namun yang terpenting, kedua orang tua saya dan segenap keluarga yang telah mendukung dan menopang saya dalam menjalani masa perkuliahan sampai lulus.

Semoga laporan penelitian ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya.

Surabaya, 2 Agustus 2020

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
COVER PAGE.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
ABSTRAK	xi
ABSTRACT.....	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Laporan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 <i>Solar Energy System/Station</i>	5
2.2 Panel Surya.....	6
2.3 <i>DC-DC Converter</i>	9
2.4 <i>Maximum Power Point Tracking (MPPT)</i>	12
2.5 Sistem Logika Fuzzy	14
2.6 <i>Ant Colony Optimization</i>	18

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Studi literatur	22
3.2 Penentuan Parameter dan Perancangan MPPT (P&O)	22
3.3 Perancangan Sistem Kontrol MPPT berbasis <i>Fuzzy</i> dan Pendefinisian Parameternya	22
3.4 Optimisasi Parameter <i>Membership Function</i>	26
3.5 ACO-FLC	28
3.6 Hasil Optimisasi.....	30
3.7 Pengambilan Data	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
4.1 Perbandingan Performansi Hasil Optimisasi dengan Fuzzy-MPPT dan MPPT Konvensional.....	35
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	49
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran	50
DAFTAR PUSTAKA.....	51
LAMPIRAN	55
BIODATA PENULIS	66

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Sistem PV pada <i>Solar Energy System</i>	5
Gambar 2.2 Panel Surya	7
Gambar 2.3 Pemodelan single-diode dari PV	8
Gambar 2.4 Contoh Buck-Boost Converter	9
Gambar 2.5 Algoritma teknik <i>Perturb & Observe</i>	14
Gambar 2.6 Sistem Logika Fuzzy	15
Gambar 2.7 Beberapa variasi jenis MF	17
Gambar 2.8 <i>Fuzzy Rule Base</i>	17
Gambar 2.9 Pseudocode Metaheuristic ACO.....	19
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	22
Gambar 3.2 Pemodelan Fuzzy-MPPT	23
Gambar 3.3 Fungsi Keanggotaan E(k)	24
Gambar 3.4 Fungsi Keanggotaan CE(k).....	25
Gambar 3.5 Fungsi Keanggotaan Output <i>STEP</i>	25
Gambar 3.6 Grafik <i>pheromone matrix</i>	28
Gambar 3.7 Algoritma ACO yang Digunakan	29
Gambar 3.8 Plot <i>Membership Function Error</i>	31
Gambar 3.9 Plot <i>Membership Function Change of Error</i>	31
Gambar 3.10 Plot <i>Membership Function Error Post-Optimization</i>	32
Gambar 3.11 Plot Membership Function Change of Error Post-Optimization ...	33
Gambar 4.1 Output Power Pada Irradiansi 600 W/m ²	36
 Gambar 4.2 Output Power Pada Irradiansi 600 W/m ² Kondisi Steady (Diperbesar)	
.....	37
Gambar 4.3 Output Power Pada Irradiansi 800 W/m ²	38
Gambar 4.4 Output Power Pada Irradiansi 800 W/m ² Kondisi Steady (Diperbesar)	
.....	39
Gambar 4.5 Output Power PV Pada Irradiansi 1000 W/m ²	40
Gambar 4.6 Output Power Pada Irradiansi 1000 W/m ² Kondisi Steady (Diperbesar).....	41

Gambar 4.7 Output Power PV Pada Irradiansi 900 W/m ²	42
Gambar 4.8 Output Power Pada Irradiansi 900 W/m ² Kondisi Steady (Diperbesar).....	43
Gambar 4.9 Output Power Pada Irradiansi 700 W/m ²	44
Gambar 4.10 Output Power Pada Irradiansi 700 W/m ² Kondisi Steady (Diperbesar).....	44
Gambar 4.11 <i>Error</i> Steady State Rata-rata	45
Gambar 4.12 Besar Peak-To-Peak Osilasi Daya	46
Gambar 4.13 Degradasi Akurasi Akibat Kenaikan Suhu	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan metode MPPT.....	13
Tabel 2.2 Beberapa tipe MF dan Parameternya	18
Tabel 3.1 Nilai Parameter Algoritma ACO	26
Tabel 3.2 Parameter <i>Membership Function Error</i> (Fuzzy).....	30
Tabel 3.3 Parameter Function Change of Error (Fuzzy)	30
Tabel 3.4 Parameter Membership Function Error Post-Optimization.....	31
Tabel 3.5 Parameter Membership Function Change of Error Post-Optimization	32
Tabel 4.1 Performansi Daya Pada Irradiansi 600 W/m ²	37
Tabel 4.2 Performansi PV Pada Irradiansi 800 W/m ²	39
Tabel 4.3 Performansi PV Pada Irradiansi 1000 W/m ²	41
Tabel 4.4 Performansi PV Pada Irradiansi 900 W/m ²	43
Tabel 4.5 Performansi PV Pada Irradiansi 700 W/m ²	45

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PV (*Photovoltaic*) atau yang lebih umum disebut sebagai panel surya merupakan alat yang digunakan dalam rangka konversi energi surya (cahaya matahari) menjadi energi listrik pada *Solar Energy System*. *Solar Energy System* merupakan satu kesatuan dari komponen-komponen yang ter-integrasi berfungsi untuk memanfaatkan energi panas/cahaya surya untuk dijadikan energi listrik. Energi surya merupakan salah satu sektor dari Energi Baru Ter-barukan (EBT) yang sering dipilih dalam pembangkitan listrik di berbagai wilayah Indonesia karena kelebihannya dalam mendukung pelestarian lingkungan. Selain itu, sektor energi surya dengan implementasi PV menawarkan beberapa kelebihan, seperti pembangkitannya yang relatif sederhana dibandingkan sistem pembangkitan listrik sektor lain. Namun PV dalam implementasinya saat ini diketahui memiliki efisiensi konversi yang rendah dan dana perakitan sistem awal tersebut cukup mahal (Adly & Besheer, 2012). Dalam mengatasi beberapa hambatan implementasi PV pada *Solar Energy System* seperti hal-hal yang telah disebutkan, telah banyak dikembangkan teknik peningkatan efisiensi daya PV, salah satunya yaitu MPPT atau *Maximum Power Point Tracking*.

Menurut beberapa sumber seperti (Adly & Besheer, 2012) dan (Gomes de Brito, Galotto, P. Sampaio, e Melo, & Canesin, 2013) bahwa terdapat beberapa metode dasar/konvensional dari proses MPPT, seperti *Perturb & Observe* (P&O), *Incremental Conductane*, *Fractional Open-Circuit Voltage*, *Constant-Voltage*, dan lainnya. Masing-masing metode memiliki satu tujuan, yaitu untuk melacak titik MPP dari system PV lalu mengarahkan system pada titik operasi tersebut. Lebih jauh lagi, telah banyak dikembangkan metode MPPT konvensional yang dioptimalkan menggunakan teknik AI (Artificial Intelligence) dan juga swarm-based optimization. Riset menunjukkan bahwa system kontrol berbasis *Fuzzy* dapat digunakan, menghasilkan osilasi yang lebih kecil dan performansi yang lebih baik pada PV (Noman, 2012). *Adaptive Neuro Fuzzy* atau ANFIS juga telah diteliti

implementasinya untuk MPPT, menghasilkan efisiensi yang lebih baik daripada non-MPPT systems (Abadi, Imron, Mardlijah, & Noriyati, 2018). Teknik swarm-based optimization seperti GA (Borni, 2017) dan PSO (Liu, 2012) juga telah terbukti dapat meningkatkan kestabilan, respon, dan efisiensi PV dari MPPT teknik konvensional/non-optimized. Algoritma optimisasi lain seperti ACO dan *Bees Algorithm* masih jarang ditemukan pada teknik MPPT.

Dari banyak metode MPPT yang tersedia, metode konvensional P&O adalah salah satu metode yang paling umum ditemukan, sederhana implementasinya, dan menawarkan akurasi MPP yang cukup baik. Namun metode MPPT P&O memiliki kelemahan utama pada error steady-state nya yang terus ber-oscilasi disekitar MPP karena diberikan *perturbation* pada tiap siklus MPPT (Go, 2014), sehingga menyebabkan power-loss dan penurunan efisiensi. Pada teknik P&O juga perlu dilakukan adjustment rate variasi tegangan untuk mendapatkan hasil yang seimbang antara respon yang cepat dan fluktuasi rendah pada steady state (Li & Zheng, 2010), (N.Femia, 2005).

Berdasarkan permasalahan diatas, pada tugas akhir ini penulis berupaya merancang sistem kontrol MPPT pada PV yang terpasang pada *Solar Energy Station/System* dengan menggunakan system inferensi Fuzzy pada kontroller dengan optimisasi parameter menggunakan algoritma Ant-Colony (ACO), teknik optimisasi berbasis *swarm* yang masih jarang ditemukan pada MPPT. Dari desain yang diajukan pada penelitian ini, diharapkan terdapat peningkatan performansi dan efisiensi daripada teknik MPPT P&O konvensional, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dari konversi Energy pada sistem PV pada *Solar Energy System/Station*.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun permasalahan yang diangkat berdasarkan latar belakang di atas sebagai berikut:

- a. Apa parameter perancangan system kontrol MPPT pada *Solar Energy Station*?
- b. Bagaimana menentukan parameter kontrol Fuzzy yang akan di-optimisasi menggunakan *Ant Colony Optimization*?

- c. Bagaimana parameter dan performansi kontrol MPPT berbasis *Ant Colony Optimized-Fuzzy Logic Algorithm*?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah merancang sistem kontrol pada proses MPPT berbasis pada algoritma optimisasi *Fuzzy-Ant Colony* dan membandingkan performansi dan efisiensi PV dengan kontrol MPPT tersebut dengan kontrol Fuzzy-based MPPT dan juga MPPT konvensional (P&O).

1.4 Batasan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah, maka batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Panel surya yang digunakan adalah ST Solar tipe *Polycrystalline*
- b. Spesifikasi Panel surya yang digunakan; Pmax 250W, Vmp 30V, Imp 8.34V, Voc 36.8V, Isc 9 A.
- c. Sistem PV pada penelitian ini merupakan sistem PV *Standalone off-grid*.
- d. Metode MPPT konvensional yang digunakan sebagai perbandingan performansi adalah *Perturb & Observe* (P&O).
- e. DC-DC Converter tidak menstabilkan tegangan.
- f. Pemodelan, simulasi, dan pengujian dilakukan pada lingkungan MATLAB dan Simulink.
- g. Metode Inferensi *Fuzzy* yang digunakan adalah metode inferensi Mamdani.

1.5 Sistematika Laporan

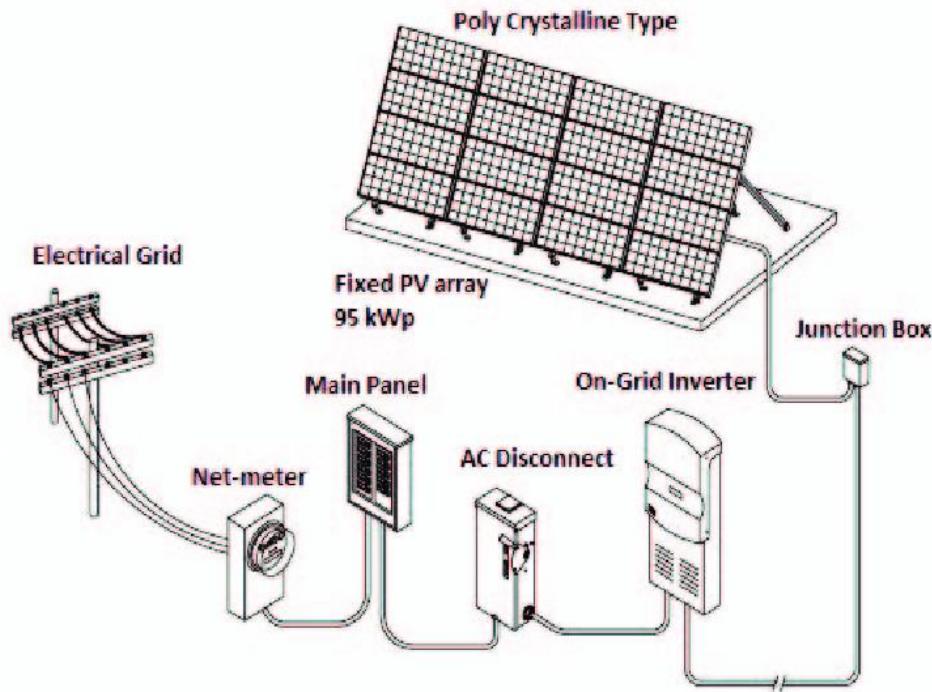
Inti laporan dimulai pada Bab I yang berisi pendahuluan, terdiri dari latar belakang, permasalahan, serta tujuan yang ingin dicapai. Selanjutnya Bab II berisi mengenai prinsip dan landasan teori dasar yang diperlukan pada pelaksanaan tugas akhir ini. Bab III menjelaskan metodologi dari tugas akhir ini sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai. Bab IV berisi mengenai diskusi dan pembahasan analisa daripada data yang didapatkan pada penelitian, dan Bab V yaitu penutup yang merangkum hasil pada Bab IV dan saran yang diberikan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Solar Energy System/Station



Gambar 2.1 Skema Sistem PV pada *Solar Energy System* (Moses, 2018)

Solar Energy System merupakan istilah yang merujuk kepada suatu seperangkat alat yang terintegrasi (sistem) yang berfungsi untuk memanfaatkan energi bersumber dari matahari untuk dijadikan energi listrik, baik itu energi panas (*thermal*) maupun cahaya (*photon*). *Solar Energy System* meliputi komponen-komponen seperti kolektor yang berfungsi sebagai penyerap energi solar yang mengkonversi radiasi solar, lalu unit penyimpanan energi untuk menampung hasil energi yang dihasilkan kolektor dan menyalurkannya ketika dibutuhkan (Duffie, 1981). Dua bentuk energi yang umum dimanfaatkan oleh *Solar Energy System* adalah energi cahaya matahari dan energi panas matahari. Pada kasus pemanfaatan energi cahaya, *photovoltaic* (PV) digunakan sebagai kolektor. PV mengkonversi energi cahaya menjadi listrik yang kemudian distabilkan oleh *charger* lalu umumnya disimpan di baterai. Energi dari baterai kemudian dapat dimanfaatkan

untuk peralatan listrik rumah menggunakan *Inverter*. Seiring berkembangnya teknologi dan kebutuhan energi, harga PV menjadi lebih rendah di pasaran dan menjadi tersedia untuk sistem yang lebih kecil (Hoppmann, 2018) sehingga popularitas *Solar Energy System* meningkat, seperti sistem PV rumahan yang menggabungkan *Solar Energy System* dengan main grid (grid-connected).

2.2 Panel Surya

Sel surya atau Fotovoltaik merupakan suatu alat yang dapat meng-konversi energi cahaya matahari (solar) menjadi energi listrik, baik secara langsung via efek fotovoltaik maupun secara tidak langsung dengan cara konversi awal menjadi energi panas atau energi kimia (Swami, 2012). Sel surya umumnya dirangkai dalam jumlah banyak dengan cara seri dan parallel pada panel surya. Panel surya utamanya banyak digunakan pada pembangkitan listrik energi terbarukan dan peralatan elektronik, seperti kalkulator, sampai pada pengembangan mobil dan kapal listrik. Jumlah energi listrik yang dihasilkan dari proses konversi pada sel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor penting, seperti jenis material fotovoltaik yang digunakan (Chikate & Sadawarte, 2015), (Lin, 2015); irradansi cahaya yang tertangkap (Chikate & Sadawarte, 2015); temperatur; dan karakteristik load (Koustroulis, Kostas, & Voulgaris, 2001). Menurut serangkaian penelitian yang terus dilakukan oleh banyak peneliti di seluruh dunia, efisiensi sel surya telah meningkat sampai ke angka 46.1% untuk jenis 4-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs (Dimroth, et al., 2016). Sel surya sendiri tidak hanya dapat digunakan dalam pembangkitan energi listrik, namun juga dapat digunakan sebagai photodetector, pada instrument berupa sensor maupun pengukur intensitas cahaya. Operasi dari sel surya atau PV berdasarkan pada 3 hal dasar, yaitu absorpsi cahaya, pemisahan 2 jenis pembawa muatan yang berlawanan, dan ekstraksi pembawa muatan ke sirkuit eksternal. Operasi dari sel surya dan pemilihan jenisnya juga tidak terlepas dari kelebihan dan kekurangan yang dimiliki.

Beberapa kelebihan dari sel surya adalah :

- a. Sistem pembangkit listrik yang ramah lingkungan
- b. Energi sumber tidak akan habis

- c. Sel surya dapat digunakan hampir di seluruh tempat (asalkan terdapat cahaya)
- d. *Cost maintenance* yang relatif rendah

Kelemahan, di antaranya adalah :

- a. *Initial Cost* yang relatif tinggi
- b. Efisiensi konversi Energy masih tergolong rendah
- c. Tidak beroperasi pada waktu malam

Efisiensi konversi energi pada sel surya diberikan pada persamaan berikut,

$$\eta = \frac{P_{max}}{EAc} \quad (2.1)$$

dengan P_{max} = Maximum Power Point (W), E = iradiansi cahaya (W/m^2), dan Ac sebagai luas permukaan (m^2). Efisiensi juga dipengaruhi oleh temperatur modul PV (Chikate & Sadawarte, 2015).

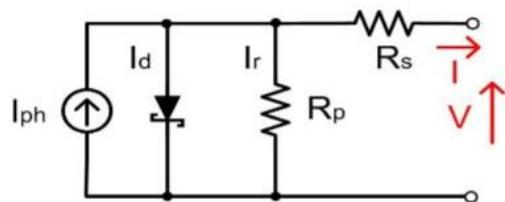


Gambar 2.2 Panel Surya (Assis & Mathew, 2015)

Sel Surya meng-konversi Energy cahaya matahari menjadi Energy listrik secara langsung. Sifat khusus material yang digunakan pada Sel Surya memungkinkan terjadinya arus listrik karena perpindahan muatan (elektron). Berikut ini urutan yang terjadi pada proses konversi Energy cahaya matahari pada sel surya.

- a. Elektron harus mengalir/berpindah agar dapat menciptakan arus listrik. Secara definisi arus listrik adalah perubahan muatan pada suatu titik terhadap waktu. Foton dengan Energy yang cukup ($E \geq E_{gap}$) pada cahaya matahari yang datang (iradiansi cahaya) akan meng-eksitasi elektron dari tempatnya, sehingga terjadilah sisi material yang mengalami kekurangan elektron dan kelebihan elektron. Atom-atom pada sisi material positif maka memiliki hole, sedangkan material sisi negatif memiliki kelebihan elektron.
- b. Kumpulan elektron dan hole bergerak melewati *junction*, dan terjadilah *charge separation*. Elektron-elektron yang bebas ini lalu mengalir kearah beban sampai kembali lagi menuju sisi positif material dan berkombinasi dengan hole.

Sel surya atau fotofoltaik sejatinya merupakan suatu dioda yang memiliki karakteristik khusus. Berikut ini pemodelan single-diode dari fotovoltaik (Abadi, Imron, Mardlijah, & Noriyati, 2018).



Gambar 2.3 Pemodelan single-diode dari PV (Abadi, Imron, Mardlijah, & Noriyati, 2018)

Penurunan persamaan dari model pada gambar 2.2 dapat dilakukan berdasarkan hukum Kirchoff pada node sirkuit

$$I = I_{ph} - I_d \quad (2.2)$$

I_d yaitu arus pada diode diberikan oleh persamaan Shockley (Durgadevi, Arulselvi, & Natarajan, 2011).

$$I_d = I_{ph} - I_o \left[\exp \left(\frac{q(V + I R_s)}{\gamma k T_c} \right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Persamaan (2.3) lalu di-subtitusikan ke persamaan (2.2), menjadi

$$I = IL - Io \left[\exp \left(\frac{q(V + IRS)}{\gamma kTc} \right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

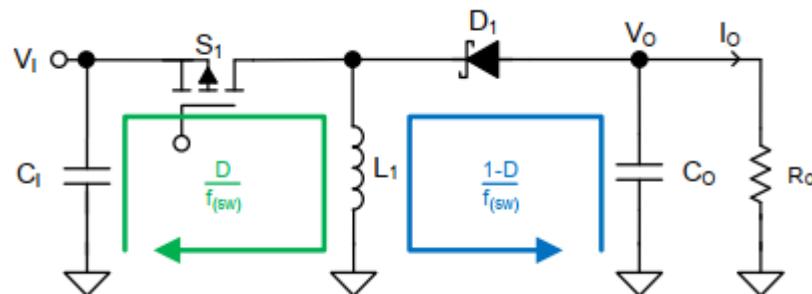
namun persamaan 2.4 belum mewakili faktor-faktor lainnya, sehingga nilai I_o dan I_L perlu didefinisikan seperti berikut

$$Io = I_{O,REF} \left(\frac{T_c}{T_{C,REF}} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{qEg}{k\gamma} \right) \left(\frac{1}{T_{C,REF}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (2.5)$$

$$I_L = \left(\frac{G}{G_{REF}} \right) [I_{L,REF} + \mu_{ISC}(T_c - T_{C,REF})] \quad (2.6)$$

dimana Eg adalah Energy gap, G irradiasi, G_{REF} irradiasi pada kondisi standar, $I_{L,REF}$ arus fotoelektrik pada kondisi standar, $T_{C,REF}$ adalah temperatur modul pada kondisi standar, μ_{ISC} koefisien temperatur arus *short-circuit* (Durgadevi, Arulselvi, & Natarajan, 2011).

2.3 DC-DC Converter



Gambar 2.4 Contoh Buck-Boost Converter (Weiss, 2017)

DC-DC *Converter* merupakan suatu rangkaian elektronika atau suatu divais elektro-mekanik yang berfungsi sebagai penguat ataupun pelemah tegangan sumber DC. *Converter* merupakan salah satu bagian dari sistem kontrol *feedforward* pada MPPT, dimana karakteristik beban *converter* yang akan mempengaruhi daya output panel surya. Selain itu, *converter* juga menjadi elemen pengkondisian tegangan output panel surya sebelum memasuki baterai (*off-grid*). Output dari *converter* juga

merupakan arus DC. Range operasional suatu converter sangat beragam satu sama lain tergantung topologi dan pengaplikasiannya. *Converter* digunakan pada mulai dari sirkuit kecil dengan suplai baterai sampai dengan sirkuit yang membutuhkan tegangan dan arus sangat tinggi seperti pada unit power supply (PSU) yang dapat menghasilkan daya tinggi. Contoh umum penggunaan *converter* yaitu pada PSU yang digunakan pada *personal computer*, dimana PSU memiliki 1 input dan multi-output. Input PSU ini adalah tegangan listrik jaringan PLN (*mains*) sedangkan outputnya beragam sesuai kebutuhan komponen-komponen yang ada pada komputer. Kebutuhan ini terbagi menjadi beberapa *rail* (jalur tegangan), 3.3V, 5V, dan 12V. Hal tersebut merupakan hasil dari konversi boost ataupun buck dari *converter* pada PSU.

Input dari *converter* merupakan tegangan tidak konstan (*un-regulated*). Pada gambar diatas, V_g adalah input tegangan *un-regulated*. *Switch* dengan frekuensi tertentu berfungsi sebagai pengatur output tegangan yang di-inginkan. *Switch* dapat berupa transistor, MOSFET, IGBT, atau ragam lainnya. *Switch* menerima input dalam bentuk sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) dengan *duty-cycle* tertentu agar dapat mengatur frekuensi on-off nya. Sehingga, *duty-cycle* mengatur output tegangan dari *converter*. *Low-Pass Filter* digunakan dalam rangka mengurangi harmonic frekuensi tinggi (Erickson).

Dalam rangka men-design suatu *converter* perlu kembali kepada tujuan daripada penggunaan *converter* yang akan dirancang, beberapa aspek seperti pengendalian tegangan output, rentang frekuensi, *voltage drop*, dan seterusnya perlu dipertimbangkan.

Maksimum *duty cycle* yang diperlukan pada *Buck-Boost Converter* dapat dihitung dengan persamaan berikut (Weiss, 2017)

$$D = \frac{-V_O + V_F}{-V_O + V_F + V_{I(\min)}} \quad (2.7)$$

Menyederhanakan persamaan diatas, dihasilkan persamaan rasio konversi DC

$$\frac{V_O}{V_I} = \frac{-D}{1-D} \quad (2.8)$$

Arus output maksimum dari *converter* dibatasi oleh kapabilitas internal switching dari switching element.

$$I_{OM} = (I_{(SW)(min)(lim)} + \frac{I_{(L1)(PP)}}{2}) \left(\frac{V_{I(min)}}{V_{I(min)} + V_F - V_O} \right) \quad (2.9)$$

Dimana $I_{(SW)(min)(lim)}$ adalah batas minimum arus switching. Setelah itu dilakukan estimasi besar induktansi yang dibutuhkan dan arus maksimum induktor, menggunakan persamaan berikut

$$L1 = \frac{V_ID}{I_{(L1)(PP)}f_{(SW)}} \quad (2.10)$$

$$I_{(L1)M} = I_{(SW)M} = I_{(L1)(AVG)} + \frac{I_{(L1)(PP)}}{2} \quad (2.11)$$

Selanjutnya, dilakukan pemilihan spesifikasi dioda penyearah dan kapasitor input. Pada dasarnya dioda penyearah yang akan digunakan harus dapat bertahan sampai arus maksimal output *converter*. Kapasitor diperlukan pada sisi input untuk menyimpan Energy dari input pada periode ketika Energy meluruh pada induktor ($\frac{1-D}{f_{sw}}$). Sehingga besar kapasitansi minimum untuk kapasitor input yaitu

$$C_{I(min)} = \frac{I_{(L1)(AVG)}D}{f_{(SW)}[V_{I(PP)} - (I_{(LI)(PP)}ESR_{CI})]} \quad (2.12)$$

Karena arus output *converter* juga mengalami diskontinuitas akibat perilaku dari *switch*, maka kapasitor juga diperlukan pada sisi output agar dapat men-suplai Energy untuk beban pada periode Energy pada inductor naik ($\frac{D}{f_{sw}}$). Dalam hal ini, perlu diketahui terlebih dahulu estimasi *output voltage ripple* $V_{O(PP)}$.

$$V_{O(PP)} = \frac{I_O D}{f_{(SW)} C_O} + \left(\frac{I_O}{1-D} + \frac{I_{(L1)(PP)}}{2} \right) ESR_{CO} \quad (2.13)$$

$$C_{O(min)} = \frac{I_O D}{f_{(SW)} \left[V_{O(PP)} - \left(\frac{I_O}{1-D} + \frac{I_{(L1)(PP)}}{2} \right) ESR_{CO} \right]} \quad (2.14)$$

2.4 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Maximum Power Point Tracking atau yang sering disingkat menjadi MPPT merupakan suatu proses atau teknik yang bertujuan untuk mencari titik daya output tertinggi dari fotovoltaik pada kondisi tertentu dan mempertahankannya secara kontinyu. Pada dasarnya teknik ini akan mendekatkan nilai resistansi pada terminal fotovoltaik dengan resistansi yang optimum (Abadi, Imron, Mardlijah, & Noriyati, 2018), diberikan oleh persamaan berikut yaitu (Kolsi, Samet, & Amar, 2014)

$$R_{opt} = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (2.15)$$

MPPT memiliki ragam jenis metode, beberapa metode yang sering digunakan adalah metode *Perturb & Observe* (P&O), *Incremental Conductance* (IC), dan *Constant Voltage*. Dari ketiga metode yang telah disebutkan, P&O lebih sering ditemui pada teknik MPPT karena implementasinya relatif sederhana dan perhitungan yang dilakukan tidak kompleks sehingga meringankan beban kerja kontroler. P&O mengukur tegangan, arus, dan daya keluaran fotovoltaik. Kontroler P&O akan mengukur keluaran tegangan dari Fotovoltaik dan daya yang dihasilkan pada waktu t , dan membandingkannya dengan dengan daya sebelumnya, $t-1$. Jika tegangan pada saat t berbeda dengan tegangan pada saat $t-1$ dan daya keluaran pada t lebih besar daripada daya pada saat $t-1$, maka kontroler akan menggeser *operating point* pada arah tersebut (V++ atau V--). Ketika daya sudah mencapai maksimum ($P_t = P_{t-1}$) maka tegangan berhenti di-variasikan. Kelemahan dari metode P&O yaitu output tegangan dan daya cenderung ber-oscilasi disekitar titik maksimum (Gomes de Brito, Galotto, P. Sampaio, e Melo, & Canesin, 2013), sehingga memiliki *error steady-state*.

Metode lain yang sering ditemukan pada optimisasi efisiensi fotovoltaik yaitu *Incremental Conductance*, dimana kontroler IC mengukur tegangan dan daya pada saat t dan t-1, dan menghitung kemiringan daya versus tegangan. Ini didasari pada fakta bahwa titik maksimum (MPP) akan terletak pada garis kemiringan nol. Ketika kemiringan dP/dV bernilai positif, *operating point* digeser ke kanan, ketika bernilai negatif, *operating point* digeser ke kiri.

$$\frac{dP}{dV} = 0, \quad MPP \quad (2.16)$$

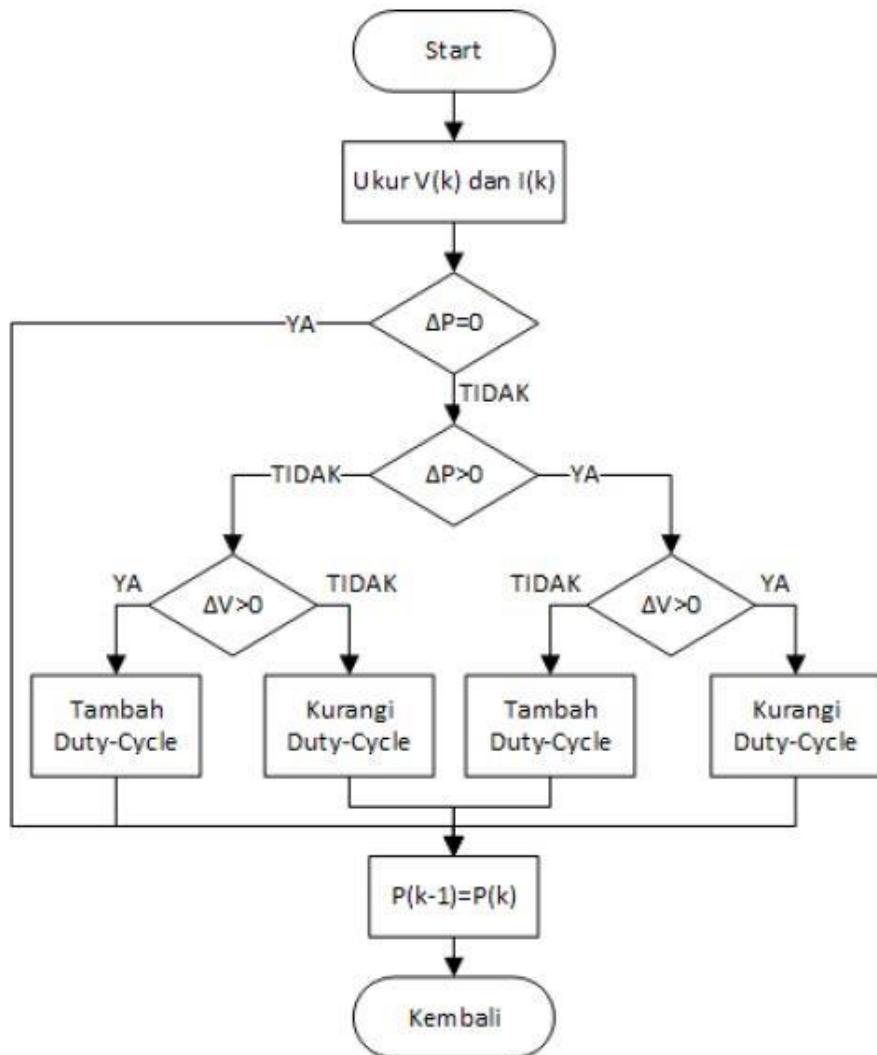
$$\frac{dP}{dV} < 0, \quad \text{disebelah kiri MPP} \quad (2.17)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0, \quad \text{disebelah kanan MPP} \quad (2.18)$$

Metode *Constant Voltage* merupakan metode MPPT yang paling sederhana dan menawarkan respon yang cepat. Pada metode ini tegangan output panel secara terus-menerus dimonitor dan di-kontrol mendekati nilai tegangan referensi yang sebelumnya telah di-tentukan. Kelemahan metode ini yaitu akurasinya dalam MPPT dinilai kurang terlebih pada kondisi temperatur yang berubah-ubah. Perbandingan dari beberapa metode MPPT dapat disimpulkan menjadi seperti pada table dibawah ini.

Tabel 2.1 Perbandingan metode MPPT (Murali & Jamuna, 2014)

MPPT	Speed	Complexity	Reliability	Implementation
Fractional V_{sc}	Medium	Medium	Low	Digital/Analog
Fractional I_{sc}	Medium	Low	Low	Digital/Analog
Incremental Conductance	Varies	Medium	Medium	Digital
Hill Climbing	Varies	Low	Medium	Digital/Analog
Fuzzy Logic	Fast	High	Medium	Digital



Gambar 2.5 Algoritma teknik *Perturb & Observe* (Effendy, 2016)

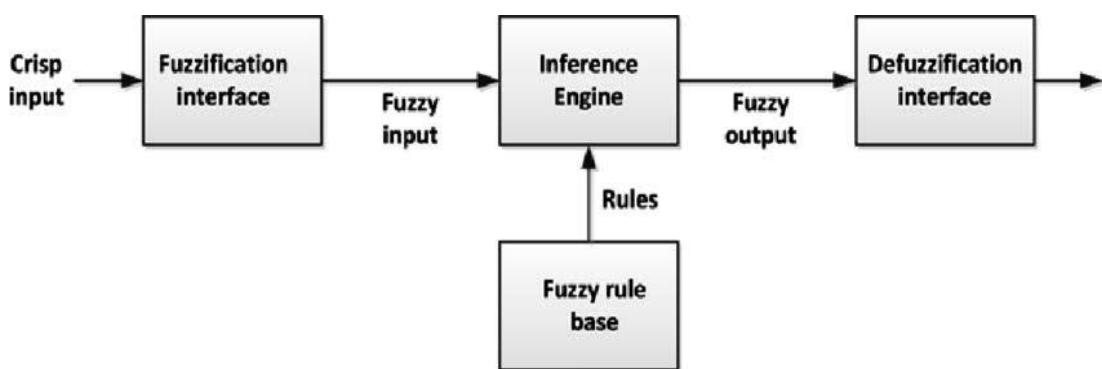
2.5 Sistem Logika Fuzzy

Fuzzy secara Bahasa yaitu “kabur”, yang berarti pada representasi kesimpulan logis-nya tidak hanya terbatas pada 1 sebagai “benar” dan 0 sebagai “salah”, namun dapat terletak diantara keduanya. Kontras dengan system logika konvensional yaitu boolean dimana representasi-nya hanya memungkinkan nilai 1 dan 0.

Prinsip ini dikemukakan pertamakali oleh Professor Lotfi A. Zadeh dari University of California di Berkeley. Zadeh menjelaskan mengenai “fuzzy sets” atau himpunan fuzzy, yang mendasari model matematis teori himpunan fuzzy dan secara luas logika fuzzy. Penemuan ini didasari pada fakta bahwa tak peduli secepat

apapun mesin komputer memproses suatu data, komputer hanya mengerti system logika konvensional dan tidak memahami konsep ke-buram-an seperti otak manusia. Otak manusia mengenal istilah “agak”, “seperti”, “lumayan”, namun komputer tidak dapat memahami konsep-konsep tersebut. Zadeh lalu menciptakan suatu prinsip yang dapat membuat mesin komputer dapat membedakan data “ke-abu-abuan”, mirip dengan cara berfikir manusia.

Sistem fuzzy setidaknya terdiri dari 4 komponen; *fuzzifier*, *inference engine*, *rule base*, dan *defuzzifier*. Diagram blok system logika fuzzy dapat dilihat pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.6 Sistem Logika Fuzzy

a. *Crisp Input*

Masukan berupa besara fisis atau bilangan real

b. *Fuzzification*

Fuzzification merupakan proses konversi input crisp kedalam bentuk sub-himpunan fuzzy. Output dari proses ini ter-korespondensi dengan input-nya, sehingga terdapat model matematis yang menghubungkan antara input crisp dengan output sub-himpunan fuzzy.

c. *Fuzzy Rule Base*

Rule base fuzzy digunakan untuk menghubungkan variable-variabel masukan dan keluaran. Rule base fuzzy didasari oleh hubungan Jika...Maka... atau If...Then... yang merujuk pada pemahaman manusia

mengenai suatu masalah dan mengolah variable untuk mencari solusi. Fuzzy rule base yang akan digunakan oleh inference engine dalam membuat desisi.

d. Inference Engine

Merupakan komponen yang melakukan pengambilan desisi. Pengambilan desisi akan dipengaruhi oleh rule base dan input. Output-nya berupa kesimpulan dari logika IF...THEN. Pada proses inferensi sendiri ada banyak jenis dan metodenya. Tiga metode inferensi yang paling banyak digunakan adalah metode inferensi Mamdani, Sugeno, dan Tsukamoto.

e. Defuzzification Interface

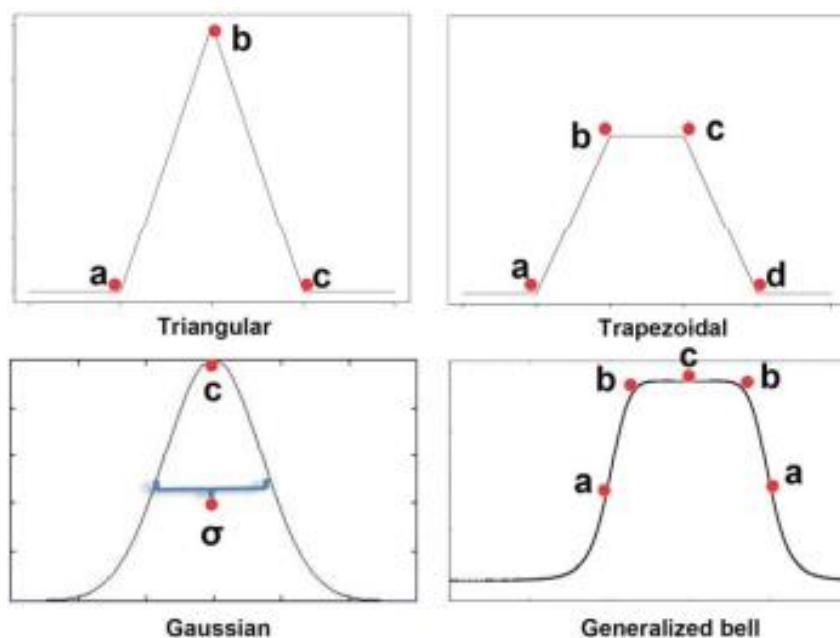
Pada FLC, tahap defuzzifikasi dilakukan untuk menghasilkan sinyal control berdasarkan desisi yang telah diambil, dalam bentuk sinyal crisp. Proses ini meng-interpretasi output desisi yang masih dalam bentuk sub-himpunan fuzzy menjadi output crisp agar dapat diterima oleh device eksternal. Metode defuzifikasi contohnya *Mean of Maximum* (MOM) dan metode bobot rata-rata (weighted average) atau Center of Area (atau Centroid).

Sistem inferensi pada *fuzzy* mengharuskan input yang berupa variable linguistik. Variable linguistik mustahil didapatkan dari input sinyal listrik analog maupun digital secara langsung, contohnya seperti input dari output sensor. Fuzzifikasi data *crisp* dilakukan dengan cara menghitung derajat keanggotaan input tersebut terhadap beberapa subset himpunan yang telah didefinisikan. Ini menyebabkan *soft transition* yang dikarakteristikan oleh derajat keanggotaan yang memberikan fleksibilitas kepada himpunan-himpunan *fuzzy* menggunakan ekspresi variable linguistik (contoh kecil, sedang, besar). Secara matematis ini dapat direpresentasikan sebagai berikut (Castillo, 2013)

$$A = [(x, \mu_A(x)) | x \in X] \quad (2.19)$$

dimana $\mu_A(x)$ disebut sebagai fungsi keanggotaan (*membership function*, MF) untuk

himpunan *fuzzy A*. Fungsi keanggotaan memetakan tiap elemen dari X pada range derajat keanggotaan 0-1 (Mizutani, 1997). Fungsi keanggotaan terbagi menjadi banyak jenis dan tiap jenis memiliki parameter tersendiri. Penentuan tipe fungsi keanggotaan tidak memiliki aturan, sehingga diperlukan kombinasi dari *trial-and-error* dan juga *knowledge* seorang perancang system *fuzzy* daripada plant terkait agar dapat memilih tipe yang paling optimal. Ini menjadi kelebihan sekaligus kekurangan daripada sistem kontrol berbasis logika *fuzzy*, karena perancangan oleh amatir tetap dapat dilakukan, namun menghasilkan sistem yang kurang *reliable*.



Gambar 2.7 Beberapa variasi jenis MF (Castillo, 2013)

Error →	VL	L	Z	H	VH
Change in error ↓					
VL	VL	VL	VL	H	VH
L	VL	L	Z	H	VH
Z	VL	Z	Z	H	VH
H	VL	H	H	H	H
VH	VL	VH	VH	VH	VH

Gambar 2.8 *Fuzzy Rule Base* (Varma, 2016)

Tabel 2.2 Beberapa tipe MF dan Parameternya (Castillo, 2013)

Tipe MF	Definisi Parameter	
	Parameter	Spesifikasi
Triangular	a, b, c	$\text{triangle}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \leq d \end{cases}$
Trapezoidal	a, b, c, d	$\text{trapezoid}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}$
Gaussian	c, σ	$\text{gaussian}(x; a, b, c) = \exp\left(\frac{-0.5(x-c)^2}{\sigma^2}\right)$ Dimana c merupakan titik tengah, variansi menentukan bentuk kurva, dan x adalah titik pada kurva
Generalized Bell	a, b, c	$\text{bell}(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left \frac{x-c}{a}\right ^{2b}}$ Dimana a dan b menghitung lebar dari kurva dan c menentukan posisi titik tengah kurva.

2.6 Ant Colony Optimization

Optimisasi Ant-Colony merupakan suatu kelas yang terdiri dari beberapa algoritma untuk memecahkan permasalahan optimisasi masalah yang ter-inspirasi dari fenomena peletakan jalur *pheromone* dan mengikuti prinsip kebiasaan koloni semut (Dorigo, 2011). Semut-semut artifisial buatan berlaku seakan-akan seperti semut-semut yang mencari makanan yang masing-masing semut tersebut memiliki rute perjalanan yang berbeda. Setiap semut melepaskan zat *pheromone* pada perjalanannya. Kemungkinan semut memilih rute secara acak yaitu kecil, karena semut memilih rute yang sebelumnya sudah ditemukan oleh semut lain (rute yang terdapat *pheromone*-nya). Ketika semut pertama pada rute tersebut menemukan solusi (yaitu sumber makanan), semut lain yang mengikuti rute-nya juga akan

menemukan makanan dan menjadikan rute tersebut lebih frekuensi dijelajah daripada rute semut lain yang tidak terdapat sumber makanan. Ini disebabkan karena penguapan *pheromone*. Semakin sering rute tersebut dilewati (atau dapat dikatakan banyak semut yang melewati rute tersebut), maka *pheromone* ter-akumulasi pada rute tersebut dan penguapan tidak terlalu memberikan efek. Karena *pheromone* pada rute ini ber-akumulasi, maka akan semakin banyak semut yang memilih rute ini.

```
procedure ACOMetaheuristic
    ScheduleActivities
        ConstructSolutions
        DaemonActions //optional
        UpdatePheromones
    end-ScheduleActivities
end-procedure
```

Gambar 2.9 Pseudocode Metaheuristic ACO (Dorigo, 2011)

Ant Colony Optimization (atau ACO) dapat di-aplikasikan pada permasalahan optimisasi kombinatorial apapun, selama permasalahan tersebut dapat diturunkan kedalam prosedur-prosedur pada konstruksi solusi sesuai dengan algoritma ACO. ACO bekerja dengan cara menjalin 3 prosedur tingkat tinggi: “ConstructSolutions”, “DaemonActions”, dan “UpdatePheromones” seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.7. *Construct “ScheduleActivities”* tidak menspesifikasikan bagaimana ketiga sub-algoritma tersebut dijalankan dan di-sinkronkan. Secara umum, penjelasan dari ketiga prosedur tersebut adalah sepeerti berikut. “ConstructSolution” adalah prosedur yang meng-implementasikan semut-semut artifisial. Pada ACO, semut-semut dalam proses melacak jalur kepada solusi permasalahan meletakan *pheromone* pada jalur yang telah dilewati. Semakin dekat jarak asal dengan tujuan dan juga semakin banyak semut yang melewati jalur yang sama, maka *pheromone* pada suatu jalur tersebut semakin meningkat. Konsentrasi *pheromone* diwakili oleh notasi τ_{ij} , dimana i merupakan node saat ini dan j adalah node-node lain terdekat yang dapat menjadi arah selanjutnya bagi semut. 2 faktor yang mempengaruhi semut dalam pemilihan node selanjutnya yaitu konsentrasi

pheromone dan angka *heuristic* (η_{ij}). Sehingga, probabilitas suatu semut dalam memilih node selanjutnya diberikan oleh persamaan berikut.

$$p_{c_{ij}|s^P} = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{c_{il} \in N(sP)} [\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} \quad (2.20)$$

α dan β merupakan nilai pembeban daripada kedua faktor, me-representasikan nilai kepentingan relative daripada keduanya. Prosedur “DaemonActions” merupakan opsional, disertakan ketika hasil optimal terbaik ingin didapatkan (Stutzle & Dorigo, 2004), dimana prosedur ini memungkinkan eksekusi operasi permasalahan spesifik, seperti penggunaan prosedur pencarian local.

Prosedur “UpdatePheromones” memperbarui nilai konsentrasi *pheromone* pada tiap-tiap jalur. Teknis pembaruan nilai dilakukan dalam 2 tahap, yaitu penguapan *pheromone* yang mengurangi nilai konsentrasi *pheromone* pada seluruh jalur dengan faktor konstan ρ (disebut laju penguapan), dan desposit *pheromone* yang menambah nilai *pheromone* sesuai jalur tempuh yang diambil semut artifisial.

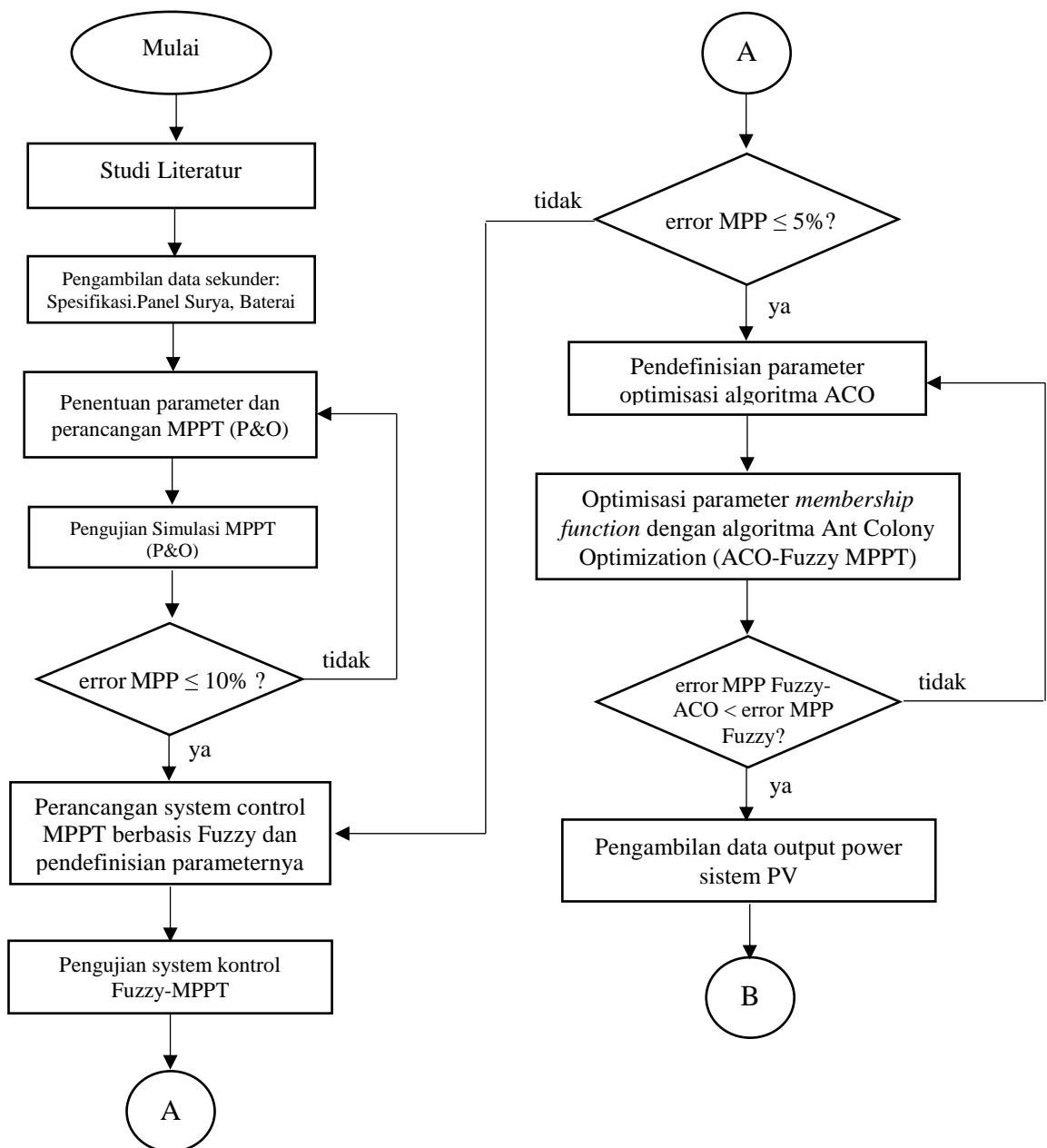
$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \rho \cdot \sum_{s \in S_{upd|c_{ij} \in s}} F(s) \quad (2.21)$$

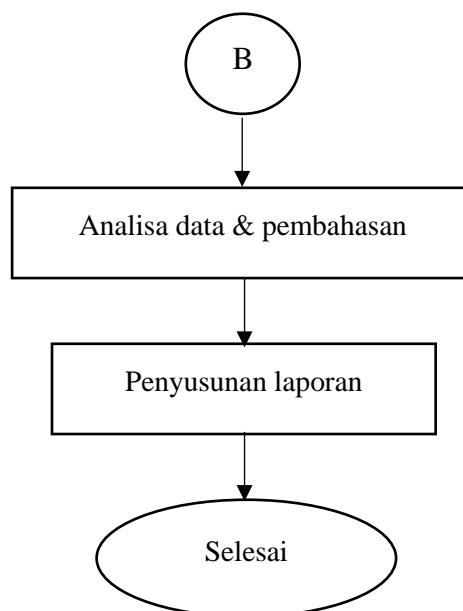
$\rho \in (0,1]$ sebagai laju penguapan, dan $F: S \rightarrow \mathbb{R}^+$ adalah fungsi sedemikian rupa sehingga $f(s) < f(s') \rightarrow F(s') \geq F(s')$. $F(\cdot)$ disebut sebagai fungsi kecocokan (*fitness function*). Definisi daripada S_{upd} beragam dikalangan ahli, dua yang paling umum yaitu $S_{upd}=s_{bsf}$, dan $S_{upd}=s_{ib}$, dimana s_{bsf} adalah solusi terbaik selama ini, yaitu, solusi terbaik yang pernah ditemukan sejak algoritma mulai dieksekusi, dan s_{ib} adalah solusi terbaik dari iterasi saat ini. *Pheromone* pada implementasinya secara spesifik berbeda tergantung dari varian ACO yang digunakan (Gambardella & Dorigo, 1997).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Langkah yang dilakukan pada penelitian peningkatan performansi dari proses MPPT pada PV berbasis *Ant-Colony Optimized Fuzzy Logic Algorithm* (ACO-FLC) ini digambarkan pada diagram alir berikut.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1 Studi literatur

Pada tahap studi literatur, dilakukan pencarian pranala luar dalam menunjang dasar teori dan pengetahuan lebih lanjut yang dibutuhkan dalam proses penelitian. Sumber studi literatur dapat berupa jurnal, artikel, *paper*, buku maupun tulisan online/website. Sumber-sumber yang diambil merupakan kombinasi dari sumber bertaraf nasional dan internasional.

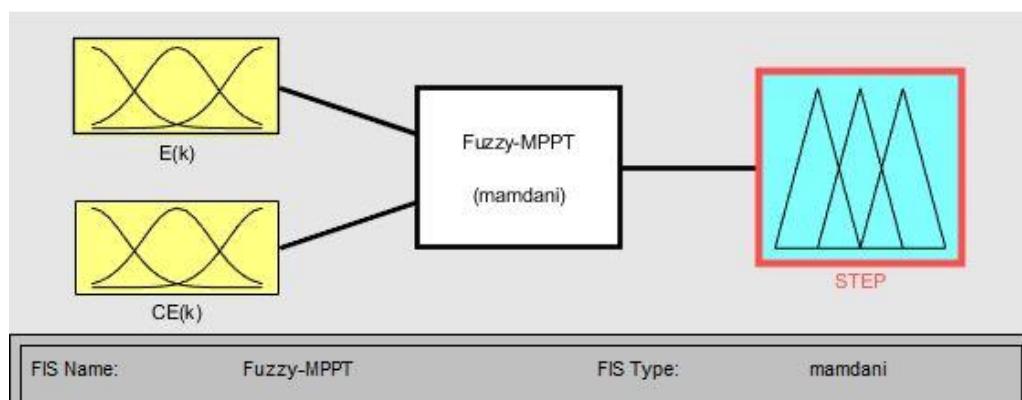
3.2 Penentuan Parameter dan Perancangan MPPT (P&O)

Rancangan paling pertama yang dibangun yaitu rancangan MPPT dengan teknik konvensional (P&O – *Perturb and Observe*). Perancangan dimulai dari penentuan parameter seperti *Duty_Init* dan nilai delta. Proses berjalannya teknik ini berdasarkan pada *flowchart* pada gambar 2.4.

3.3 Perancangan Sistem Kontrol MPPT berbasis Fuzzy dan Pendefinisian Parameternya

Setelah rancangan MPPT P&O berhasil dijalankan dan diuji, maka selanjutnya dilakukan perancangan MPPT berbasis logika *fuzzy*. Pada langkah ini ditentukan input FLC, output FLC, tipe fungsi keanggotaan keduanya, parameter

fungsi keanggotaan keduanya, dan *Rule Base*. Referensi variasi tipe beserta parameter-parameternya merujuk kembali ke tabel 2.2 dan gambar 2.6 pada bab 2 mengenai dasar teori sistem logika *fuzzy*. Tahap selanjutnya yaitu pengujian rancangan sistem yang telah dibuat. MPPT berbasis *Fuzzy* yang telah selesai di-desain selanjutnya dijalankan pada simulasi MATLAB. Batas validasi rancangan ialah error *steady-state* tidak boleh melebihi 5%. Berikut ini tipe dan parameter MF hasil perancangan pada tiap input dan output.



Gambar 3.2 Pemodelan Fuzzy-MPPT

Dapat dilihat pada Gambar 3.2 diatas, bahwa kontrol MPPT berbasis *fuzzy* yang dirancang memiliki 2 input dan 1 output dan bertipe inferensi Mamdani. Input 1 $E(k)$ yaitu error didapat dari pembagian antara selisih daya output PV dengan selisih tegangan output PV, didefinisikan oleh persamaan berikut (Aji, 2013),

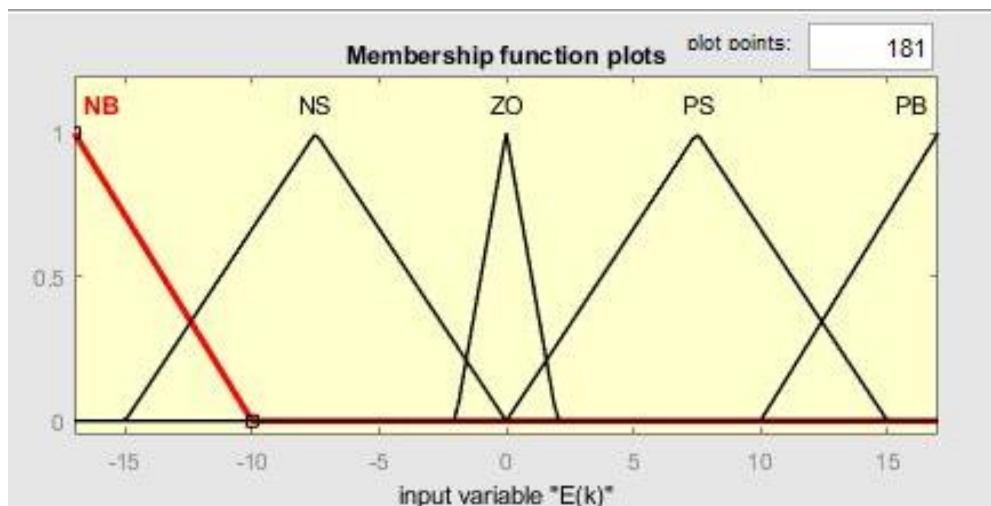
$$E(k) = \frac{(P(k)-P(k-1))}{(V(k)-V(k-1))} \quad (3.1)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k - 1) \quad (3.2)$$

$$P(k) = V(k).I(k) \quad (3.3)$$

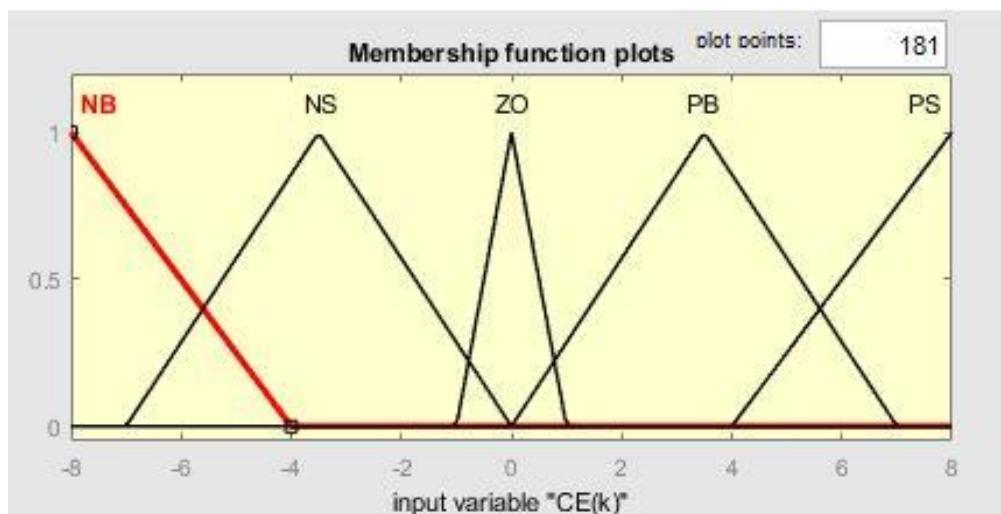
Persamaan (3.1) tak lain merupakan pencarian titik operasi MPPT saat ini relative terhadap setpoint dalam bentuk fungsi tangensial. Seperti yang telah dibahas

pada Bab 2 mengenai dasar teori MPPT, bahwa titik operasi PV (perpotongan antara daya dan tegangan output) yang menjadi target adalah titik operasi PV pada MPP (*Maximum Power Point*) pada puncak kurva P-V fotovoltaik, dengan cara menggeser tegangan PV. $E(k)$ mewakili arah pergeseran titik operasi PV, dengan dua kemungkinan yaitu bergeser kearah kanan kurva atau ke kiri kurva. Dengan nilai $E(k)$ maka sistem dapat mengeahui dan memastikan bahwa arah pergeseran titik operasi PV menuju titik MPP. $CE(k)$ atau *Change of Error* memberi informasi kepada sistem daripada selisih nilai error saat ini dengan error sebelumnya. Jika selisih-nya sama dengan atau mendekati 0, maka sistem dianggap sudah steady pada target titik operasi. Output dari unit inferensi *fuzzy* adalah *STEP*, dimana variable ini akan mengubah (menaik/turunkan) besar *duty cycle* yang dihasilkan oleh kontroller, sehingga dapat meng-aktuasi DC-DC PWM generator yang men-drive MOSFET pada *converter*.



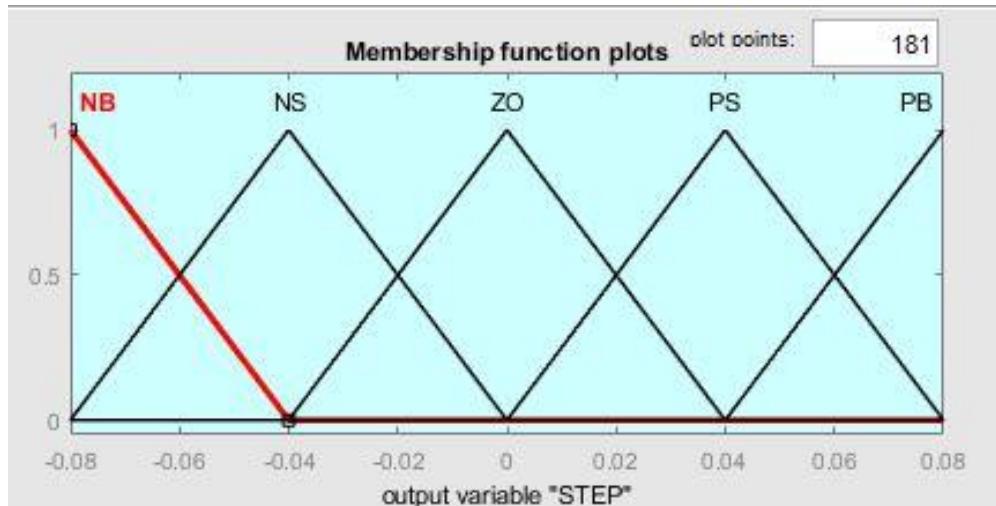
Gambar 3.3 Fungsi Keanggotaan $E(k)$

Gambar 3.3 diatas menunjukkan bahwa input $E(k)$ memiliki 5 fungsi keanggotaan (MF) dengan tipe *triangular* dan semesta pembicaraan [-17 17]. Sumbu Y adalah tingkat *membership* dan X adalah input *crisp*. Kelima fungsi keanggotaan yaitu NB (*Negative Big*), NS (*Negative Small*), ZO (*Zero*), PS (*Positive Small*), dan PB (*Positive Big*).



Gambar 3.4 Fungsi Keanggotaan CE(k)

Input CE(k) memiliki 5 fungsi keanggotaan dengan tipe *triangular* dan semesta pembicaraan [-8 8]. Kelima fungsi keanggotaan pada CE(k) memiliki inisial yang sama dengan kelima fungsi keanggotaan E(k), namun memiliki parameter yang berbeda.



Gambar 3.5 Fungsi Keanggotaan Output STEP

Pada output *STEP* terdapat 5 fungsi keanggotaan, dengan penamaan dan inisial sama seperti penamaan pada fungsi keanggotaan input sebelumnya. Semesta pembicaraan adalah [-0.08 0.08]. Dapat dilihat bahwa transisi yang sangat detil dengan nilai inkremen kecil pada output *STEP* secara teori akan memperkecil *overshoot* dan memperhalus *ripple* pada respon daya PV.

3.4 Optimisasi Parameter *Membership Function*

Pada langkah ini dilakukan optimisasi daripada sistem kontrol MPPT berbasis *fuzzy* yang telah dirancang dan lolos uji. Ada banyak fungsi daripada sistem kontrol berbasis *fuzzy* yang dapat di-optimisasi, seperti tipe MF (Castillo, 2013), parameter MF, *Rule Base*, nilai gain kontrol, dan lainnya. Pada penelitian ini tepatnya hanya dilakukan optimisasi parameter MF. Parameter MF berbeda-beda sesuai tipe MF yang digunakan. Hal ini dapat dilihat pada tabel 2.2. Teknik optimisasi yang digunakan adalah *Ant-Colony Optimization* (ACO). Optimisasi dengan teknik ACO dilakukan dengan pemrograman MATLAB. Berikut ini tahapan dari algoritma optimisasi ACO.

3.4.1 Penentuan Parameter ACO

Algoritma optimisasi ACO memiliki beberapa parameter yang harus didefinisikan sebelum algoritma dijalankan. Parameternya yaitu jumlah iterasi (*MaxIt*), jumlah agen (*nAnt*), beban *pheromone* (α), beban *heuristic* (β), dan laju evaporasi *pheromone* (ρ). Pendefinisan parameter-parameter tersebut pada prakteknya terletak pada scripting MATLAB. Berikut ini tabel yang merepresentasikan apa saja parameter yang digunakan dan nilainya.

Tabel 3.1 Nilai Parameter Algoritma ACO

No.	Simbol	Variabel (satuan)	Nilai
1.	<i>MaxIt</i>	Iterasi maksimal	300
2.	<i>nAnt</i>	Jumlah agen	40
3.	α	Koef. Pembebanan <i>pheromone</i>	0,7
4.	β	Koef. Pembebanan <i>heuristic</i>	0,6
5.	ρ	Laju evaporasi <i>pheromone</i>	0,75

3.4.2 Inisialisasi

Inisialisasi algoritma ACO mencakup pendefinisian parameter ACO, pendefinisian masalah, penentuan posisi awal semut, dan batasan (*constraint*). Agar dapat meng-introduksi permasalahan optimisasi fungsi keanggotaan pada algoritma ACO, dilakukan designasi simbol huruf ‘a’ sebagai batas kiri segitiga, ‘b’ batas tengah segitiga (puncak), dan ‘c’ batas kanan segitiga. Posisi awal semut dibuat secara acak/random disekitar titik-titik parameter fungsi keanggotaan yang akan di-optimisasi, untuk fungsi keanggotaan paling kiri pada semesta pembicaraan, diberikan oleh persamaan berikut,

$$X_{right} = c - \text{rand.}(c - b) \quad (3.4)$$

dengan X , c , dan $b > 0$ sehingga hasil optimisasi dapat mempertahankan bentuk segitiga fungsi keanggotaan. Tiga fungsi keanggotaan yang terletak diantara fungsi keanggotaan paling kiri dan paling kanan, memiliki 2 parameter yang akan di-optimisasi, X_{right} dan X_{left} , diberikan oleh persamaan berikut

$$X_{left} = a_k - \text{rand.}(a_k - a_{k-1}) \quad (3.5)$$

dengan $a > 0$. Notasi k menyatakan fungsi keanggotaan saat ini dan $k-1$ menyatakan fungsi keanggotaan sebelumnya (disebelah kiri dari fungsi keanggotaan sekarang), sehingga batas kiri hasil optimisasi parameter fungsi keanggotaan ini tidak akan melebihi batas kiri hasil optimisasi parameter fungsi keanggotaan sebelumnya. Penentuan X_{right} pada 3 fungsi keanggotaan tengah sama seperti penentuan X_{right} fungsi keanggotaan paling kiri yang diberikan oleh persamaan 3.4

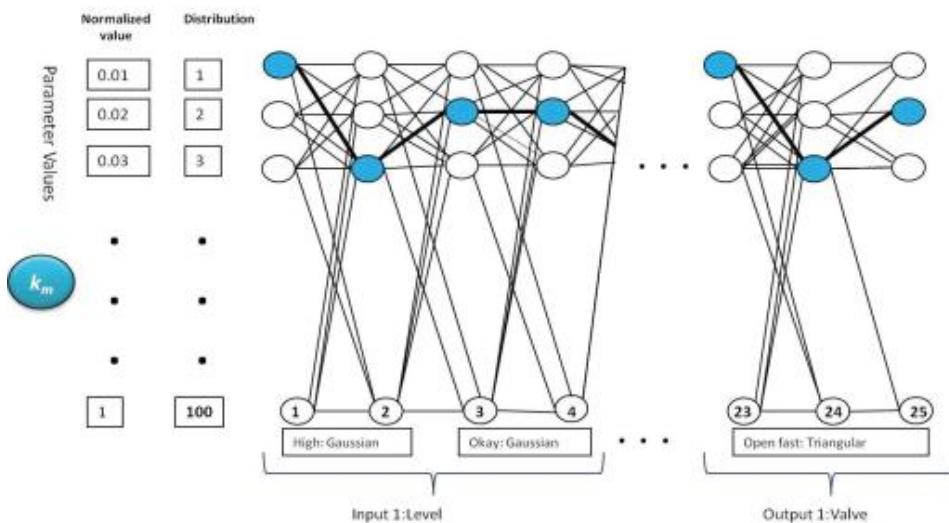
Optimisasi parameter fungsi keanggotaan paling kanan hanya dilakukan pada batas kiri saja, dijelaskan pada persamaan 3.6

$$X_{left} = b - \text{rand.}(b - a) \quad (3.6)$$

3.5 ACO-FLC

Setelah melewati serangkaian prosedur deklarasi, definisi, dan inisialisasi sesuai dengan permasalahan, selanjutnya algoritma inti dari Ant-Colony Optimization dijalankan. Program menciptakan suatu mapping atau *pheromone matrix* yang berisi node-node yang dapat dituju oleh semut, dengan struktur seperti berikut,

- Jumlah kolom ditentukan oleh seluruh kemungkinan nilai derajat keanggotaan untuk tiap parameter yang akan di-optimisasi, yang dapat berupa apa saja diantara 0 dan 1
- Jumlah baris ditentukan oleh *Membership function* yang akan di-optimisasi pada kasus ini berbentuk segitiga, memiliki 3 parameter (left, middle, right), sehingga untuk total 5 segitiga fungsi keanggotaan, terdapat 15 baris yang akan membentuk *pheromone matrix*



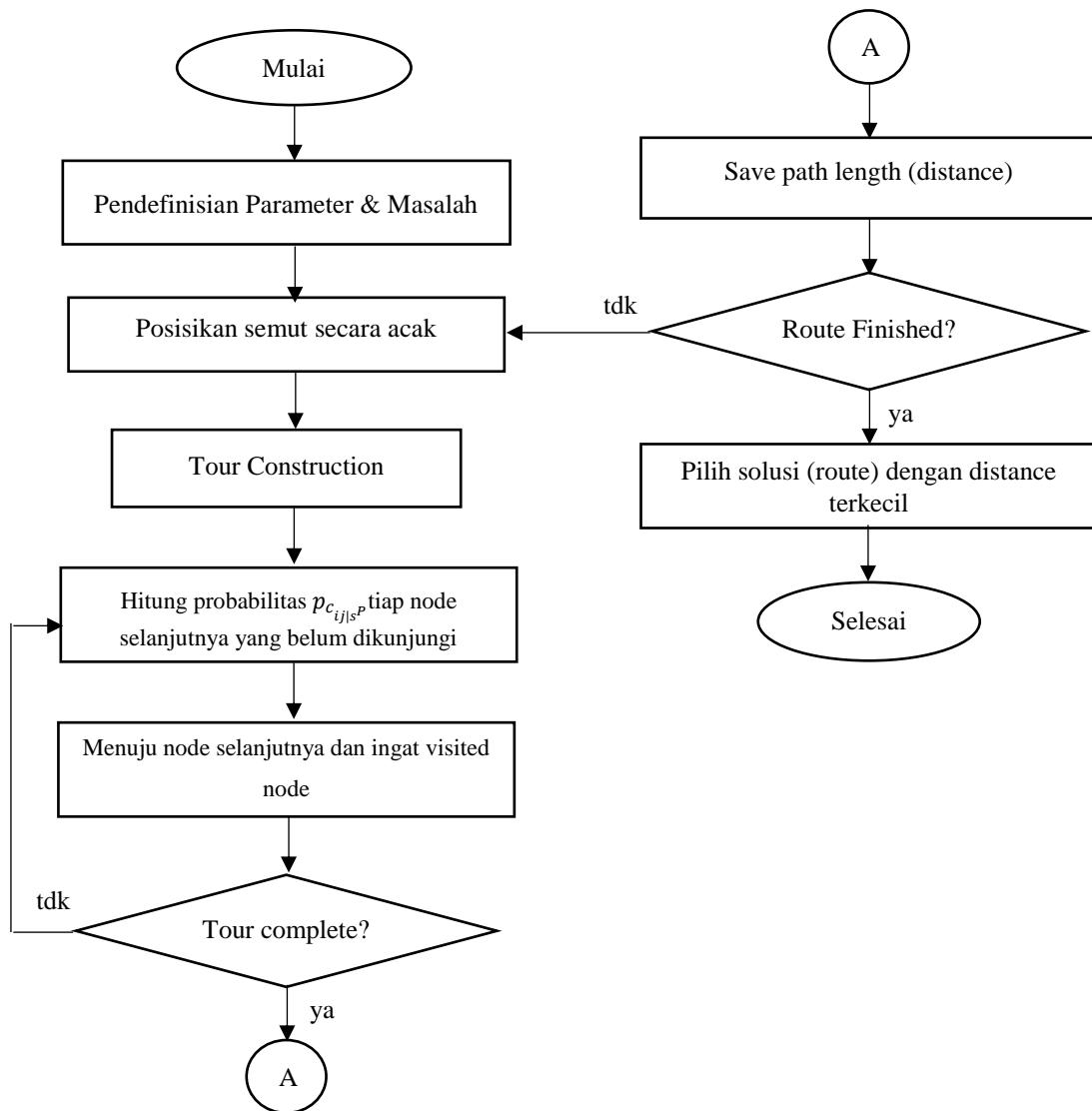
Gambar 3.6 Grafik *pheromone matrix* (Castillo, 2013)

Algoritma ini akan terus berjalan sampai iterasi mencapai batas yang telah ditentukan pada variable *MaxIt* pada tabel 3.1. Walaupun sudah mencapai solusi, jika iterasi belum tercapai maka proses terus berjalan. Namun ini tidak akan mempengaruhi hasil optimisasi karena hasil optimum akan dipertahankan sampai iterasi selesai. Hasil yang didapatkan adalah node-node dengan konsentrasi *pheromone* tertinggi, yang berarti jalur tersebut memiliki *fitness* terbaik. *Fitness*

pada optimisasi ini di-representasikan oleh fungsi MSE, yang diberikan oleh persamaan dibawah ini.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [d(k) - d'(k)]^2 \quad (3.7)$$

Dimana d merupakan output ACO-FLC, dan d' sebagai *reference*. Secara keseluruhan, algoritma ACO ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Algoritma ACO yang Digunakan

3.6 Hasil Optimisasi

Seperti yang telah dijelaskan pada Bab 3 Metodologi Penelitian, optimisasi *fuzzy-MPPT* dilakukan setelah sistem kontrol tersebut telah berjalan dan lolos syarat validasi. Berikut ini tabel yang menunjukkan parameter input dan output *fuzzy-MPPT* pada eksperimen.

Tabel 3.2 dan 3.3 menunjukkan parameter *membership function* dari *input Error* dan *Change Of Error* berturut-turut. Karena tipe *membership function* yang digunakan adalah segitiga, maka terbagi menjadi 3 parameter; kiri, tengah, dan kanan (denotasi a, b, dan c).

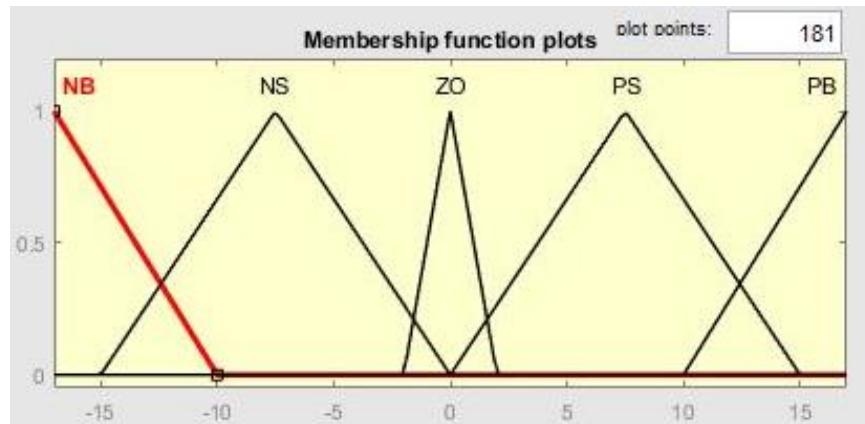
Tabel 3.2 Parameter *Membership Function Error* (Fuzzy)

Input (Error)	Parameter <i>Membership Function</i>		
	KIRI	TENGAH	KANAN
Negative Big	-25.5	-17	-10
Negative Small	-15	-7.5	0
ZERO	-2	0	2
Positive Small	0	7.5	15
Positive Big	10	17	25.5

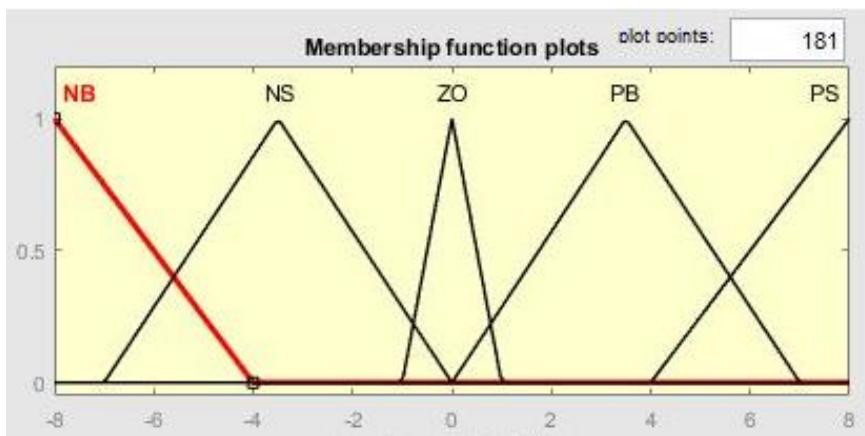
Tabel 3.3 Parameter Function Change of Error (Fuzzy)

Input (ChangeOfError)	Parameter <i>Membership Function</i>		
	KIRI	TENGAH	KANAN
Negative Big	-12	-8	-4
Negative Small	-7	-3.5	0
ZERO	-1	0	1
Positive Small	0	3.5	7
Positive Big	4	8	12

Visualisasi dari parameter-parameter diatas ini dapat dilihat pada Gambar 3.8 dan 3.9 agar lebih mudah dipahami.



Gambar 3.8 Plot Membership Function Error



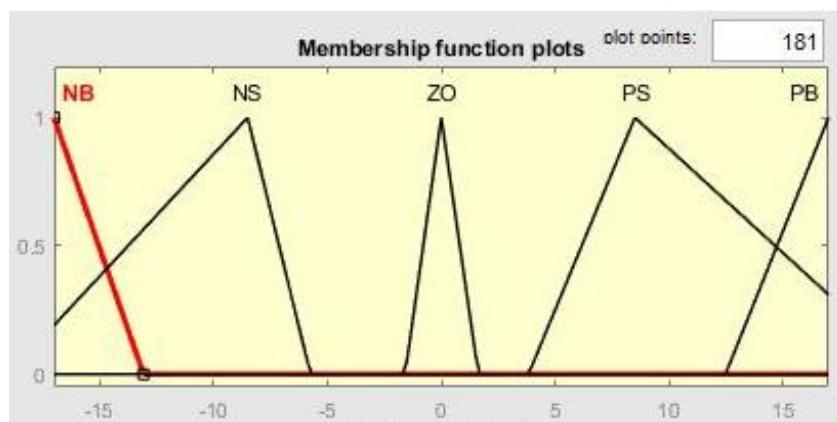
Gambar 3.9 Plot Membership Function Change of Error

Ant-Colony Optimization dilakukan dengan cara memasukkan parameter pada script/code yang dijalankan oleh MATLAB. Script tersusun dari *nested-loop* dan dijalankan sampai iterasi tercapai. Hasilnya seperti berikut.

Tabel 3.4 Parameter Membership Function Error Post-Optimization

Input (Error)	Parameter <i>Membership Function</i>		
	KIRI	TENGAH	KANAN
Negative Big	-25.5	-17	-13.07
Negative Small	-19.01	-7.5	-5.741
ZERO	-1.59	0	1.626
Positive Small	3.827	8.5	20.82
Positive Big	12.48	17	25.5

Seperti yang dapat dilihat pada tabel 3.4 diatas, bahwa tidak seluruh parameter berubah dibandingkan dengan aslinya, mengingat seperti yang telah dijelaskan pada bab 3 bahwa hanya terdapat 8 parameter yang di-optimisasi, yaitu batas kanan untuk Negative Big, batas kiri dan kanan untuk Negative Small, Zero, dan Positive Small, lalu batas kiri untuk Positive Big. Parameter diatas menghasilkan plot yang di-visualisasikan pada gambar berikut.

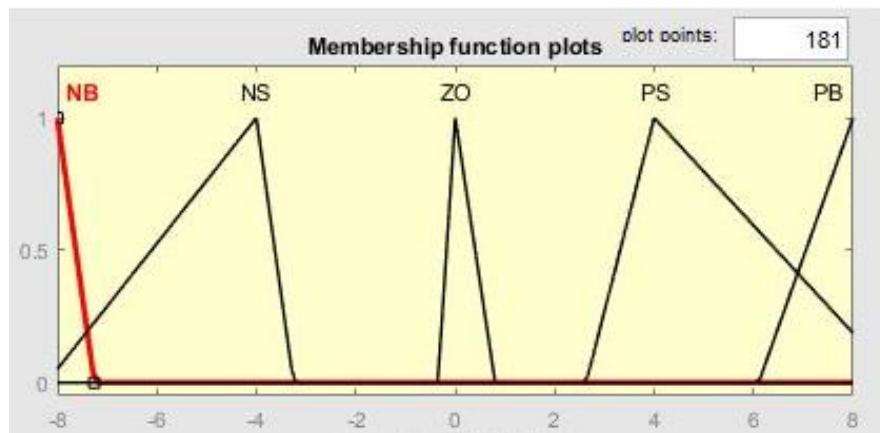


Gambar 3.10 Plot Membership Function Error Post-Optimization

Berdasarkan bentuk plot pada Gambar 3.10, dapat disimpulkan bahwa persamaan inisialisasi posisi agen (persamaan 3.4 – 3.6) adalah valid dan dapat berfungsi sebagai *constraint*, karena hasil optimisasi diatas menunjukkan bahwa proses optimisasi ACO pada parameter *membership function* fuzzy dapat mempertahankan bentuk segitiga daripada seluruh fungsi keanggotaan. Hasil diatas merupakan hasil dari iterasi selama 300 kali.

Tabel 3.5 Parameter Membership Function Change of Error Post-Optimization

Input (ChangeOfError)	Parameter <i>Membership Function</i>		
	KIRI	TENGAH	KANAN
Negative Big	-12	-8	-7.257
Negative Small	-8.218	-4	-3.252
ZERO	-0.35	0	0.803
Positive Small	2.631	4	8.92
Positive Big	6.1	8	12



Gambar 3.11 Plot Membership Function Change of Error Post-Optimization

Hasil kedua (*Change of Error*) dari optimisasi ACO yang dilakukan memperlihatkan hasil yang konsisten, dimana *constraint* pada inisialisasi dapat diterapkan dengan baik sehingga mempertahankan bentuk segitiga dari seluruh *membership function*. Berkenaan dengan output STEP tidak dilakukan optimisasi (hanya input yang di-optimisasi). Tingkat ke-optimalan hasil ini belum dapat disimpulkan sebelum di-uji dengan cara meng-implementasikannya pada simulasi Fuzzy-MPPT.

3.7 Pengambilan Data

Setelah seluruh sistem yang dirancang selesai dibuat dan lolos uji validasi, maka selanjutnya simulasi dijalankan pada rentang waktu tertentu pada sistem MPPT P&O, Fuzzy-MPPT, dan ACO-FLC MPPT. Data yang diambil untuk selanjutnya di-analisa yaitu performansi sistem kontrol, seperti error *steady-state*, *rise time*, *settling time*, *fall time*, dan *peak-to-peak* ketika osilasi steady. Pengambilan data menggunakan fitur *Bilevel Measurement* dan *Signal Statistics* pada Simulink.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

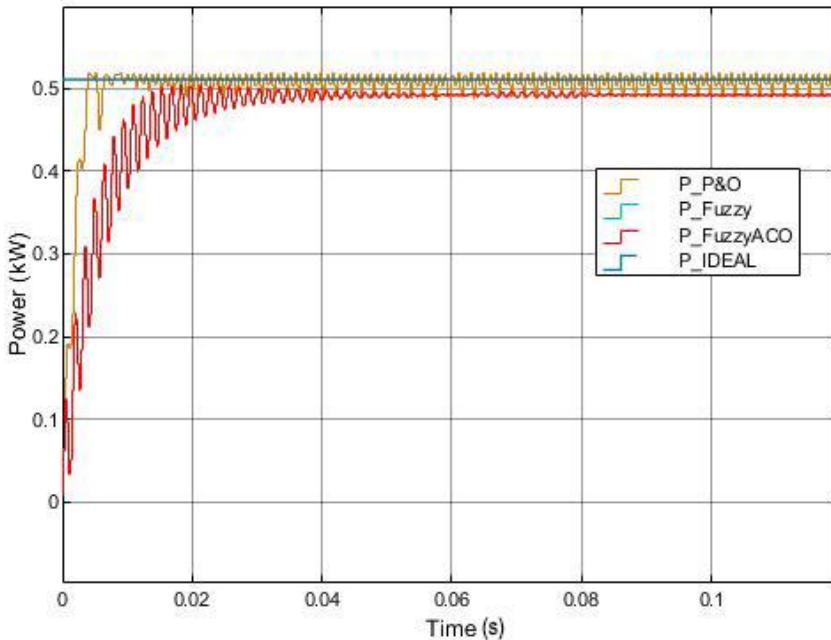
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan dan analisa data terbagi menjadi 5 bagian; data performansi sistem PV pada iradiansi matahari 600 W/m^2 , 700 W/m^2 , 800 W/m^2 , 900 W/m^2 , dan 1000 W/m^2 . Iradiansi 600 W/m^2 , 800 W/m^2 , dan 1000 W/m^2 dilakukan pada saat iradiansi naik, sedangkan pengambilan data pada iradiansi 700 W/m^2 dan 900 W/m^2 dilakukan pada saat iradiansi turun. Hal ini dilakukan mengingat pada siklus 1-hari, terdapat periode matahari terbit dan matahari terbenam, sehingga kriteria performansi *rise time* dan *fall time* perlu keduanya diselidiki. Pada tiap data, performansi daripada sistem kontrol MPPT konvensional *Perturb & Observe*, *Fuzzy-MPPT*, dan juga ACO-FLC MPPT dibandingkan pada parameter kondisi yang sama.

4.1 Perbandingan Performansi Hasil Optimisasi dengan Fuzzy-MPPT dan MPPT Konvensional

Seperti yang telah dijelaskan pada pendahuluan Bab IV bahwa pengujian dilakukan pada 3 metode sekaligus dengan parameter kondisi dan spesifikasi komponen yang seluruhnya persis, pada tingkat iradiansi 600, lalu naik ke 800, lalu naik ke 1000, lalu turun ke 900, dan terakhir turun ke 700 (*Varying Irradiance Constant Temperature*). Ini dilakukan untuk meng-imitasi implementasi sistem PV pada kondisi riil dimana terdapat periode matahari terbit dan terbenam, juga faktor *shading* dari awan yang bergerak pada cuaca cerah. Lalu, dilakukan percobaan kembali namun pada iradiansi tetap dan temperatur berubah (*Constant Irradiance Varying Temperature*). Selanjutnya, Pada grafik yang akan ditunjukkan, terdapat setpoint teoritis yang didapatkan dari hasil perhitungan berdasarkan spesifikasi kurva P-V dari fotovoltaik yang digunakan. Setpoint ini berubah sesuai perubahan tingkat iradiansi. Perubahan iradiansi di-implementasikan secara *step*.

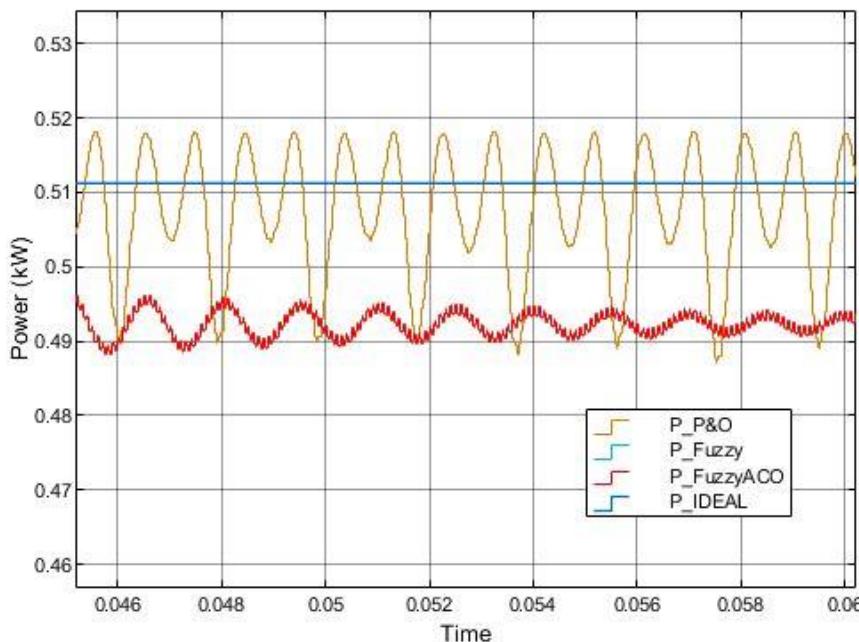
4.1.1 Varying Irradiance Constant Temperature (25 °C)



Gambar 4.1 Output Power Pada Irradiansi 600 W/m²

Pengujian pertama yaitu pada input irradiansi matahari 600 W/m² dan visualisasi hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4.1 Dari grafik tersebut, secara langsung dapat kita sadari bahwa output power yang dihasilkan oleh metode konvensional memiliki kriteria performansi *rise time* dan *settling time* yang lebih baik daripada Fuzzy-MPPT dan ACO-FLC MPPT. Secara tepat, metode P&O memiliki kriteria performansi *rise time* sebesar 0.0035 detik (3.5 ms) dan *settling time* sebesar 0.006 detik (6 ms). Grafik diatas seakan-akan tidak menampilkan kurva untuk MPPT-Fuzzy, namun sebetulnya kurva daya daripada Fuzzy-MPPT dan ACO-FLC Fuzzy adalah persis sama sehingga kurva ACO-FLC Fuzzy yang berwarna merah menutupi kurva Fuzzy-MPPT yang berwarna biru, membuatnya tidak dapat terlihat. Pada kedua metode tersebut, dihasilkan kriteria performansi *rise time* dan *settling time* yang lebih lambat daripada metode P&O, yaitu sebesar 0.0094 detik (9.4 ms) dan 0.039 detik (39 ms). Ini dapat disebabkan oleh alokasi *membership function* dengan parameter yang kurang tepat, sehingga unit inferensi fuzzy (unit kontroller fuzzy, FLC) mengasumsikan bahwa output *STEP* yang diperlukan agar *duty-cycle* berubah tidak begitu besar, menyebabkan *duty-cycle* berubah dengan lamban secara relatif terhadap metode P&O. Berikut ini kurva yang

diperbesar untuk kejelasan dan tabel yang menyajikan data perbandingan performansi secara lengkap pada irradiansi 600 W/m^2 .



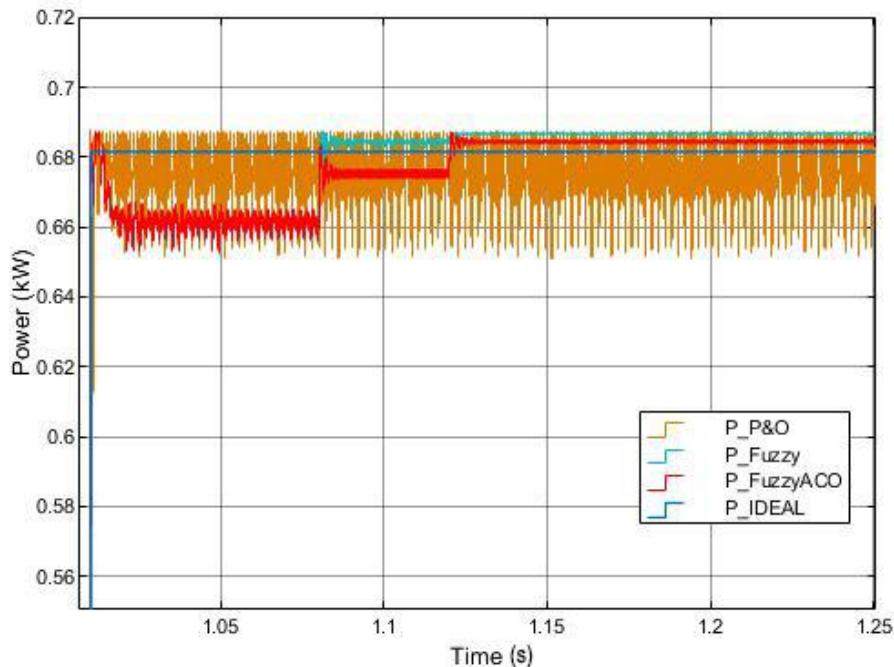
Gambar 4 .2 Output Power Pada Irradiansi 600 W/m^2 Kondisi Steady
(Diperbesar)

Tabel 4.1 Performansi Daya Pada Irradiansi 600 W/m^2

Parameter	Metode P&O	Fuzzy-MPPT	ACO-FLC MPPT
Avg. Ess (%)	0.8%	3.7%	3.7%
Settling Time	0.006 s	0.039 s	0.039 s
Rise Time	0.0035 s	0.0094 s	0.0094 s
Max. Overshoot	1.33%	-	-
Maximum (Steady)	0.518 kW	0.493 kW	0.493 kW
Minimum (Steady)	0.487 kW	0.492 kW	0.492 kW
Peak-to-Peak (Steady)	0.031	0.0014	0.0014

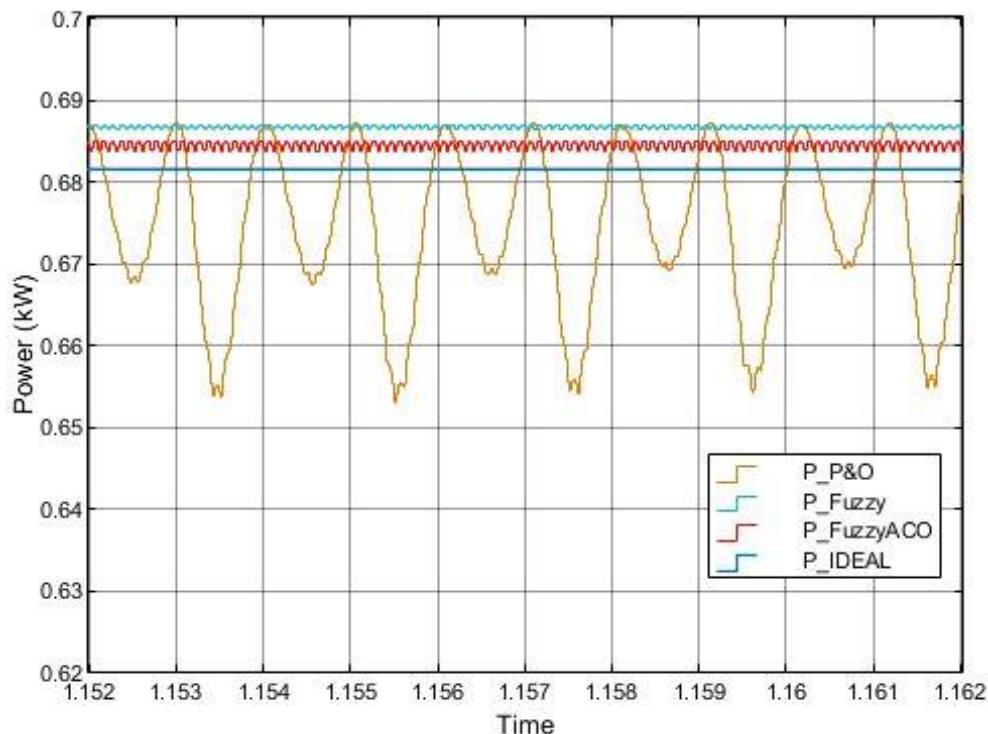
Berdasarkan data pada Tabel 4.1, metode P&O juga menghasilkan kriteria rata-rata error yang lebih baik, yaitu sebesar 0.8%, dimana pada FLC-MPPT dan ACO-FLC MPPT menghasilkan mean error sebesar 3.7%. Namun mean error pada kedua metode terakhir masih relatif kecil dan dapat diterima batas validasi (5%). Kriteria *maximum overshoot* tidak dapat didapatkan dari FLC-MPPT dan ACO-FLC MPPT karena daya selalu berada dibawah setpoint. Namun, dari Tabel 4.6

juga dapat kita lihat bahwa kedua metode tersebut memiliki satu kelebihan, yaitu pada besar osilasi yang dihasilkan (*peak-to-peak steady oscillation*), dimana pada kedua metode tersebut, *peak-to-peak* pada saat steady sebesar 0.0014 KW, sedangkan pada P&O sebesar 0.031. Osilasi yang besar menyebabkan *power-lose* sehingga menurunkan efisiensi. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Output Power Pada Irradiansi 800 W/m^2

Selanjutnya iradiansi dinaikkan menjadi 800 W/m^2 . Pada kondisi ini terlihat sangat kontras jika kita bandingkan osilasi *peak-to-peak* dari output power PV pada metode P&O MPPT dengan metode FLC dan ACO-FLC MPPT. Osilasi power pada metode P&O ketika kondisi iradiansi 800 W/m^2 jauh lebih besar daripada ketika kondisi iradiansi 600 W/m^2 yaitu 0,31 Watt dan 36,2 Watt berturut-turut, naik sampai 2 orde. Kriteria performansi *settling time* dan *rise time* dari FLC-MPPT dan ACO-FLC MPPT juga terlihat sama, walaupun dari Gambar 4.3 dapat terlihat *step* dari output power FLC-MPPT menuju steady lebih besar daripada ACO-FLC MPPT. ACO-FLC MPPT dapat menghasilkan mean error yang lebih kecil dibandingkan FLC-MPPT secara teoritis, namun FLC-MPPT menghasilkan power yang sedikit lebih tinggi, besar selisih pada orde 10^{-2} .



Gambar 4.4 Output Power Pada Irradiansi 800 W/m^2 Kondisi Steady
(Diperbesar)

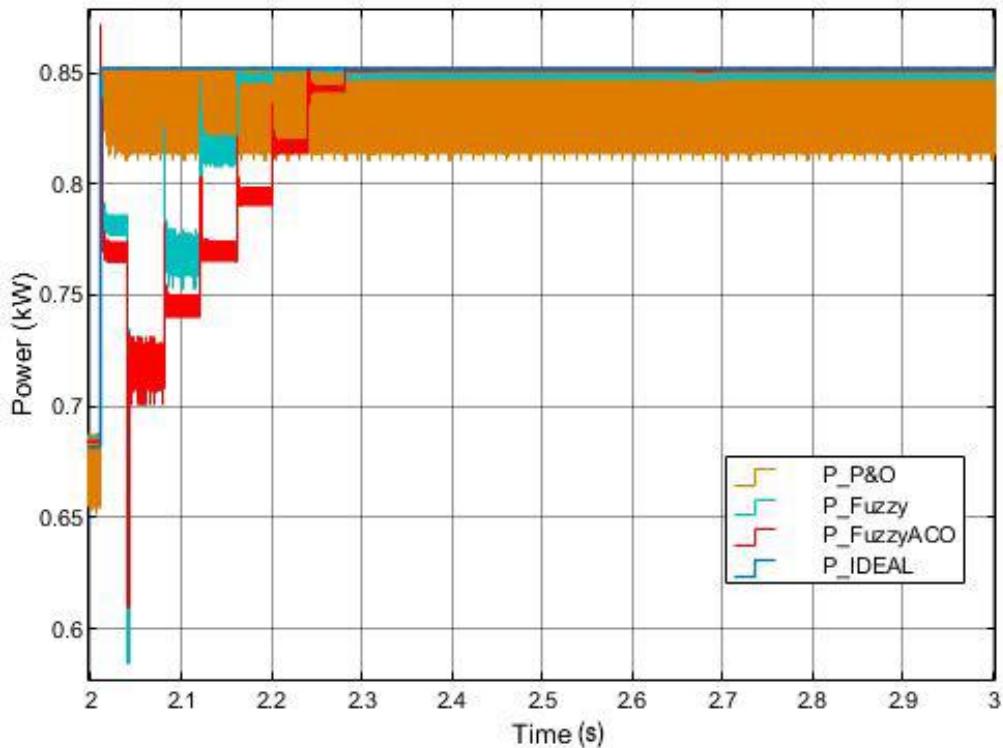
Osilasi *peak-to-peak* dari P&O MPPT terlihat jelas jauh lebih besar dibandingkan kedua metode MPPT lainnya, menyebabkan *power lose* yang secara signifikan juga lebih besar. Mean error dari P&O MPPT juga lebih besar. Lebih detailnya dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Performansi PV Pada Irradiansi 800 W/m^2

Parameter	MetodeP&O	Fuzzy	Fuzzy-ACO
Avg. Ess (%)	1.07%	0.76%	0.42%
Settling Time	1.462 ms	119.03 ms	119.03 ms
Rise Time	15.951 us	331.924 us	331.924 us
Max. Overshoot	0.54%	1.57%	1.57%
Maximum (Steady)	0.6873 kW	0.687 kW	0.685 kW
Minimum (Steady)	0.651 kW	0.6865 kW	0.6838 kW
Peak-to-Peak (Steady)	3.62×10^{-2} kW	5.02×10^{-4} kW	1.25×10^{-3} kW

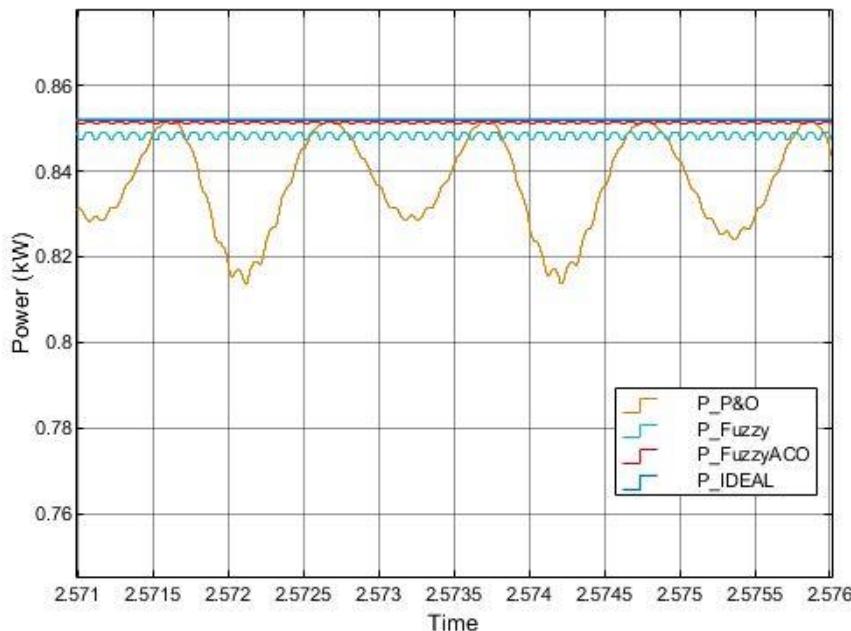
Selanjutnya iradiansi naik menjadi 1000 W/m^2 , tingkat iradiansi ini merupakan tingkat yang umum terjadi pada kondisi langit cerah pada daerah

penelitian ini dijalankan. Respon PV pada kondisi ini dapat dilihat pada Gambar 4.5 di bawah ini.



Gambar 4.5 Output Power PV Pada Irradiansi 1000 W/m^2

Pada gambar diatas dapat kita lihat bahwa ACO-FLC MPPT memiliki respon yang cukup cepat walaupun pada kondisi irradiansi ini belum dapat menyaingi P&O dan FLC-MPPT. Namun, hal ini sangatlah tidak signifikan jika kita mempertimbangkan penggunaan MPPT pada sistem PV 24 jam non-stop (pada gambar, hanya di-simulasikan selama 1 detik penggunaan MPPT), mengingat ACO-FLC memiliki steady-state yang jauh lebih stabil dan akurasi tracking-nya yang lebih tinggi sehingga lebih efisien dalam meng-konversi energi. Untuk dapat melihat lebih jelas dapat merujuk pada Gambar 4.7. Pada gambar diatas juga terlihat bahwa *step* kenaikan FLC-MPPT lebih besar daripada ACO-FLC MPPT, sehingga dapat mengejar setpoint dengan lebih cepat. Ini dapat disebabkan oleh parameter input $E(k)$ dan $CE(k)$ yang belum optimal pada ACO-FLC MPPT karena solusi yang masih terjebak pada solusi lokal, dan membuat unit kontrolle (unit inferensi) membuat desisi output yang kurang tepat karena kedua input tersebut.



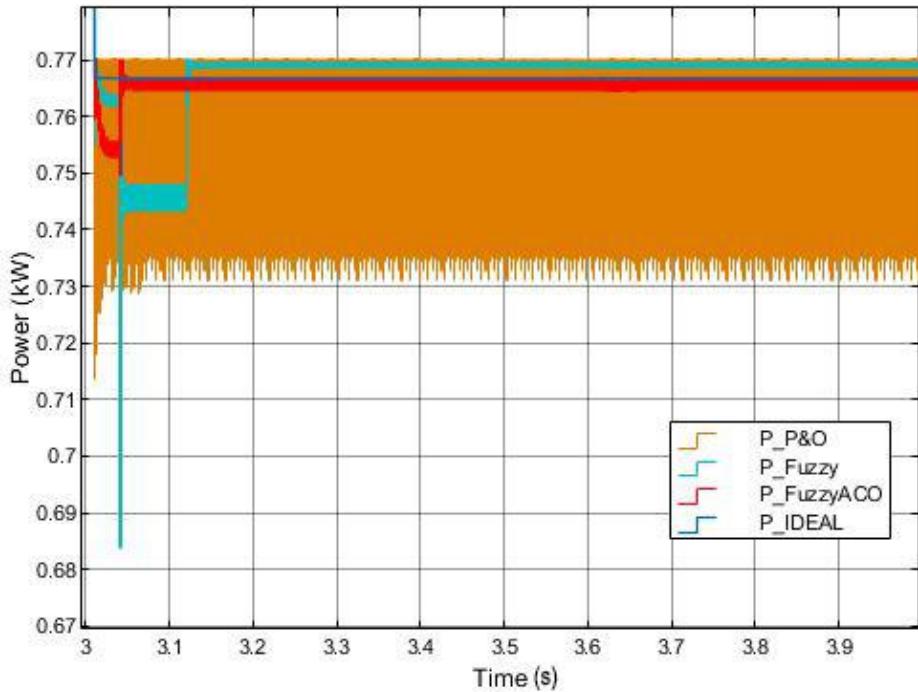
Gambar 4.6 Output Power Pada Irradiansi 1000 W/m^2 Kondisi Steady (Diperbesar)

Tabel 4.3 Performansi PV Pada Irradiansi 1000 W/m^2

Parameter	Metode P&O	Fuzzy	Fuzzy-ACO
Avg. Ess	1.82%	0.42%	0.08%
Settling Time	7.484 ms	110.35 ms	190.17 ms
Rise Time	730.3 ms	424.7 ms	393.3 ms
Max. Overshoot	1.53%	2.34%	2.34%
Maximum (Steady)	0.852 kW	0.849 kW	0.852 kW
Minimum (Steady)	0.813 kW	0.847 kW	0.85 kW
Peak-to-Peak (Steady)	0.038 kW	0.002 kW	0.0007 kW

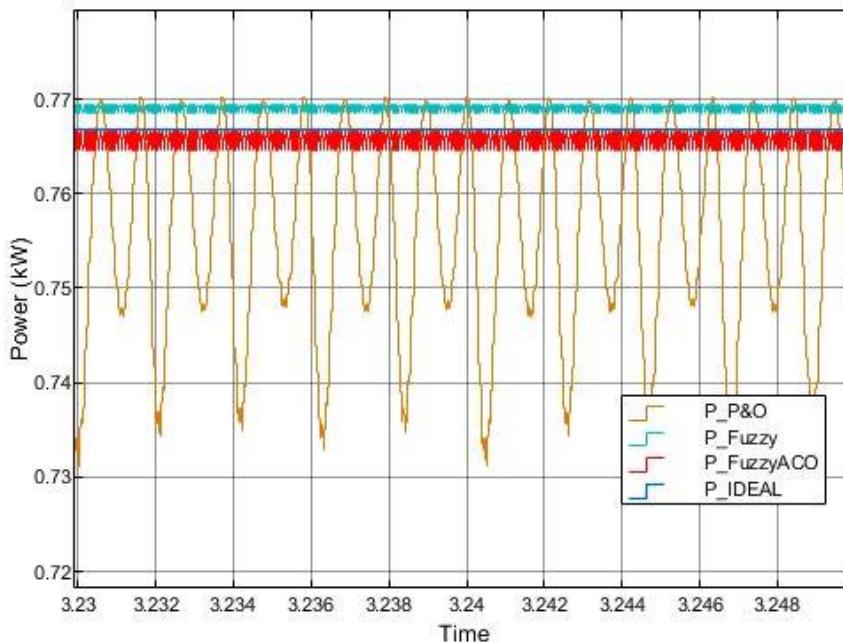
Didapati kondisi *steady* daripada output daya teknik ACO-FLC MPPT menghasilkan performansi yang terbaik diantara seluruh teknik yang diuji. Mulai dari error steady-state rata-rata terkecil, lalu *peak-to-peak* osilasi keadaan steady yang paling kecil, menghasilkan efisiensi paling optimal dibandingkan dua metode lainnya. ACO-FLC MPPT menghasilkan daya keadaan *steady* tertinggi, sekaligus memiliki error dan osilasi yang paling kecil sehingga *power loss* yang dihasilkan paling kecil. Dari sini juga dapat kita lihat bahwa ACO-FLC MPPT memiliki performansi terbaik pada kondisi irradiansi tinggi, jika dibandingkan dengan hasil performansi pada kondisi irradiansi sebelumnya.

Beralih ke kondisi irradansi matahari 900 W/m^2 . Berikut grafik output daya PV yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 4.7 di bawah ini.



Gambar 4.7 Output Power PV Pada Irradiansi 900 W/m^2

Pada irradansi ini, input *step* bersifat menurun, artinya, kondisi input 900 W/m^2 sebelumnya merupakan kondisi input 1000 W/m^2 , ini berarti kriteria *overshoot* dilihat secara terbalik pada grafik, dan kriteria *rise time* diubah menjadi *fall time*. Langsung kita dapat bahwa FLC-MPPT memiliki *overshoot* dan *undershoot* tertinggi, namun menghasilkan daya yang juga paling tinggi. ACO-FLC MPPT berada pada pertengahan, dengan *settling time* dan rata-rata error steady-state yang lebih baik daripada FLC-MPPT, namun menghasilkan daya dibawah FLC-MPPT. P&O MPPT disisi lain menghasilkan *settling* dan *fall time* tercepat sama seperti pada kasus irradansi sebelumnya, namun dengan osilasi dan error yang relatif sangat besar, menghasilkan efisiensi terendah pada pemakaian jangka panjang. FLC-MPPT juga menghasilkan *ripple* terendah, menjadikannya teknik paling ideal dan efisien pada pemakaian jangka panjang relatif terhadap kedua metode sisanya. Namun, *overshoot* yang sangat tinggi dari FLC-MPPT mengharuskan pemasangan sistem safety *over-voltage* yang dapat menjamin keamanan komponen sisi input *converter*.



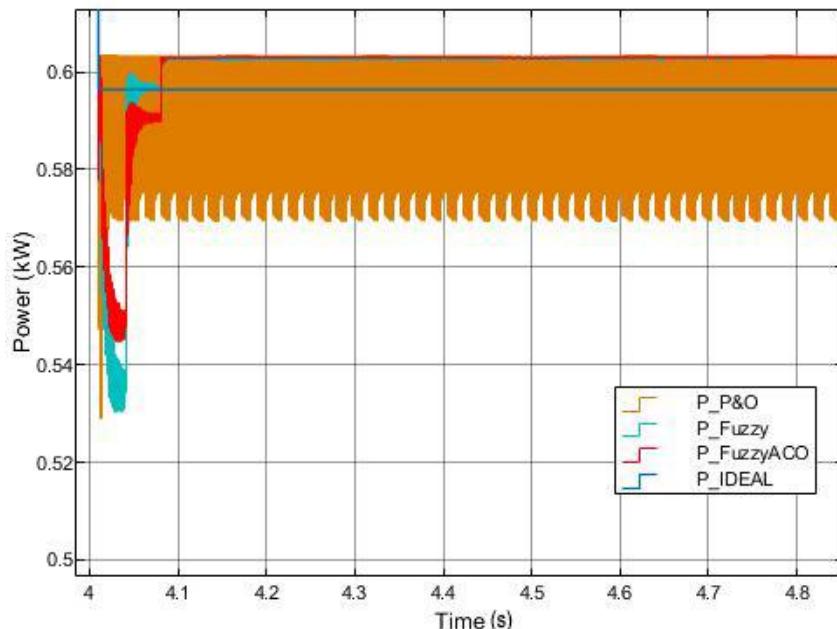
Gambar 4.8 Output Power Pada Irradiansi 900 W/m^2 Kondisi Steady (Diperbesar)

Tabel 4.4 Performansi PV Pada Irradiansi 900 W/m^2

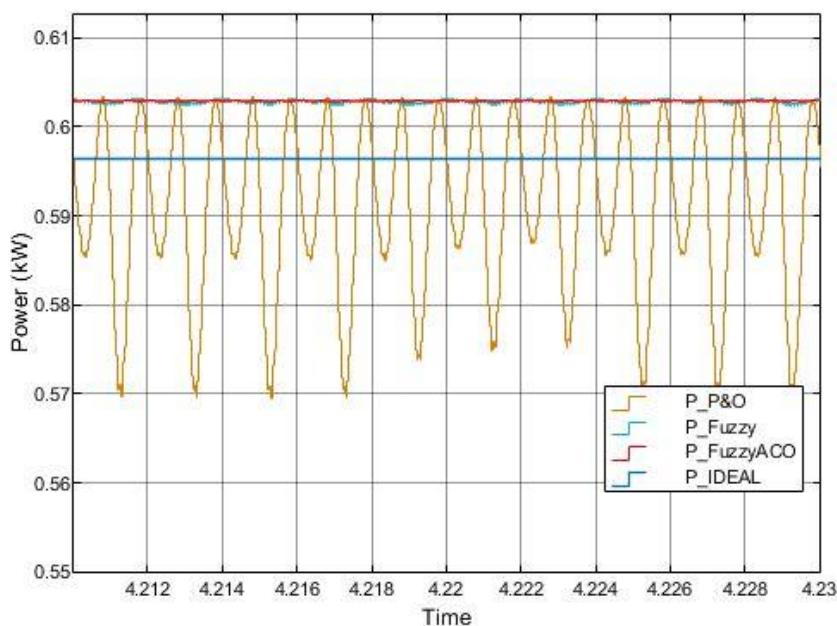
Parameter	Metode P&O	Fuzzy	Fuzzy-ACO
Avg. Ess	1.28%	-0.2%	0.1%
Settling Time	10 ms	116.8 ms	30.9 ms
Fall Time	10 ms	10 ms	10 ms
Max. Overshoot	6.88%	10.66%	2.19%
Maximum (Steady)	0.77 kW	0.769 kW	0.766 kW
Minimum (Steady)	0.73 kW	0.768 kW	0.764 kW
Peak-to-Peak (Steady)	0.039 kW	0.0009 kW	0.0019 kW

Dari gambar diatas, secara sekilas dapat kita amati bahwa FLC-MPPT dan P&O MPPT menghasilkan *maximum overshoot* tertinggi, sedangkan *undershoot* dari ketiganya dapat dikatakan sama. Namun yang sangat mencolok dari gambar ini adalah osilasi dari teknik P&O MPPT yang relatif besar, menghasilkan *power loss* sehingga efisiensi menurun. Perlu di-ingat kembali bahwa input *step* irradiansi 700 W/m^2 yaitu *step* turun, dari kondisi irradiansi 1000 W/m^2 . FLC dan ACO-FLC MPPT menghasilkan performansi yang dapat dikatakan persis terkecuali pada

kriteria *overshoot* dan *undershoot*. Sama seperti data output daya PV yang telah didapatkan dari kondisi-kondisi irradansi sebelum ini (800 dan 1000), dimana kenaikan dan penurunan daripada daya output PV FLC-MPPT memiliki *step* yang lebih besar daripada *step* kenaikan dan penurunan pada ACO-FLC MPPT. Ini disebabkan oleh perbedaan parameter *membership function* keduanya.



Gambar 4.9 Output Power Pada Irradiansi 700 W/m^2



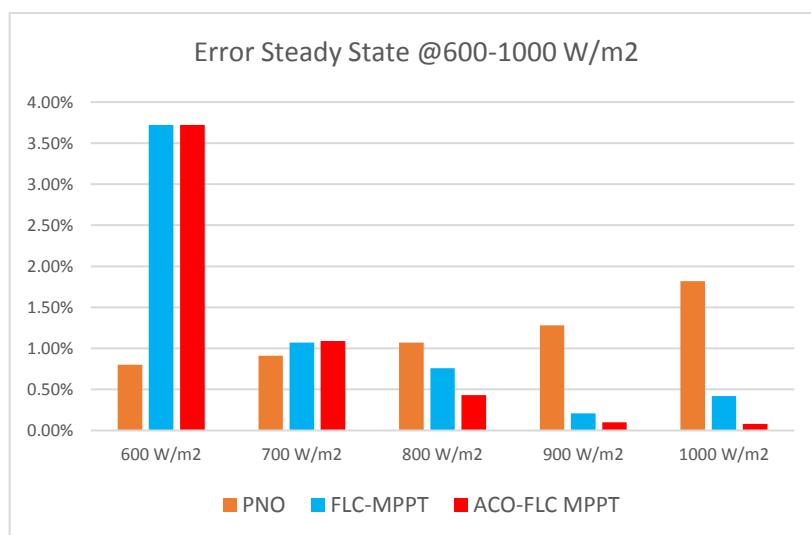
Gambar 4.10 Output Power Pada Irradiansi 700 W/m^2 Kondisi Steady
(Diperbesar)

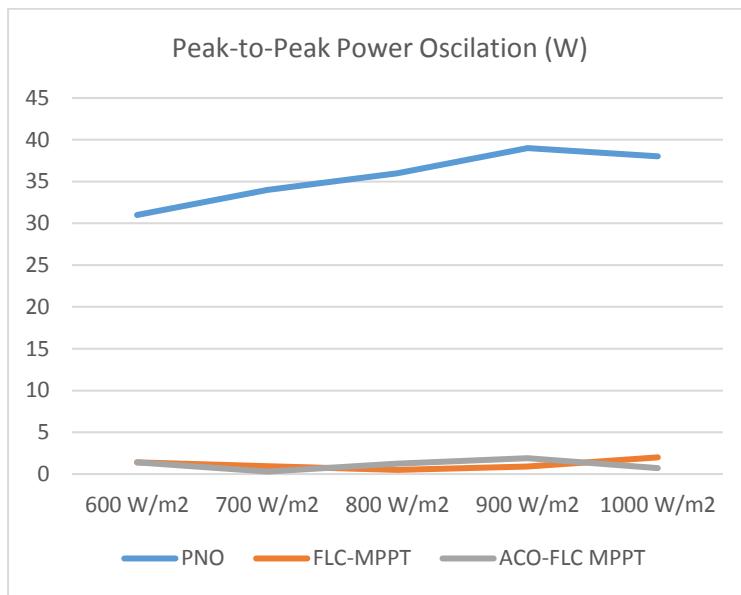
Tabel 4.5 Performansi PV Pada Irradiansi 700 W/m²

Parameter	Metode P&O	Fuzzy	Fuzzy-ACO
Avg. Ess	0.9%	-1.07%	-1.09%
Settling Time	0.0086 s	0.0371 s	0.0370 s
Fall Time	768 ns	711 ns	689 ns
Max. Overshoot	11.13%	2.24%	3.20%
Maximum (Steady)	0.6 kW	0.603 kW	0.603 kW
Minimum (Steady)	0.57 kW	0.602 kW	0.602 kW
Peak-to-Peak (Steady)	0.034 kW	0.00095 kW	0.0003 kW

Berdasarkan analisis data diatas, ACO-FLC MPPT memiliki performansi *fall-time* terbaik walaupun selisihnya sangat sedikit. Besar osilasi dan error dari FLC-MPPT sedikit lebih baik daripada ACO-FLC MPPT, walaupun sebetulnya ini masih dalam range *margin of error*. Sampai sini dapat dilihat bahwa hasil optimisasi yang ditawarkan oleh ACO pada ACO-FLC MPPT masih menunjukkan ketidak-konsistenan pada performansi PV. Hal ini dapat dilihat dari seluruh kategori/kriteria performansi yang dijadikan acuan perbandingan dan telah disajikan pada tabel.

Berdasarkan seluruh data yang telah disajikan dan dibahas, berikut ini 2 grafik yang menyimpulkan perbandingan kriteria performansi error steady-state rata-rata (Tracking Accuracy), dan besar osilasi dari ketiga metode pada seluruh kondisi uji.

**Gambar 4.11** Error Steady State Rata-rata



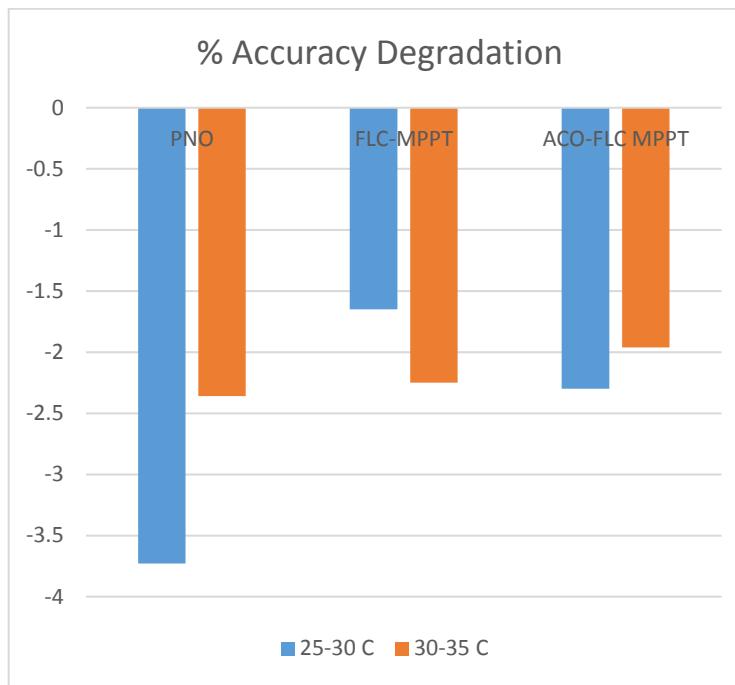
Gambar 4.12 Besar Peak-To-Peak Osilasi Daya

Pada gambar diatas, dapat terlihat bahwa ACO-FLC dan FLC-MPPT dapat mengeliminasi kelemahan utama dari teknik P&O konvensional, yaitu osilasi disekitar titik MPP. Osilasi ini dapat menurunkan efisiensi power output yang dialirkan kepada beban dan juga memperberat work load converter pada sistem PV, sehingga dapat dikatakan metode MPPT yang diajukan pada penelitian ini secara teori dapat menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi pada keseluruhan sistem PV.

4.1.2 Constant Irradiance Varying Temperature

Pada percobaan ini, irradiansi ditahan konstan pada tingkat 1000 W/m², dan temperatur dari level STC dinaikkan menjadi 30 °C, lalu 35 °C untuk melihat seberapa besar pengaruh perubahan suhu PV terhadap performansi MPPT. Secara teori, perubahan temperatur secara signifikan lebih berpengaruh daripada irradiansi dan dapat menurunkan kemampuan tracking MPPT, dan pada akhirnya berefek negatif terhadap efisiensi PV.

Dapat dilihat pada Gambar dibawah ini, transisi temperatur dari 25 derajat celcius ke 30 derajat Celsius. Pada grafik, dapat disimpulkan bahwa ini berpengaruh terhadap akurasi tracking ketiga metode MPPT, dimana metode P&O menghasilkan akurasi terburuk daripada dua metode sisanya.



Gambar 4.13 Degradasi Akurasi Akibat Kenaikan Suhu

P&O yang secara bawaan sifatnya terkendala pada kestabilan kondisi steady, juga mencerminkan kelemahannya terhadap perubahan temperatur. Efek terburuk diperlihatkan pada kenaikan dari 25 ke 30 derajat Celcius. Efek negative ini disebabkan oleh perubahan/pergeseran kurva I-V PV karena kenaikan temperatur. Pergeseran ini mengganggu proses tracking daya maksimum oleh sistem MPPT, karena sifat alami PV yaitu memiliki karakteristik yang berbeda pada kondisi berbeda, sehingga perubahan temperatur menyebabkan pergeseran kurva I-V, lalu dengan efektif merubah titik MPP. Sistem MPPT yang baik dapat beradaptasi terhadap transisi kurva atau karakteristik PV karena perubahan kondisi lingkungan. Pada gambar diatas, dapat dilihat ACO-FLC MPPT mengungguli P&O sebesar 1.43% dan 0.4%, juga lebih baik dari FLC-MPPT sebesar 0.29% pada 30-35 derajat Celcius, namun sebaliknya pada 25-30 derajat Celcius, -0.65%.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- a. Parameter perancangan sistem kontrol MPPT konvensional P&O yang berhasil di-implementasi yaitu Duty_Init = 0, Duty_Min = 0, Duty_Max = 0.85, dan delta = 0.00005, menghasilkan performansi pada pengujian *Varying Irradiance Constant Temperature* yaitu Avg. Ess 0.8% (600 W/m²), 0.9% (700 W/m²), 1.07% (800 W/m²), 1.28% (900 W/m²), 1.82% (1000 W/m²), dan pada pengujian *Constant Irradiance Varying Temperature*, %penurunan akurasi sebesar -3.73% (25-30 derajat celcius) dan -2.36% (30-35 derajat celcius).
- b. Penentuan parameter *Rule Base Fuzzy* dilakukan dengan memahami sebab-akibat daripada input dan output kontrol, sehingga dapat ditentukan *Rule Base* tersebut. Parameter range input pada *Membership Function* ditentukan dengan cara mem-prediksi input dan output maksimum-nya merujuk pada kurva I-V/P-V dari PV dan juga spesifikasi pada *datasheet*, kemudian dilakukan *trial & error* untuk meghasilkan performansi yang lebih baik pada MPPT.
- c. Parameter *membership function* ACO-FLC MPPT yang berhasil di-implementasi seperti pada tabel 4.3 dan 4.4, menghasilkan performansi pada pengujian *Varying Irradiance Constant Temperature* yaitu Avg. Ess 3.7% (600 W/m²), 1% (700 W/m²), 0.4% (800 W/m²), 0.1% (900 W/m²), 0.08% (1000 W/m²), dan pada pengujian *Constant Irradiance Varying Temperature*, %penurunan akurasi sebesar -2.3% (25-30 derajat celcius) dan -1.96% (30-35 derajat celcius). Berdasarkan hasil ini, ACO-FLC dapat mengungguli FLC-MPPT pada akurasi tracking 3 iradiansi tertinggi, dan menghasilkan efisiensi konversi PV yang lebih tinggi dari MPPT P&O pada

pemakaian jangka panjang. Berdasarkan hal ini pula, disimpulkan bahwa ACO-FLC MPPT yang diajukan memiliki performansi makin optimal ketika irradiansi semakin tinggi.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya:

- a. Implementasi Algoritma ACO lain yang dapat digunakan (Min-Max Ant, Elitist, dsb) agar dapat dibandingkan.
- b. Optimisasi ACO yang lebih *robust*, karena diketahui kelemahan ACO (Ant-System) dalam proses konvergensi kearah global optimum yang dipengaruhi oleh parameter statis *alpha*. Pada penelitian selanjutnya parameter *alpha* sangat dianjurkan agar dibuat dinamis.
- c. Pencarian parameter Fuzzy yang lebih baik, agar respon yang dihasilkan lebih cepat.

DAFTAR PUSTAKA

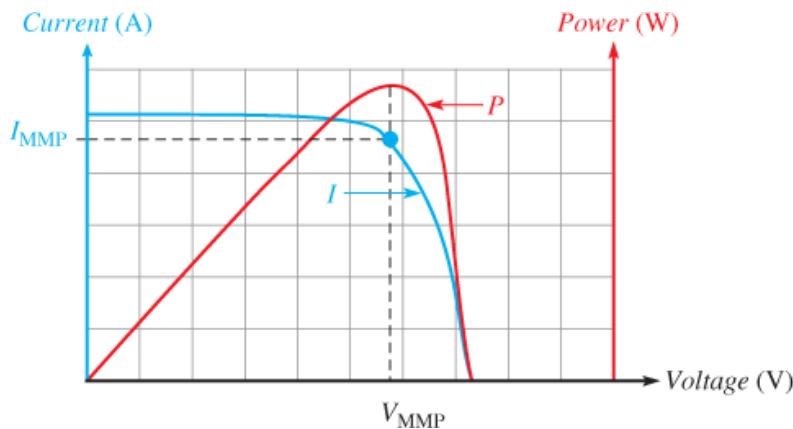
- Gomes de Brito, M. A., Galotto, L., P. Sampaio, J. L., e Melo, G. d., & Canesin, C. A. (2013). Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60.
- Abadi, I., Imron, C., Mardlijah, & Noriyati, R. D. (2018). Implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Technique on Solar Tracking System Based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *E3S Web of Conference*, 43.
- Adly, M., & Besheer, A. H. (2012). An Optimized Fuzzy Maximum Power Point Tracker for Stand Alone Photovoltaic System: Ant Colony Approach. *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*.
- Aji, S. (2013). MPPT Based on Fuzzy Logic Controller (FLC) for Photovoltaic System in Solar Car. *Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*.
- Assis, A., & Mathew, S. (2015). Fundamentals and Modelling of a Solar PV System. *IJAREEIE*.
- Borni, A. (2017). Optimized MPPT Controllers Using GA for Grid Connected Photovoltaics Systems, Comparative Study. *Procedia*, (pp. 278-296). Beirut.
- Castillo, O. (2013). Ant Colony Optimization for Membership Function Design for a Water Tank Fuzzy Logic Controller.
- Chikate, B. V., & Sadawarte, Y. A. (2015). The Factors Affecting the Performance of Solar Cell. *International Journal of Computer Applications*.
- Dimroth, F., Tibbits, T. N., Niemeyer, M., Predan, F., Beutel, P., Karcher, C., . . . al., e. (2016). Four-Junction Wafer Bonded Concentrator Solar Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 343-349.
- Dorigo, M. (2011). *Ant Colony Optimization*. Brussels.
- Duffie, J. A. (1981). *Solar Energy Conversion II*.

- Durgadevi, A., Arulselvi, S., & Natarajan, S. P. (2011). Photovoltaic Modeling and Its Characteristics. *Proceedings of Icetect*.
- Effendy, M. (2016). Implementasi Teknologi Maximum Power Point Tracking Pada Solar Sel Berbasis Fuzzy Logic Controller. *SENTRA*. Malang.
- Erickson, R. (n.d.). *DC-DC Power Converter*. Retrieved from <http://www.eng.auburn.edu>
- Gambardella, L., & Dorigo, M. (1997). Solving Symmetric and Asymmetric TSPs by Ant Colonies. *IEEE Conference on Evolutionary Computation* (pp. 622-627). Piscataway: IEEE Press.
- Go, S.-I. (2014). Simulation and Analysis of Existing MPPT Control Methods in a PV Generation System. *Journal of International Council of Electrical Engineering*.
- Hoppmann, J. (2018). The Economic Viability of Battery Storage for Residential Solar Photovoltaic Systems - A Review and a Simulation Model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Kolsi, S., Samet, H., & Amar, M. B. (2014). In *Power and Energy Engineering* (pp. 27-34).
- Koustroulis, E., K. K., & Voulgaris, N. C. (2001). Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 16.
- Li, W., & Zheng, Y. (2010). A smart and simple PV charger for portable applications. *APEC*.
- Lin, C. L. (2015). Case Study of Solar Power Producing Efficiency from a Photovoltaic System. *Open Journal of Energy Efficiency*, 4, 45-52.
- Liu, C.-L. (2012). A PSO-Based MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems Subject to Inhomogeneous Insolation.
- Mizutani, E. (1997). *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Prentice Hall.
- Murali, S., & Jamuna, K. (2014). Design and Implementation of a Converter for Hybrid Energy System.
- N.Femia, G. (2005). Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. *IEEE Trans. Power Electronics*.

- Noman, A. (2012). A Fuzzy Logic Control Method for MPPT of PV Systems.
- Sayadmahmoudian, M., Horan, B., Soon, T. K., Rahmani, R., Than Oo, A. M., Mekhilef, S., & Stojkevski, A. (2016). State of the Art Artificial Intelligence-based MPPT Techniques for Mitigating Partial Shading Effects on PV Systems - A Review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (pp. 435-455). Elsevier.
- Stutzle, T., & Dorigo, M. (2004). *Ant Colony Optimization*. MIT Press.
- Swami, R. (2012). Solar Cell. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2(7).
- Weiss, I. (2017). *Basic Calculation of an Inverting Buck-Boost Converter*. Retrieved from Texas Instrument.

LAMPIRAN

A. Maximum Power Point (MPP)



Dimana grafik biru menunjukkan kurva I-V PV-Array dan grafik merah menunjukkan grafik P-V dari PV-Array. MPP adalah daya output maksimum teoritis pada suatu keadaan lingkungan tertentu.

B. Script Optimisasi (*.mat)

```
MaxIt=300;
nAnt=40; % Jumlah entitas
alpha=0.72; % Pembeban Pheromone
beta=0.66; % Pembeban Heuristic
rho=0.75; % koefisien penguapan / evaporasi
pheromone
% =====

% Sekarang mulai definisikan batas-batas fungsi keanggotaan.
% Batas-batas di-deklarasikan dalam bentuk array kolom
% MF Kiri

a(:,i)=-12;
b(:,i)=-8;
c(:,i)=-4; %AP1
% MF Kiri-Tengah
d(:,i)=-8; %AP2
e(:,i)=-4;
f(:,i)=0; %AP3
% MF Tengah
g(:,i)=-4; %AP4
h(:,i)=0;
j(:,i)=4; %AP5
% MF Kanan-Tengah
k(:,i)=0; %AP6
l(:,i)=4;
```

```

m(:,i)=8; %AP7
% MF Kanan
o(:,i)=4; %AP8
p(:,i)=8;
q(:,i)=12;

% Inisialisasi posisi awal agen.
% Posisi awal agen dipilih secara random dengan batasan tidak
melebihi-
% range fungsi keanggotaan terkait.
x1(:,i)=(c(:,i)-(rand(n,1)*(c(:,i)-b(:,i)))); %constraint:
b<=x1<=c
x2(:,i)=(d(:,i)-(rand(n,1)*(d(:,i)-a(:,i)))); %constraint:
a<=x2<=d
x3(:,i)=(f(:,i)-(rand(n,1)*(f(:,i)-e(:,i)))); %constraint:
e<=x3<=f
x4(:,i)=(h(:,i)-(rand(n,1)*(h(:,i)-g(:,i)))); %constraint:
g<=x4<=h
x5(:,i)=(j(:,i)-(rand(n,1)*(j(:,i)-h(:,i)))); %constraint:
h<=x5<=j
x6(:,i)=(l(:,i)-(rand(n,1)*(l(:,i)-k(:,i)))); %constraint:
k<=x6<=l
x7(:,i)=(q(:,i)-(rand(n,1)*(q(:,i)-m(:,i)))); %constraint:
m<=x7<=q
x8(:,i)=(p(:,i)-(rand(n,1)*(p(:,i)-o(:,i)))); %constraint:
o<=x8<=p
#
% Selanjutnya menghitung MSE [mean square error] yang dihasilkan
oleh setiap partikel

myu1(:,i)=1; % myu1=derajat
keanggotaan 1 batas kiri (a) (tetap)
myu2(:,i)=1; % myu2=derajat
keanggotaan 1 batas tengah (b) (tetap)
myu3(:,i)=(c(:,i)-x1(:,i))/(c(:,i)-b(:,i)); % myu3=derajat
keanggotaan 1 batas kanan (c)
y1=1; % y1=derajat
keanggotaan ideal 1 batas kiri (a) adalah 1 (tetap)
y2=1; % y2=derajat
keanggotaan ideal 1 batas tengah (b) adalah 1 (tetap)
y3=0; % y3=derajat
keanggotaan ideal 1 batas kanan (c) adalah 0

myu4(:,i)=(x2(:,i)-d(:,i))/(e(:,i)-d(:,i)); % myu4=derajat
keanggotaan 2 batas kiri (d)
myu5(:,i)=1; % myu5=derajat
keanggotaan 2 batas tengah (e) (tetap)
myu6(:,i)=(f(:,i)-x3(:,i))/(f(:,i)-e(:,i)); % myu6=derajat
keanggotaan 2 batas kanan (f)
y4=0; % y4=derajat
keanggotaan ideal 2 batas kiri (d) adalah 0
y5=1; % y5=derajat
keanggotaan ideal 2 batas tengah (e) adalah 1 (tetap)
y6=0; % y6=derajat
keanggotaan ideal 2 batas kanan (f) adalah 0

```

```

myu7(:,i)=(x4(:,i)-g(:,i))/(h(:,i)-g(:,i)); % myu7=derajat
keanggotaan 3 batas kiri (g) % myu8=derajat
myu8(:,i)=1; % myu8=derajat
keanggotaan 3 batas tengah (h) (tetap)
myu9(:,i)=(j(:,i)-x5(:,i))/(j(:,i)-h(:,i)); % myu9=derajat
keanggotaan 3 batas kanan (j) % y7=derajat
y7=0; % y7=derajat
keanggotaan ideal 3 batas kiri (g) adalah 0
y8=1; % y8=derajat
keanggotaan ideal 3 batas tengah (h) adalah 1 (tetap)
y9=0; % y9=derajat
keanggotaan ideal 3 batas kanan (j) adalah 0

myu10(:,i)=(x6(:,i)-k(:,i))/(l(:,i)-k(:,i)); % myu10=derajat
keanggotaan 4 batas kiri (k) % myu11=derajat
myu11(:,i)=1; % myu11=derajat
keanggotaan 4 batas tengah (l) (tetap)
myu12(:,i)=(m(:,i)-x7(:,i))/(m(:,i)-l(:,i)); % myu12=derajat
keanggotaan 4 batas kanan (m) % y10=derajat
y10=0; % y10=derajat
keanggotaan ideal 4 batas kiri (k) adalah 0
y11=1; % y11=derajat
keanggotaan ideal 4 batas tengah (l) adalah 1 (tetap)
y12=0; % y12=derajat
keanggotaan ideal P4 batas kanan (m) adalah 0

myu13(:,i)=(x8(:,i)-o(:,i))/(p(:,i)-o(:,i)); % myu13=derajat
keanggotaan 5 batas kiri (o) % myu14=derajat
myu14(:,i)=1; % myu14=derajat
keanggotaan 5 batas tengah (p) (tetap)
myu15(:,i)=1; % myu15=derajat
keanggotaan 5 batas kanan (q) (tetap)
y13=0; % y13=derajat
keanggotaan ideal 5 batas kiri (o) adalah 0
y14=1; % y14=derajat
keanggotaan ideal 5 batas tengah (p) adalah 1 (tetap)
y15=1; % y15=derajat
keanggotaan ideal 5 batas kanan (q) adalah 1 (tetap)

mse(:,i)=((y1-myu1(:,i)).^2)+((y2-myu2(:,i)).^2)+((y3-
myu3(:,i)).^2)...
+((y4-myu4(:,i)).^2)+((y5-myu5(:,i)).^2)+((y6-
myu6(:,i)).^2)...
+((y7-myu7(:,i)).^2)+((y8-myu8(:,i)).^2)+((y9-
myu9(:,i)).^2)...
+((y10-myu10(:,i)).^2)+((y11-myu11(:,i)).^2)+((y12-
myu12(:,i)).^2)...
+((y13-myu13(:,i)).^2)+((y14-myu14(:,i)).^2)+((y15-
myu15(:,i)).^2))/15;

% Posisi Semut
AP1=x1;
AP2=x2;
AP3=x3;
AP4=x4;
AP5=x5;
AP6=x6;

```

```

AP7=x7;
AP8=x8;

xi1(:,i)=AP1(:,i)+(mse(:,i)*rho(:,i));
xj1(:,i)=AP1(:,i)-(mse(:,i)*rho(:,i));
xi2(:,i)=AP2(:,i)+(mse(:,i)*rho(:,i));
xj2(:,i)=AP2(:,i)-(mse(:,i)*rho(:,i));
xi3(:,i)=AP3(:,i)+(mse(:,i)*rho(:,i));
xj3(:,i)=AP3(:,i)-(mse(:,i)*rho(:,i));
xi4(:,i)=AP4(:,i)+(mse(:,i)*rho(:,i));
xj4(:,i)=AP4(:,i)-(mse(:,i)*rho(:,i));
xi5(:,i)=AP5(:,i)+(mse(:,i)*rho(:,i));
xj5(:,i)=AP5(:,i)-(mse(:,i)*rho(:,i));
xi6(:,i)=AP6(:,i)+(mse(:,i)*rho(:,i));
xj6(:,i)=AP6(:,i)-(mse(:,i)*rho(:,i));
xi7(:,i)=AP7(:,i)+(mse(:,i)*rho(:,i));
xj7(:,i)=AP7(:,i)-(mse(:,i)*rho(:,i));
xi8(:,i)=AP8(:,i)+(mse(:,i)*rho(:,i));
xj8(:,i)=AP8(:,i)-(mse(:,i)*rho(:,i));

CP1(:,i)=[xi1(:,i),xj1(:,i)];
CP2(:,i)=[xi2(:,i),xj2(:,i)];
CP3(:,i)=[xi3(:,i),xj3(:,i)];
CP4(:,i)=[xi4(:,i),xj4(:,i)];
CP5(:,i)=[xi5(:,i),xj5(:,i)];
CP6(:,i)=[xi6(:,i),xj6(:,i)];
CP7(:,i)=[xi7(:,i),xj7(:,i)];
CP8(:,i)=[xi8(:,i),xj8(:,i)];

% pheromone
tau1=ones*[xi1(:,i),xj1(:,i)];
tau2=ones*[xi2(:,i),xj2(:,i)];
tau3=ones*[xi3(:,i),xj3(:,i)];
tau4=ones*[xi4(:,i),xj4(:,i)];
tau5=ones*[xi5(:,i),xj5(:,i)];
tau6=ones*[xi6(:,i),xj6(:,i)];
tau7=ones*[xi7(:,i),xj7(:,i)];
tau8=ones*[xi8(:,i),xj8(:,i)];
%=====

%% Construct solution
for i=1:n1
    for z=1:n1
        if CP1(i,z)==0
            h1(i,z)=0;
        else
            h1(i,z)=1/CP1(i,z);
        end
        if CP2(i,z)==0
            h2(i,z)=0;
        else
            h2(i,z)=1/CP2(i,z);
        end
        if CP3(i,z)==0
            h3(i,z)=0;
        else
            h3(i,z)=1/CP3(i,z);
        end
    end
end

```

```

        end
    if CP4(i,z)==0
        h4(i,z)=0;
    else
        h4(i,z)=1/CP4(i,z);
    end
    if CP5(i,z)==0
        h5(i,z)=0;
    else
        h5(i,z)=1/CP5(i,z);
    end
    if CP6(i,z)==0
        h6(i,z)=0;
    else
        h6(i,z)=1/CP6(i,z);
    end
    if CP7(i,z)==0
        h7(i,z)=0;
    else
        h7(i,z)=1/CP7(i,z);
    end
    if CP8(i,z)==0
        h8(i,z)=0;
    else
        h8(i,z)=1/CP8(i,z);
    end
end
for i=1:MaxIt
    % Posisi tiap semut
    % mh = heuristic information
    for i=1:m1
mh1=h1;
%1
for z=1:n1-1
    startplaces1(z,1)=fix(1+rand*(n1-1));
    c1=startplaces1(i,z);
    mh1(:,c1)=0;
    temp=(taul(c1,:).^beta).* (mh1(c1,:).^alpha);
    s1=(sum(temp));
    P1=(1/s1).*temp;
    r=rand;
    s1=0;
    for u=1:n1
        s1=s1+P1(u);
        if r<=s1
            startplaces1(i,z+1)=u;
            break
        end
    end
end
end
for i=1:m1
mh2=h2;
%2
for z=1:n1-1

```

```

startplaces2(z,1)=fix(1+rand*(n1-1));
c2=startplaces2(i,z);
mh2(:,c1)=0;
temp2=(tau2(c2,:).^beta).* (mh2(c2,:).^alpha);
s2=(sum(temp2));
P2=(1/s2).*temp2;
r=rand;
s2=0;
for u=1:n1
    s2=s2+P2(u);
    if r<=s2
        startplaces2(i,z+1)=u;
        break
    end
end
end

%3
for i=1:m1
mh3=h3;
for z=1:n1-1
    startplaces3(z,1)=fix(1+rand*(n1-1));
    c3=startplaces3(i,z);
    mh3(:,c3)=0;
    temp3=(tau3(c3,:).^beta).* (mh3(c3,:).^alpha);
    s3=(sum(temp3));
    P3=(1/s3).*temp3;
    r=rand;
    s=0;
    for u=1:n1
        s3=s3+P3(u);
        if r<=s
            startplaces4(i,z+1)=u;
            break
        end
    end
end
end
%4
for i=1:m1
mh4=h4;
for z=1:n1-1
    startplaces4(z,1)=fix(1+rand*(n1-1));
    c4=startplaces4(i,z);
    mh4(:,c1)=0;
    temp4=(tau4(c4,:).^beta).* (mh4(c4,:).^alpha);
    s4=(sum4(temp));
    P4=(1/s4).*temp;
    r=rand;
    s4=0;
    for u=1:n1
        s4=s4+P4(u);
        if r<=s4
            startplaces4(i,z+1)=u;
            break
        end
    end
end
end

```

```

        end
    end
end
%5
for i=1:m1
mh5=h5;
for z=1:n1-1
startplaces5(z,1)=fix(1+rand*(n1-1));
c5=startplaces5(i,z);
mh5(:,c5)=0;
temp5=(tau5(c5,:).^beta).* (mh5(c5,:).^alpha);
s5=(sum(temp5));
P5=(1/s5).*temp5;
r=rand;
s5=0;
for u=1:n1
s5=s5+P1(u);
if r<=s5
startplaces5(i,z+1)=u;
break
end
end
end
end
%6
for i=1:m1
mh6=h6;
for z=1:n1-1
startplaces6(z,1)=fix(1+rand*(n1-1));
c6=startplaces6(i,z);
mh6(:,c6)=0;
temp6=(tau6(c6,:).^beta).* (mh6(c6,:).^alpha);
s6=(sum(temp));
P6=(1/s6).*temp;
r=rand;
s6=0;
for u=1:n1
s6=s6+P1(u);
if r<=s6
startplaces6(i,z+1)=u;
break
end
end
end
end
%7
for i=1:m1
mh7=h7;
for z=1:n1-1
startplaces7(z,1)=fix(1+rand*(n1-1));
c7=startplaces7(i,z);
mh7(:,c7)=0;
temp7=(tau7(c7,:).^beta).* (mh7(c7,:).^alpha);
s7=(sum(temp7));
P7=(1/s7).*temp7;
r=rand;
s7=0;
for u=1:n1

```

```

s7=s7+P7(u);
if r<=s7
    startplaces7(i,z+1)=u;
    break
end
end
%8
for i=1:m1
mh8=h8;
for z=1:n1-1
    startplaces8(z,1)=fix(1+rand*(n1-1));
    c8=startplaces8(i,z);
    mh8(:,c8)=0;
    temp8=(tau8(c8,:).^beta).* (mh8(c8,:).^alpha);
    s8=(sum(temp8));
    P8=(1/s8).*temp8;
    r=rand;
    s=0;
    for u=1:n1
        s8=s8+P8(u);
        if r<=s8
            startplaces8(i,z+1)=u;
            break
        end
    end
end
end
% Menghitung distance
for i=1:m1
s1=0;
%1
for z=1:n1
    s1=s1+CP1(i);
    f1(i)=s1;
    cost1=f1;
    f1=f1-rho*min(f1);
end
end
%2
for i=1:m1
s2=0;
for z=1:n1
    s2=s2+CP2(i);
    f2(i)=s2;
    cost2=f2;
    f2=f2-rho*min(f2);
end
end
%3
for i=1:m1
s3=0;
for z=1:n1
    s3=s3+CP3(i);
    f3(i)=s3;
    cost3=f3;
end
end

```

```

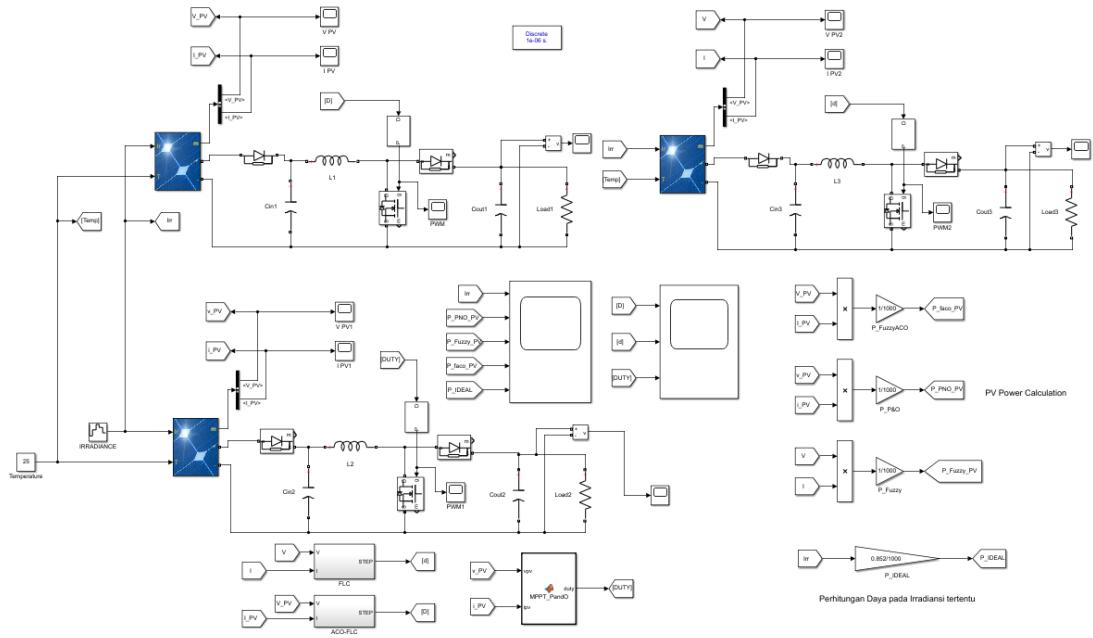
f3=f3-rho*min(f3);
end
end
%4
for i=1:m1
s4=0;
for z=1:n1
s4=s4+CP4(i);
f4(i)=s4;
cost4=f4;
f4=f4-rho*min(f4);
end
end
%5
for i=1:m1
s5=0;
for z=1:n1
s5=s5+CP5(i);
f5(i)=s5;
cost5=f5;
f5=f5-rho*min(f5);
end
end
%6
for i=1:m1
s6=0;
for z=1:n1
s6=s6+CP6(i);
f6(i)=s6;
cost6=f6;
f6=f6-rho*min(f6);
end
end
%7
for i=1:m1
s7=0;
for z=1:n1
s7=s7+CP7(i);
f7(i)=s7;
cost7=f7;
f7=f7-rho*min(f7);
end
end
%8
for i=1:m1
s8=0;
for z=1:n1
s8=s8+CP8(i);
f8(i)=s8;
cost8=f8;
f8=f8-rho*min(f8);
end
end

%% Update
for i=1:m1
%1

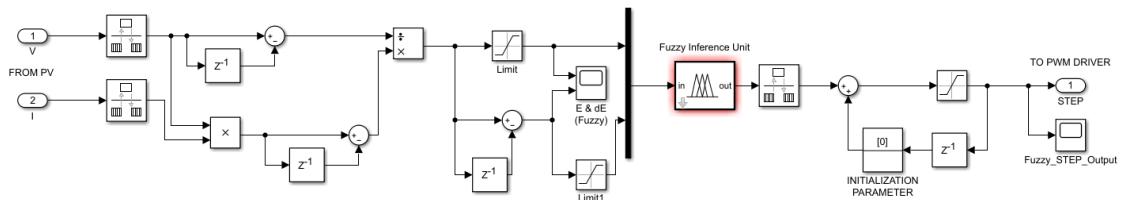
```

```
for z=1:n1
dt1=1/f1(i);
tau1=(1-rho)*tau1+dt1;
end
%2
for z=1:n1
dt2=1/f2(i);
tau2=(1-rho)*tau2+dt2;
end
%3
for z=1:n1
dt3=1/f3(i);
tau3=(1-rho)*tau3+dt3;
end
%4
for z=1:n1
dt4=1/f4(i);
tau4=(1-rho)*tau4+dt4;
end
%5
for z=1:n1
dt5=1/f5(i);
tau5=(1-rho)*tau5+dt5;
end
%6
for z=1:n1
dt6=1/f6(i);
tau6=(1-rho)*tau6+dt6;
end
%7
for z=1:n1
dt7=1/f7(i);
tau7=(1-rho)*tau7+dt7;
end
%8
for z=1:n1
dt8=1/f8(i);
tau8=(1-rho)*tau8+dt8;
end
end
```

C. Skema Simulasi Keseluruhan



D. Skema Signal Conditioning & Fuzzy System



BIODATA PENULIS



Raihan Sergi Perdana, lahir di Tangerang 30 Oktober 1998. Lulus Sekolah Menengah Pertama dan Kedua dari SMA Ibnu Hajar Boarding School Jakarta pada tahun 2013 dan 2016 berturut-turut. Diterima di ITS jalur undangan di tahun 2016 di Jurusan Teknik Fisika ITS sebagai pilihan pertamanya. Motto hidup yang masih dipegang adalah berbuat tanpa pamrih, dan berharap dapat melanjutkan studinya di luar negeri. Bagi pembaca yang berminat untuk berdiskusi dapat menghubungi penulis via e-mail raihansergi@gmail.com.

