



TUGAS AKHIR - TF 141581

**STUDI PERFORMANSI *MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT)* BERBASIS KONTROLER LOGIKA FUZZY TIPE-2 PADA *PLANT PHOTOVOLTAIC* MENGGUNAKAN *ACTIVE DUAL AXIS SOLAR TRACKER***

QURROTUL UYUNIYAH  
NRP 0231144000039

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

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



*FINAL PROJECT - TF 141581*

***STUDY OF MAXIMUM POWER POINT  
TRACKING (MPPT) PERFORMANCE BASED ON  
FUZZY LOGIC CONTROLLER TYPE-2 ON  
PHOTOVOLTAIC PLANT USING ACTIVE DUAL  
AXIS SOLAR TRACKER***

*QURROTUL UYUNIYAH  
NRP 0231144000039*

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

*Departement of Engineering Physics  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2018*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Qurrotul Uyuniyah  
NRP : 02311440000039  
Departemen/Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir saya yang berjudul “Studi Performansi *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* Berbasis Kontroler Logika Fuzzy Tipe-2 pada *Plant Photovoltaic* Menggunakan *Active Dual Axis Solar Tracker*” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 13 Juli 2018  
Yang membuat pernyataan,

Qurrotul Uyuniyah  
NRP. 02311440000039

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

LEMBAR PENGESAHAN I  
TUGAS AKHIR

STUDI PERFORMANSI *MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT)* BERBASIS KONTROLER LOGIKA FUZZY TIPE-2 PADA *PLANT PHOTOVOLTAIC* MENGGUNAKAN *ACTIVE DUAL AXIS SOLAR TRACKER*

Oleh:

Qurrotul Uyuniyah  
NRP. 02311440000039

Surabaya, 13 Juli 2018

Menyetujui,  
Dosen Pembimbing



Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.  
NIPN. 1971006 199903 1 002

Mengetahui,  
Kepala Departemen  
Teknik Elektro FTI-ITS



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D  
NIPN. 19780902 200312 1 002

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## LEMBAR PENGESAHAN

### **STUDI PERFORMANSI *MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT)* BERBASIS KONTROLER LOGIKA FUZZY TIPE-2 PADA *PLANT PHOTOVOLTAIC* MENGGUNAKAN *ACTIVE DUAL AXIS SOLAR TRACKER***




#### **TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**OURROTUL UYUNIYAH**  
**NRP. 0231144000039**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.  (Pembimbing)
2. Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc.  (Penguji I)
3. Ir. Ronny Dwi Noriyati, M. Kes.  (Penguji II)

**SURABAYA**  
**JULI, 2018**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**STUDI PERFORMANSI *MAXIMUM POWER POINT TRACKING*  
(*MPPT*) BERBASIS KONTROLER LOGIKA FUZZY TIPE-2  
PADA *PLANT PHOTOVOLTAIC* MENGGUNAKAN *ACTIVE  
DUAL AXIS SOLAR TRACKER***

**Nama Mahasiswa** : Qurrotul Uyuniyah  
**NRP** : 0231144000039  
**Departemen** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.

**ABSTRAK**

Konsumsi energi dunia yang meningkat secara signifikan dengan penambahan waktu mengakibatkan semakin menipisnya jumlah energi primer karena terjadi ketidakseimbangan energi yang diproduksi dengan energi yang dikonsumsi sehingga banyak dikembangkan terobosan untuk memanfaatkan energi terbarukan. Sistem *photovoltaic* merupakan salah satu energi terbarukan yang mudah digunakan. Kondisi geografis Indonesia yang dilintasi oleh garis khatulistiwa menjadikan Indonesia memiliki potensi energi surya yang besar. Konversi daya dari *PV* normal masih rendah, sehingga dirancang sistem *PV* dengan menggunakan *active dual axis solar tracker* agar posisi *PV* dapat disesuaikan dengan perubahan posisi matahari untuk mendapatkan efisiensi maksimal. Sistem *active dual axis solar tracker* diintegrasikan dengan algoritma *maximum power point tracking (MPPT)* agar *PV* tetap beroperasi pada *maximum power point* walaupun variasi *input* berubah-ubah. Metode kontrol yang diterapkan pada *MPPT* adalah logika fuzzy tipe-2 yang cocok diterapkan pada *plant* dengan nilai ketidakpastian tinggi. Simulasi uji *tracking* dilakukan dengan membandingkan daya *output* dari sistem *PV fixed* dengan *active dual axis solar tracker*. *MPPT* berbasis logika fuzzy tipe-2 berhasil meningkatkan rata-rata daya *output* sebesar 10,48% dengan peningkatan tertinggi adalah 17,48% diperoleh pada pukul 15.00 WIB dengan selisih daya dari sistem *PV fixed* dengan *active dual axis solar tracker* sebesar 36,08 Watt yaitu dari daya *output* bernilai 206,323 menjadi 242,4 Watt.

**Kata Kunci** : *Solar Tracker, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Logika Fuzzy Tipe-2*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**STUDY OF MPPT PERFORMANCE BASED ON FUZZY LOGIC  
CONTROLLER TYPE-2 ON PHOTOVOLTAIC PLANT USING  
ACTIVE DUAL AXIS SOLAR TRACKER**

**Name** : Qurrotul Uyuniyah  
**NRP** : 0231144000039  
**Departement** : Engineering Physics  
**Supervisor** : Dr. Imam Abadi, S.T., M.T

**ABSTRACT**

*The significantly increased world energy consumption resulted in the depletion of primary energy due to the imbalance of energy produced with the energy consumed so that many researcher developed breakthroughs to utilize renewable energy. The photovoltaic system is an easy-to-use renewable energy. Indonesia's geographical conditions crossed by the equator make Indonesia has huge solar energy potential. The power conversion from normal PV is still low, so the PV system is designed by using active dual axis solar tracker to position the PV so that it can be adjusted with the sun's change in position to get maximum efficiency. The dual active axis solar tracker system is integrated with a maximum power point tracking (MPPT) algorithm to keep the PV operating at the maximum power point even when the input variations keep changing it's value. The control method applied to MPPT is fuzzy logic type-2 which is suitable to be applied to plant with high uncertainty value. Tracking test simulation is done by comparing the output power of a fixed PV system with active dual axis solar tracker. MPPT-based fuzzy logic type-2 managed to increase the average output power of 10.48% with the highest increase is 17.48% obtained at 15.00 WIB with the difference of power from a fixed PV system with active dual axis solar tracker with value 36.08 Watt from the output power 206.323 to 242.4 Watt.*

**Keyword:** Solar Tracker, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Fuzzy Logic Controller Type-2

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga dapat terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul

**“Studi Performansi *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* Berbasis Kontroler Logika Fuzzy Tipe-2 pada *Plant Photovoltaic* menggunakan *Active Dual Axis Solar Tracker*”**

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan tugas akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan ilmu, bimbingan serta sarana dan prasarana selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika ITS.
2. Bapak Dr. Imam Abadi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
3. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di Departemen Teknik Fisika - ITS.
4. Ayah Djudi dan Ibu Ninik Indrawati sebagai orang tua penulis serta Adik Wiwi yang senantiasa memberikan doa dan kebahagiaan serta menjadi motivasi terbesar penulis.
5. Niken Arina P “Kenzi” dan Adista Dinastari “Canyol” sebagai teman uwu penulis yang senantiasa memberikan kebahagiaan, dukungan, bimbingan, pundak dikala sedih dan menerima segala ke-*extra*-an penulis serta menunjukkan seni dalam berteman kepada penulis.
6. Annisa Marliana Fitria sebagai teman KP dan teman EXO-L penulis yang senantiasa memberikan motivasi untuk selalu bermimpi besar.
7. Sarwenda Kusuma W sebagai teman ciwi Laboratorium Pengukuran Fisis yang senantiasa menemani penulis untuk *upgrading* setiap minggu malam.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



8. Amalia Puruhita dan Mbak Novia NF sebagai teman fuzzy yang senantiasa menemani penulis dalam mengerjakan tugas akhir di Labkom.
9. Mbak Tiara Oktavia “Lalisa” sebagai teman satu dosen pembimbing yang senantiasa menjadi teman berbagi keluh kesah, kebahagiaan dan semangat serta telah memberikan sosok kakak kepada penulis.
10. Mbak Dina, Ames, Chervi, Kiki, Tika, Sartika, Kurnia, Ardi, Musa dan Dani selaku teman satu dosen pembimbing yang telah bersama-sama memberikan bantuan selama pengerjaan tugas akhir.
11. Teman-teman Laboratorium Pengukuran Fisis yang telah memberikan dukungan dan doa untuk penulis.
12. Teman-teman F49 yang telah memberikan doa dan dukungan kepada penulis serta bersama-sama melewati masa perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa mungkin masih ada kekurangan dalam laporan ini, sehingga kritik dan saran penulis terima. Semoga laporan ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis dan pihak yang membacanya.

Surabaya, 13 Juli 2018

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

|  |       |
|--|-------|
| HALAMAN JUDUL.....   | i     |
| COVER.....   | iii   |
| PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....   | v     |
| LEMBAR PENGESAHAN I.....   | vii   |
| LEMBAR PENGESAHAN II.....  | ix    |
| ABSTRAK.....   | xi    |
| ABSTRACT.....  | xiii  |
| KATA PENGANTAR.....  | xv    |
| DAFTAR ISI.....  | xix   |
| DAFTAR GAMBAR.....   | xxiii |
| DAFTAR TABEL.....  | xxvii |
| DAFTAR NOTASI.....   | xxix  |
| BAB I PENDAHULUAN.....   | 1     |
| 1.1 Latar Belakang.....  | 1     |
| 1.2 Rumusan Masalah.....   | 3     |
| 1.3 Tujuan.....  | 3     |
| 1.4 Lingkup Kajian.....  | 3     |
| 1.5 Sistematika Laporan.....   | 4     |
| BAB II DASAR TEORI.....  | 7     |
| 2.1 <i>Photovoltaic Model</i> .....  | 7     |
| 2.2 Karakteristik Modul <i>PV</i> .....  | 8     |
| 2.3 <i>Maximum Power Point Tracking</i> .....  | 9     |
| 2.4 Konverter <i>DC-DC</i> .....   | 11    |
| 2.4.1 <i>Buck Converter</i> .....  | 11    |
| 2.4.2 <i>Boost Converter</i> .....   | 12    |
| 2.4.3 <i>Buck-Boost Converter</i> .....  | 13    |
| 2.5 <i>Fuzzy Logic Controller</i> .....  | 14    |
| 2.6 <i>Solar Tracker</i> .....   | 17    |
| 2.7 Karakteristik Respon.....  | 19    |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....   | 21    |
| 3.1 Diagram Blok <i>MPPT</i> berbasis Logika Fuzzy Tipe-2.....                             | 24    |
| 3.2 Spesifikasi Sistem.....  | 25    |
| 3.3 Pemodelan <i>PV</i> , <i>Solar Tracker</i> dan Konverter <i>DC-DC Buck-Boost</i> ..... | 26    |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

|                                     |   |                                     |
|-------------------------------------|---|-------------------------------------|
| 3.3.1                               | Pemodelan <i>PV</i> .....                                     | 26                                  |
| 3.3.2                               | Pemodelan <i>Solar Tracker</i> .....                          | 31                                  |
| 3.3.3                               | Pemodelan Konverter <i>Buck-Boost</i> .....                   | 33                                  |
| 3.4                                 | Pengambilan Data Primer.....                                  | 33                                  |
| 3.5                                 | Perancangan Kontrol Logika Fuzzy dan Fuzzy Tipe-2 ....        | 38                                  |
| 3.6                                 | Simulasi Perancangan <i>MPPT</i> berbasis Fuzzy Tipe-2 .....  | 45                                  |
| BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN..... |   | 47                                  |
| 4.1                                 | Profil <i>Input</i> Modul <i>PV</i> .....                     | 47                                  |
| 4.2                                 | Simulasi Uji <i>Tracking MPPT</i> berbasis Fuzzy Type-2 ..... | 51                                  |
| 4.3                                 | Simulasi Uji <i>Tracking MPPT</i> berbasis Logika Fuzzy ..... | 53                                  |
| 4.4                                 | Simulasi Uji <i>Tracking MPPT</i> berbasis P&O .....          | 55                                  |
| 4.5                                 | Perbandingan Peningkatan Daya <i>Output</i> Kontroler.....    | 58                                  |
| 4.6                                 | Uji Indeks Performansi Kontroler .....                        | 62                                  |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....    |   | 67                                  |
| 5.1                                 | Kesimpulan .....  | 67                                  |
| 5.2                                 | Saran .....   | 67                                  |
| DAFTAR PUSTAKA .....                |   | 69                                  |
| LAMPIRAN.....                       |   | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

|  |    |
|--|----|
| <b>Gambar 2. 1.</b> Rangkaian Ekuivalen <i>PV</i> dengan Dua Dioda .....   | 7  |
| <b>Gambar 2. 2.</b> Kurva Karakteristik I-V dan P-V [13] (Adapted) ..  | 8  |
| <b>Gambar 2. 3.</b> Kurva Karakteristik I-V dan P-V dengan Variasi<br>Penyinaran dan Temperatur Konstan [13] (Adapted) ..... | 8  |
| <b>Gambar 2. 4.</b> Kurva Karakteristik I-V dan P-V dengan Variasi<br>Temperatur dan Penyinaran Konstan [13] (Adapted) ..... | 9  |
| <b>Gambar 2. 5.</b> Kurva <i>MPPT</i> dengan Kondisi Lingkungan Konstan<br>[14].....   | 10 |
| <b>Gambar 2. 6.</b> Blok Diagram <i>MPPT</i> pada Sistem <i>PV</i> [15] .....  | 10 |
| <b>Gambar 2. 7.</b> Rangkaian Konverter Model <i>Buck</i> [8].....   | 12 |
| <b>Gambar 2. 8.</b> Rangkaian Konverter Model <i>Boost</i> [8].....  | 12 |
| <b>Gambar 2. 9.</b> Rangkaian Konverter <i>Buck-Boost</i> [8].....   | 13 |
| <b>Gambar 2. 10.</b> Blok Diagram <i>FLC</i> Tipe-2 .....  | 15 |
| <b>Gambar 2. 11.</b> <i>Membership Function</i> Logika Fuzzy Tipe-2 [4]<br>(Adapted).....                                    | 15 |
| <b>Gambar 2. 12.</b> <i>UMF</i> , <i>LMF</i> dan <i>FOU</i> pada Fungsi Keanggotaan<br><i>FLC</i> Tipe-2 [19] .....          | 16 |
| <b>Gambar 2. 13.</b> <i>Single-Axis Solar Tracker</i> .....  | 18 |
| <b>Gambar 2. 14.</b> <i>Dual-Axis Solar Tracking System</i> [9](Adapted). 18   |    |
| <b>Gambar 2. 15.</b> Karakteristik Respon Transien [20].....   | 19 |
| <b>Gambar 3. 1.</b> Diagram Alir Penelitian .....  | 21 |
| <b>Gambar 3. 2.</b> Diagram Blok <i>MPPT</i> Berbasis Fuzzy Tipe-2 .....   | 24 |
| <b>Gambar 3. 3.</b> (a) Kurva I-V dan (b) P-V Modul <i>PV</i> .....  | 28 |
| <b>Gambar 3. 4.</b> Perbandingan Tegangan Simulasi dan Aktual .....  | 29 |
| <b>Gambar 3. 5.</b> Perbandingan Arus Simulasi dan Percobaan .....   | 30 |
| <b>Gambar 3. 6.</b> Rangkaian Motor <i>DC</i> .....  | 32 |
| <b>Gambar 3. 7.</b> Pengambilan Data Kecepatan Angin .....   | 34 |
| <b>Gambar 3. 8.</b> Pengambilan Data Iradiasi Matahari .....   | 34 |
| <b>Gambar 3. 9.</b> Pengambilan Data Temperatur .....  | 35 |
| <b>Gambar 3. 10.</b> Fungsi Keanggotaan Logika Fuzzy <i>Input</i> ( $e$ )....  | 41 |
| <b>Gambar 3. 11.</b> Fungsi Keanggotaan Logika Fuzzy <i>Input</i> ( $\Delta e$ ) ..  | 41 |
| <b>Gambar 3. 12.</b> Fungsi Keanggotaan Fuzzy <i>Output</i> ( $D$ ).....   | 42 |
| <b>Gambar 3. 13.</b> Parameter <i>Output</i> ( $D$ ) Logika Fuzzy dan Fuzzy<br>Tipe-2.....                                   | 42 |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



|  |    |
|--|----|
| <b>Gambar 3. 14.</b> Fungsi Keanggotaan Fuzzy Tipe-2 <i>Input</i> ( $\epsilon$ ) FOU $\pm 0,3$ .....                     | 43 |
| <b>Gambar 3. 15.</b> Fungsi Keanggotaan Fuzzy Tipe-2 <i>Input</i> ( $\Delta\epsilon$ ) FOU $\pm 0,3$ .....               | 43 |
| <b>Gambar 3. 16.</b> Fungsi Keanggotaan Fuzzy Tipe-2 <i>Output</i> (D) FOU $\pm 0,3$ .....                               | 44 |
| <b>Gambar 3. 17.</b> Pemodelan <i>MPPT</i> Berbasis Logika Fuzzy Tipe-2 .....  | 46 |
| <b>Gambar 4. 1.</b> Iradiasi Matahari <i>PV fixed</i> Selama 11 Jam Operasi .....  | 47 |
| <b>Gambar 4. 2.</b> Temperatur <i>PV Fixed</i> Selama 11 Jam Operasi ....  | 48 |
| <b>Gambar 4. 3.</b> Iradiasi Matahari <i>Active Dual Axis Solar Tracker</i> Selama 11 Jam Operasi .....                  | 49 |
| <b>Gambar 4. 4.</b> Temperatur <i>Active Dual Axis Solar Tracker</i> Selama 11 Jam Operasi .....                         | 50 |
| <b>Gambar 4. 5.</b> Perbandingan Daya <i>Output PV Fixed</i> dan <i>Active Dual Axis Solar Tracker</i> .....             | 52 |
| <b>Gambar 4. 6.</b> Perbandingan Daya <i>Output PV Fixed</i> dan <i>Active Dual Axis Solar Tracker</i> .....             | 55 |
| <b>Gambar 4. 7.</b> Perbandingan Daya <i>Output</i> pada <i>PV Fixed</i> dan <i>Active Dual Axis Solar Tracker</i> ..... | 57 |
| <b>Gambar 4. 8.</b> Perbandingan Peningkatan Daya <i>Output PV</i> pada Beberapa Kontroler .....                         | 60 |
| <b>Gambar 4. 9.</b> Grafik Karakteristik Respon Pagi Hari .....  | 62 |
| <b>Gambar 4. 10.</b> Grafik Karakteristik Respon Siang Hari .....  | 63 |
| <b>Gambar 4. 11.</b> Grafik Karakteristik Respon Sore Hari .....   | 64 |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabel 3. 1.</b> Spesifikasi Modul <i>PV</i> .....   | 25 |
| <b>Tabel 3. 2.</b> Spesifikasi Konverter <i>DC-DC Buck-Boost</i> .....   | 25 |
| <b>Tabel 3. 3.</b> Koefisien Parameter <i>Input</i> .....  | 27 |
| <b>Tabel 3. 4.</b> Perbandingan Pemodelan <i>PV</i> .....  | 27 |
| <b>Tabel 3. 5.</b> Data Primer <i>PV Fixed</i> .....   | 36 |
| <b>Tabel 3. 6.</b> Data Primer <i>Active Dual Axis Solar Tracker</i> .....   | 37 |
| <b>Tabel 3. 7.</b> Batas-Batas <i>MF Input (e)</i> .....   | 39 |
| <b>Tabel 3. 8.</b> Batas-Batas <i>MF input (<math>\Delta e</math>)</i> .....   | 40 |
| <b>Tabel 3. 9.</b> <i>Rule Base</i> Logika Fuzzy dan Fuzzy Tipe-2.....   | 45 |
| <b>Tabel 4. 1.</b> Data Daya <i>Output PV Fixed</i> dan <i>Active Dual Axis Solar Tracker</i> .....  | 51 |
| <b>Tabel 4. 2.</b> Data Daya <i>Output PV Fixed</i> dan <i>Active Dual Axis Solar Tracker</i> .....  | 54 |
| <b>Tabel 4. 3.</b> Data Daya <i>Output PV Fixed</i> dan <i>Active Dual Axis Solar Tracker</i> .....  | 56 |
| <b>Tabel 4. 4.</b> Perbandingan Peningkatan Daya <i>Output</i> dari <i>PV Fixed</i> ke <i>Active Dual Axis Solar Tracker</i> pada Beberapa Kontroler ..... | 59 |
| <b>Tabel 4. 5.</b> Hasil Uji Performansi .....   | 65 |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR NOTASI

|                  |   |
|------------------|---|
| $I$              | = Arus keluaran <i>PV</i> (A)                         |
| $I_{ph}$         | = Arus pada terminal <i>PV</i> (A)                    |
| $I_d$            | = Arus saturasi dioda (A)                             |
| $q$              | = Muatan listrik ( $1,6021 \times 10^{-19}$ C)        |
| $V$              | = Tegangan terminal (V)                               |
| $R_s$            | = Resistansi seri ekuivalen <i>array PV</i> (Ohm)     |
| $R_p$            | = Resistansi paralel ekuivalen <i>array PV</i> (Ohm)  |
| $n_2$            | = Jumlah <i>solar cell</i> yang terhubung secara seri |
| $k$              | = Konstanta Boltzmann ( $1,3865 \times 10^{-23}$ J/K) |
| $T$              | = Temperatur sel (K)                                  |
| $\alpha$         | = Azimuth, °(derajat)                                 |
| $\beta$          | = sudut pitch, °(derajat)                             |
| $\gamma$         | = altitude, °(derajat)                                |
| $\gamma_s$       | = sudut yaw, °(derajat)                               |
| $\delta$         | = sudut deklinasi, °(derajat)                         |
| $\omega$         | = sudut jam, °(derajat)                               |
| $\varphi$        | = lintang, °(derajat)                                 |
| $\theta_z$       | = sudut zenith, °(derajat)                            |
| $\theta_i$       | = sudut datang, °(derajat)                            |
| $n$              | = jumlah hari dalam 1 tahun (365 hari)                |
| $V_{out}$        | = Tegangan <i>output</i> konverter (V)                |
| $V_{in}$         | = Tegangan <i>input</i> konverter (D)                 |
| $D$              | = <i>Duty cycle</i>                                   |
| $I_{out}$        | = Arus <i>output</i> konverter (A)                    |
| $L_{min}$        | = Induktansi induktor minimal konverter (H)           |
| $f$              | = Frekuensi <i>switching</i> (Hz)                     |
| $\Delta V_{out}$ | = <i>Ripple</i> tegangan <i>output</i> (V)            |
| $C$              | = Kapasitansi kapasitor <i>output</i> konverter (F)   |
| $I_{sh}$         | = Arus <i>shunt</i> (A)                               |
| $V$              | = Tegangan keluaran <i>PV</i> (V)                     |
| $R_{PV}$         | = Resistansi internal <i>PV</i> (Ohm)                 |
| $T$              | = Temperatur sel surya (°C)                           |
| $s$              | = Iradiasi matahari ( $W/m^2$ )                       |
| $T_{ref}$        | = Temperatur sel surya saat <i>STC</i> , 25°C         |
| $S_{ref}$        | = Iradiasi matahari saat <i>STC</i> , 1000 $W/m^2$    |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

|                   |   |
|-------------------|---|
| $\mu$             | = Koefisien temperatur arus <i>short circuit</i> ( $A/^{\circ}C$ )    |
| $\Phi$            | = Koefisien temperatur tegangan <i>open circuit</i> ( $V/^{\circ}C$ ) |
| $V_{oc}$          | = Tegangan <i>open circuit</i> (V)                                    |
| $I_{sc}$          | = Arus <i>short circuit</i> (A)                                       |
| $V_{mp}$          | = Tegangan saat daya maksimum (V)                                     |
| $I_{mp}$          | = Arus saat daya maksimum (A)   |
| $T_{module}$      | = Temperatur PV ( $^{\circ}C$ )                                       |
| w1                | = Koefisien $T_{ambient}$   |
| $T_{ambient}$     | = Temperatur lingkungan modul PV ( $^{\circ}C$ )                      |
| w2                | = Koefisien iradiasi ( $^{\circ}C/Wm^{-2}$ )                          |
| <i>Irradiance</i> | = Iradiasi matahari ( $W/m^2$ )                                       |
| w3                | = Koefisien kecepatan angin ( $^{\circ}C/ms^{-1}$ )                   |
| Wind Speed        | = Kecepatan angin (m/s)   |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Tinjauan statistik yang mendata konsumsi energi di dunia menunjukkan adanya peningkatan signifikan sejak tahun 2006 sampai 2016. Energi primer tersebut meliputi minyak, batubara, gas alam, *hydroelectricity*, energi nuklir dan energi terbarukan. Minyak menjadi energi primer yang paling banyak digunakan di bumi, yaitu sebesar 4418,2 juta ton per tahun 2016. Energi terbarukan menduduki peringkat terbawah dengan penggunaan 419,6 juta ton per tahun 2016. Konsumsi energi di Indonesia tidak jauh berbeda dengan pemakaian di bumi, tercatat sampai tahun 2016, minyak dan batubara menjadi sumber energi utama yang paling banyak digunakan [1]. Pada beberapa tahun terakhir, timbul banyak permasalahan lingkungan seperti pemanasan global, polusi serta menipisnya sumber energi dari fosil menyebabkan banyak para peneliti dan praktisi yang mulai mengembangkan beberapa terobosan untuk memanfaatkan energi terbarukan [2]. Penggunaan energi terbarukan di Indonesia masih sangat terbatas apabila dibandingkan dengan pemanfaatan energi primer, terhitung sampai 2016 energi terbarukan yang berhasil diproduksi baru mencapai 2,6 juta ton sbm [1], salah satu penyebabnya adalah terbatasnya teknologi konversi energi dan tingginya biaya produksi. Beberapa piranti untuk pembangkit energi listrik dari energi terbarukan meliputi *photovoltaic (PV)*, modul termoelektrik, turbin angin, *fuel cell* dan turbin generator geotermal. Turbin angin dan *photovoltaic* merupakan dua piranti pembangkit energi terbarukan yang paling populer karena kemudahan dalam mengoperasikan [2].

Sistem *photovoltaic* menjadi salah satu energi terbarukan yang dianggap penting karena bebas polusi dan *maintenance* serta mudah untuk digunakan dengan tujuan *stand alone* [2] [3] [4]. Indonesia memiliki potensi EBT sebesar lebih dari 441 GW yang baru terealisasi sebesar 8,89 GW [5]. Indonesia mendapatkan sinar matahari yang melimpah setiap tahunnya karena letak geografis Indonesia yang dilintasi oleh garis khatulistiwa oleh karena itu,

Indonesia menjadi sangat berpotensi untuk mengembangkan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) [6]. Prinsip kerja sel surya secara umum adalah adanya bahan semikonduktor di dalam sel surya yang menyerap sinar matahari dan memecah elektron dari atomnya yang kemudian menjadi energi listrik [3], namun konversi efisiensi dari panel surya normal masih rendah [7]. Pergerakan matahari yang tidak pasti mempengaruhi intensitas cahaya dan iradiasi yang dapat diterima oleh sel surya [7] [8]. Modul *photovoltaic* dapat mengumpulkan lebih banyak energi dan meningkatkan efisiensi jika dikombinasikan dengan sistem penjejak matahari (*solar tracker*). Pada penelitian sebelumnya disebutkan bahwa penggunaan *solar tracker* dua sumbu pada *PV* mampu meningkatkan efisiensi energinya sebesar 40% per tahun [8].

*Solar tracker* merupakan alat yang mengorientasikan panel surya secara kontinu sesuai dengan perubahan posisi matahari dan memastikan bahwa setiap saat posisi panel surya tegak lurus terhadap sinar matahari sehingga efisiensi dapat dimaksimalkan [7]. *Solar tracker* dapat dikategorikan menjadi dua macam yaitu sistem aktif dan pasif. Sistem pasif menggunakan bahan yang memiliki prinsip *thermal expansion* yang lebih murah dan sederhana dibandingkan dengan sistem aktif. Namun hanya tergantung pada perubahan temperatur dan memiliki nilai akurasi yang rendah sehingga metode ini kurang tepat digunakan dalam *solar tracker* [3] [9]. Peningkatan akurasi dapat diperoleh dengan menggunakan sistem aktif dengan prinsip menggerakkan panel surya berdasarkan pergerakan matahari melalui aktuator yang berupa motor *DC* [9]. Berdasarkan pergerakan derajat kebebasan, terdapat dua tipe *solar tracker* yaitu *solar tracker* satu sumbu (*single-axis*) dan dua sumbu (*dual-axis*) [3]. Tipe *dual-axis solar tracker* digunakan agar panel surya dapat bergerak dari arah barat ke timur dan utara ke selatan serta menambah beban daya yang dihasilkan [3] [7].

Panel surya memiliki beberapa kekurangan seperti biaya instalasi yang tinggi, efisiensi konversi energi yang rendah dan nonlinieritas antara tegangan dan arus *output* dari panel surya [2]

[8] [10], dibutuhkan adanya *maximum power point tracking (MPPT)* untuk memastikan panel surya tetap beroperasi pada *maximum power point* di bawah kondisi iradiasi dan temperatur yang berubah-ubah. Terdapat banyak metode *MPPT* dapat ditetapkan seperti *Artificial Neural Network*, *Genetic Algorithm* dan logika fuzzy [4]. Digunakan metode *MPPT* berupa logika fuzzy tipe-2 karena metode ini sangat cocok diterapkan untuk *plant* dengan ketidakpastian yang tinggi. Logika fuzzy tipe-2 merupakan pengembangan dari logika fuzzy tipe-1 yang dikenalkan oleh Zadeh [4]. Solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan mengembangkan suatu metode kontrol cerdas yaitu logika fuzzy tipe-2 pada *MPPT* yang dikombinasikan dengan *solar tracker* dua sumbu berbasis *photoresistive tracking method*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dapat dimunculkan pada penelitian ini berdasarkan uraian latar belakang di atas yaitu sebagai berikut.

1. Bagaimana menentukan parameter pada sistem *MPPT*?
2. Bagaimana menentukan parameter logika fuzzy tipe-2?
3. Bagaimana mendapatkan peningkatan performansi *photovoltaic* berbasis *MPPT* dan logika fuzzy tipe-2?

## 1.3 Tujuan

Tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Merancang *MPPT* pada *active dual-axis solar tracker* menggunakan logika fuzzy tipe-2
2. Mendapatkan peningkatan performansi dari kombinasi *MPPT* dan *solar tracker*

## 1.4 Lingkup Kajian

Batasan masalah atau lingkup kerja yang digunakan pada penelitian ini adalah seperti berikut.

1. Lokasi pengujian dilakukan dengan rute pengambilan data dari ITS-JMP-ITS pada saat kondisi cuaca cerah tidak berawan
2. *Plant* yang digunakan adalah *active dual axis solar tracker*

3. Metode kontrol yang digunakan adalah logika fuzzy tipe-2
4. Konverter *DC-DC* yang digunakan pada *MPPT* adalah *buck-boost converter*
5. Menggunakan *photovoltaic* jenis *polycrystalline* dengan daya 250 WP
6. Variabel yang mempengaruhi karakteristik *photovoltaic* meliputi iradiasi matahari, temperatur dan kecepatan angin.
7. Tidak mempertimbangkan variasi beban.
8. Metode *MPPT* konvensional *P&O* hanya sebagai pembanding.

### 1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. BAB I PENDAHULUAN  
Bab I terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika laporan
2. BAB II TEORI PENUNJANG  
Bab II membahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan meliputi *PV*, karakteristik modul *PV*, *MPPT*, konverter *DC-DC*, *solar tracker* dan kontrol logika fuzzy tipe-2
3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN  
Bab III berisi tentang rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode, dan langkah-langkah dalam penelitian.
4. BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN  
Bab IV berisi tentang analisis hasil perancangan sistem *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* berbasis logika fuzzy tipe-2 dan membandingkan hasil yang didapatkan dengan kontroler lain
5. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN  
Bab V membahas mengenai kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan data-data yang

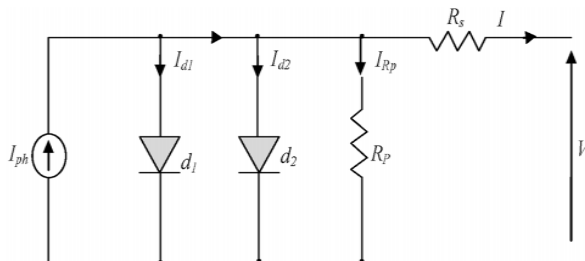
diperoleh serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan untuk tugas akhir yang selanjutnya.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 Photovoltaic Model

*Array photovoltaic* dibangun dari banyak susunan seri serta paralel dari sel surya. Efek *photovoltaic* menunjukkan proses dasar sel surya mengubah energi surya menjadi listrik. Cahaya matahari terdiri dari banyak foton atau partikel energi surya. Dimana foton mengandung berbagai macam energi dengan panjang gelombang yang berbeda-beda. Ketika foton mengenai sel surya, foton tersebut dapat dipantulkan atau diserap. Arus listrik dapat dihasilkan hanya dari foton yang diserap. Ketika foton diserap, energi dari foton akan dialirkan ke elektron pada inti atom. Untuk menghasilkan medan listrik dalam sel surya, digunakan 2 *junction* (penghubung) dari semikonduktor yang berbeda, yaitu tipe P dan tipe N. Cara umum yang digunakan untuk membuat material silikon tipe N dan P adalah dengan menambahkan elemen yang memiliki elektron berlebih atau memiliki elektron yang kurang. Silikon adalah material umum yang digunakan dalam proses *PV*. Proses *doping* mengenalkan atom lain ke atom silikon untuk merubah sifat listriknya. Unsur yang digunakan sebagai *doping* memiliki tiga atau lima elektron valensi. Unsur yang biasa digunakan untuk membuat semikonduktor tipe N adalah Fosfor karena Fosfor memiliki lima elektron valensi atau unsur Boron untuk membuat semikonduktor tipe P karena Boron memiliki tiga elektron valensi [11]. Rangkaian ekuivalen *PV* adalah seperti Gambar 9.1 berikut ini.



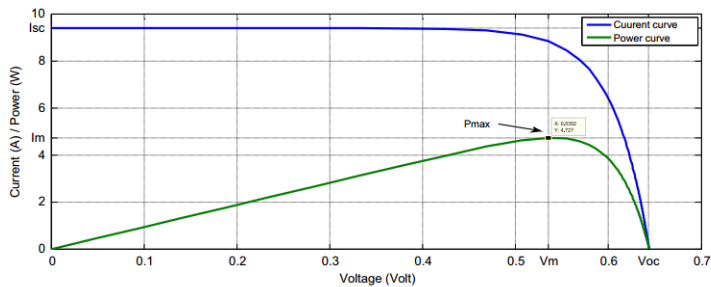
**Gambar 2. 1.** Rangkaian Ekuivalen *PV* dengan Dua Dioda

Rangkaian pada Gambar 2.1. terdiri dari sumber arus  $I_{ph}$ , dua dioda yaitu  $d_1$  dan  $d_2$  serta dua resistor  $R_p$  dan  $R_s$ .  $I_{ph}$  adalah arus  $PV$ ,  $d_1$  dan  $d_2$  adalah arus balik jenuh. Dua diode tersebut untuk memodelkan karakteristik dari modul  $PV$  karena memiliki akurasi yang lebih baik untuk iradiasi yang rendah. Gambar 9.1 dapat ditampilkan menjadi bentuk persamaan seperti berikut.

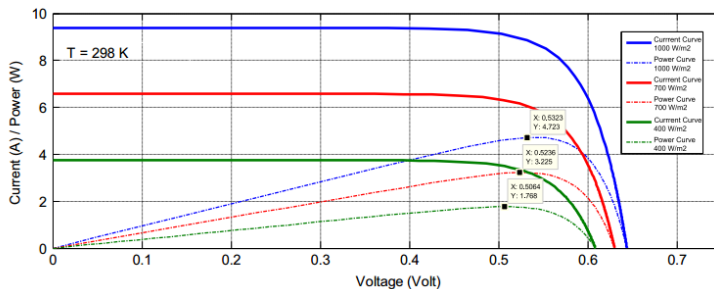
$$I = I_{ph} - I_{d1} e^{\frac{q(V+I R_s)}{n_1 k T}} - 1 - I_{d2} e^{\frac{q(V+I R_s)}{n_2 j k T}} - 1 - \frac{V+I R_s}{R_p} \quad (2.1)$$

## 2.2 Karakteristik Modul PV

Arus dan tegangan yang keluar dari modul  $PV$  memiliki peran penting dalam menentukan besarnya daya ( $P_{out}$ ) yang dihasilkan. Tinggi atau rendahnya arus dan tegangan keluaran modul  $PV$  bergantung terhadap temperatur dan iradiasi dari permukaan panel  $PV$  [12].

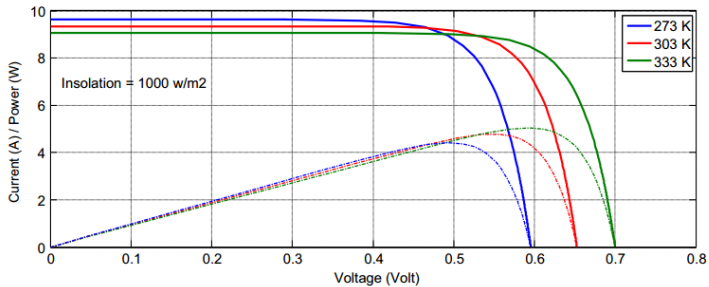


**Gambar 2. 2.** Kurva Karakteristik I-V dan P-V [13] (*Adapted*)



**Gambar 2. 3.** Kurva Karakteristik I-V dan P-V dengan Variasi Penyinaran dan Temperatur Konstan [13] (*Adapted*)





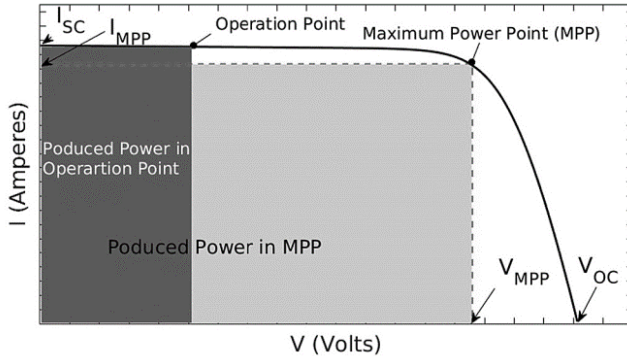
**Gambar 2. 4.** Kurva Karakteristik I-V dan P-V dengan Variasi Temperatur dan Penyinaran Konstan [13] (*Adapted*)

Gambar 2.2 menunjukkan adanya pengaruh dari perubahan iradiasi dan temperatur terhadap tegangan yang dihasilkan. Peningkatan iradiasi matahari yang diterima *PV* pada temperatur konstan akan mengakibatkan adanya kenaikan arus dan daya *output* dari *PV* yang ditunjukkan oleh Gambar 2.3. Hal sebaliknya berlaku yaitu penurunan iradiasi matahari pada temperatur *PV* yang konstan berakibat pada penurunan arus dan daya *output PV*. Gambar 2.4 membuktikan adanya pengaruh temperatur terhadap tegangan *output PV*. Kenaikan temperatur pada permukaan *PV* dengan iradiasi yang konstan berakibat pada penurunan tegangan dan daya *output* serta berlaku hal sebaliknya yaitu peningkatan tegangan dan daya *output PV* disebabkan karena adanya penurunan temperatur pada permukaan *PV* dengan iradiasi konstan.

### 2.3 Maximum Power Point Tracking

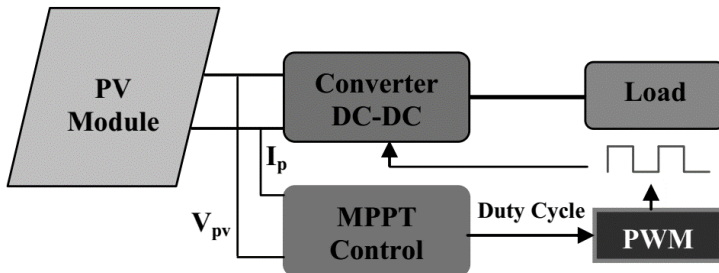
*Maximum Power Point (MPP)* merupakan titik unik pada kurva karakteristik arus-tegangan (I-V) *PV*. Pada titik tersebut modul *PV* akan menghasilkan daya yang maksimal. *MPP* tidak dapat diketahui letaknya secara pasti. Posisi *MPP* yang tepat dipengaruhi oleh faktor temperatur permukaan modul *PV* dan iradiasi matahari yang mengenai modul *PV*. Parameter yang mempengaruhi posisi *MPP* yang tepat memiliki nilai yang selalu berubah-ubah berdasarkan perubahan waktu. Solusi untuk mengatasi permasalahan adanya variasi nilai yang berpengaruh pada posisi *MPP* dapat dilacak menggunakan algoritma *maximum*

*power point tracking (MPPT)* yang berfungsi untuk mempertahankan nilai *output* modul *PV* agar tetap beroperasi pada *MPP* sehingga daya keluaran yang dihasilkan akan selalu maksimal. *MPPT* adalah konverter daya mode saklar yang digunakan sebagai *interface* antara generator *PV* dan beban.



**Gambar 2. 5.** Kurva *MPPT* dengan Kondisi Lingkungan Konstan [14]

Gambar 2.5 menunjukkan kurva karakteristik arus-tegangan pada modul *PV* dengan keterangan *maximum power point (MPP)*, arus *short circuit* ( $I_{sc}$ ), arus saat daya maksimum ( $I_{MPP}$ ), tegangan *open circuit* ( $V_{OC}$ ), tegangan saat daya maksimum ( $V_{MPP}$ ) dan daya yang dihasilkan saat *MPP*. Daya maksimum yang dihasilkan dapat diketahui dengan menghitung luasan yang ada di bawah kurva.



**Gambar 2. 6.** Blok Diagram *MPPT* pada Sistem *PV* [15]

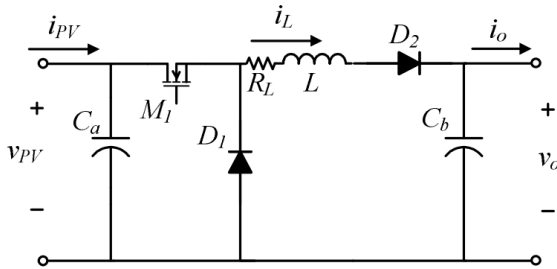
Komponen *MPPT* pada umumnya terdiri atas konverter *DC-DC*, kontroler dan sensor. Fungsi dari konverter *DC-DC* adalah sebagai *interface* atau perangkat tatap muka antara panel surya dengan beban. Konverter *DC-DC* mempunyai peran untuk mengubah-ubah nilai *duty cycle* yang diterima. *Duty cycle* merupakan representasi dari kondisi logika *high* dalam satu periode sinyal yang dinyatakan dalam nilai persentase dari 0% - 100% atau bernilai 0-1. Nilai *duty cycle* berfungsi untuk mengubah atau memvariasikan  $r_{eq}$  pada rangkaian modul *PV*. Perubahan nilai dari  $r_{eq}$  akan menyebabkan keluaran yang dihasilkan oleh konverter juga berubah. Penentuan nilai *duty cycle* dilakukan oleh kontroler yang telah dilengkapi dengan algoritma penjejakan *MPP*. Kontroler tidak dapat berfungsi jika tidak ada *input* yang diberikan, sehingga dibutuhkan *measurement system* atau sensor. Masukan informasi dari sensor dapat berupa arus, tegangan, dan daya panel *PV* ataupun temperatur dan iradiasi matahari.

## **2.4 Konverter DC-DC**

Konverter *DC-DC* digunakan sebagai *switching mode regulator* untuk mengubah tegangan *DC input* ke tegangan *DC output* dengan level yang berbeda. Konverter *DC-DC* berperan sebagai penghubung antara panel *PV* dengan beban dan *duty cycle* pada konverter digunakan untuk mengubah beban ekuivalen dari modul *PV* sehingga daya maksimum dapat ditransfer menuju beban. Pengaturan dilakukan oleh *PWM* pada frekuensi yang tetap dan alat *switching* yang biasa digunakan adalah BJT, MOSFET atau IGBT. Frekuensi minimum pada osilasi harus 100 kali lebih lama dibandingkan dengan waktu *switching* transistor agar efisiensi meningkat. Batasan yang diberikan ini didasari karena *loss switching* yang terjadi di transistor [16]. Jenis-jenis dari konverter *DC-DC* yang sering diaplikasikan adalah sebagai berikut.

### **2.4.1 Buck Converter**

Nilai tegangan *output* diatur berdasarkan *duty cycle* yang dihasilkan oleh kontroler. Konverter model *buck* menghasilkan *output* tegangan yang lebih rendah daripada tegangan *input* [7].



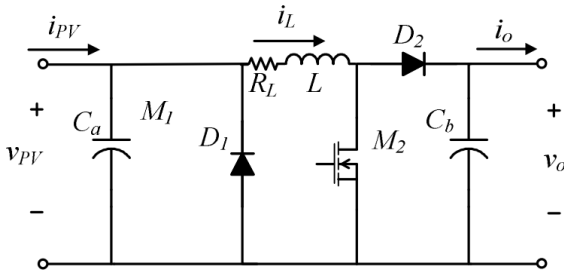
**Gambar 2. 7.** Rangkaian Konverter Model *Buck* [8]

Hubungan antara tegangan *input* dan *output* dari konverter *buck* adalah sebagai berikut.

$$v_{out} = D \cdot v_{in} \quad (2.2)$$

#### 2.4.2 Boost Converter

Konverter model *boost* menghasilkan *output* tegangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan *input* yang masuk ke konverter dengan nilai tegangan keluaran diatur berdasarkan *input duty cycle* yang masuk ke konverter [7].



**Gambar 2. 8.** Rangkaian Konverter Model *Boost* [8]

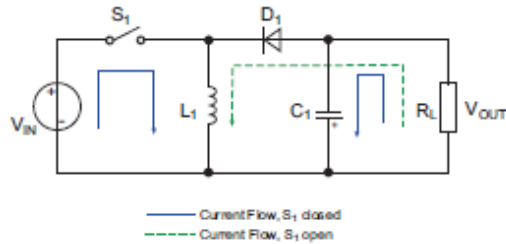
Hubungan antara tegangan *input*, tegangan *output* dan *duty cycle* pada konverter *boost* adalah sebagai berikut.

$$v_{in} = v_{out} \cdot (1 - D) \quad (2.3)$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (2.4)$$

### 2.4.3 Buck-Boost Converter

Konverter *buck-boost* dapat menaikkan ataupun menurunkan tegangan *input* yang masuk ke dalam konverter sesuai dengan pengaturan parameter di dalam konverter *buck-boost* yang diinginkan. Tegangan *output* yang dikeluarkan konverter *buck-boost* bernilai negatif karena bukan termasuk tipe konverter *inverting*. Rangkaian konverter *buck-boost* dapat dilihat pada Gambar 2.9 berikut.



**Gambar 2. 9.** Rangkaian Konverter *Buck-Boost* [8]

Apabila  $S_1$  menutup, arus  $I_{L1}$  meningkat secara proporsional dengan rasio  $\frac{V_{in}}{L_1}$  melalui  $L_1$ . Diode  $D_1$  menghalangi arus manapun menuju beban. Dalam fase ini, arus beban didapat dari keluaran kapasitor  $C_1$ . Ketika  $S_1$  membuka, energi yang tersimpan pada  $L_1$  menyebabkan tegangan bernilai negatif. Arus balik mengalir ke beban  $C_1$  dan  $R_L$  melalui  $D_1$ . Arus ini berkurang secara proporsional dengan rasio  $\frac{V_{out}}{L_1}$ . Tegangan keluaran dan parameter dari komponen lainnya yang ada di dalam konverter *buck boost* dapat dicari menggunakan persamaan berikut.

$$V_{out} = \frac{-D}{1-D} V_{in} \quad (2.5)$$

$$R = \frac{V_{out}}{I_{out}} \quad (2.6)$$

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2}{2f} R \quad (2.7)$$

$$\Delta V_{out} = \frac{V_{out} \cdot D}{R \cdot C \cdot f} \quad (2.8)$$

$$C = \frac{V_{out} \cdot D}{R \cdot \Delta V_{out} \cdot f} \quad (2.9)$$

## 2.5 Fuzzy Logic Controller

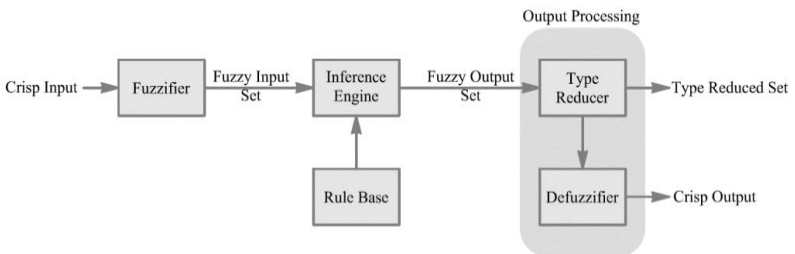
Kontroler logika fuzzy (*FLC*) didesain berdasarkan teori logika fuzzy yang diciptakan oleh Zadeh [4]. *FLC* memiliki cukup metodologi untuk merancang *robust controller* terutama yang mampu memberikan performansi yang memuaskan berkaitan dengan ketidakpastian dan ketidaktepatan, serta tidak memerlukan pemodelan matematika akurat dari *plant*. Selain itu, proses perancangan dari *FLC user-friendly* dan lebih dekat dengan pemikiran dan persepsi manusia.

Sumber ketidakpastian datang dari berbagai komponen dalam pengaplikasiannya. Pengukuran sensor dapat dipengaruhi noise tinggi dari berbagai sumber, atau sensor bisa terpengaruh kondisi lingkungan seperti suhu, kelembaban dan sebagainya. Penuaan *plant* juga bisa terjadi dengan variasi parameter dan dapat menentukan beberapa ketidakpastian atau kondisi operasi perubahan. Karena kata-kata berarti hal yang berbeda untuk setiap orang yang berbeda, ketidakpastian linguistik bisa muncul. Selain itu, para ahli tidak selalu menyetujui dan sering kali memberikan akibat yang berbeda untuk permasalahan yang sama. Sebuah survei terhadap para ahli biasanya akan mengarah ke histogram kemungkinan dari suatu akibat peraturan, histogram mewakili ketidakpastian tentang akibat dari suatu aturan.

*FLC* tipe-1 konvensional menggunakan himpunan fuzzy tipe-1, ketidakpastian terbatas dengan ketidakpastian linguistik yang terkandung dalam definisi variabel dan mereka tidak dapat secara langsung menangani atau mengakomodasi ketidakpastian tersebut. *FLC* tipe-2 yang menggunakan himpunan fuzzy tipe-2 memiliki potensi untuk mengatasi keterbatasan *FLC* tipe-1 dan menghasilkan kontroler fuzzy generasi baru dengan kinerja yang ditingkatkan untuk banyak aplikasi, yang membutuhkan penanganan tingkat ketidakpastian yang tinggi.

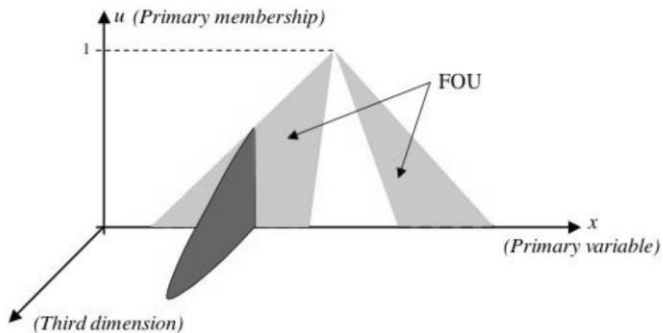
Himpunan fuzzy tipe-2 ditandai oleh fungsi keanggotaan fuzzy, yaitu nilai keanggotaan untuk setiap elemen dari himpunan ini adalah himpunan fuzzy, tidak seperti himpunan fuzzy tipe-1 dimana nilai keanggotaannya adalah bilangan tegas. Himpunan fuzzy tipe-1 ditandai dengan fungsi keanggotaan dua dimensi,

fungsi keanggotaan himpunan fuzzy tipe-2 adalah tiga dimensi serta mencakup jejak ketidakpastian, kedua hal tersebutlah yang memberikan derajat kebebasan tambahan yang memungkinkan untuk memodelkan secara langsung dan menangani ketidakpastian. Himpunan fuzzy tipe-2 tepat digunakan pada kondisi dimana sulit untuk menentukan fungsi keanggotaan yang pasti dan tepat, serta memiliki kemampuan untuk memodelkan hubungan *input-output* yang rumit.



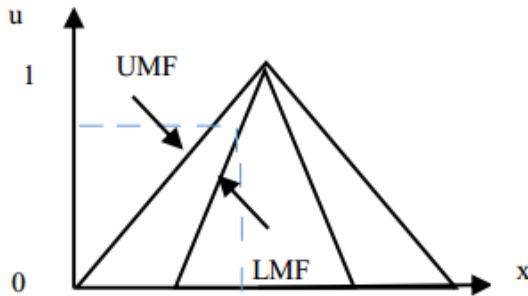
**Gambar 2. 10.** Blok Diagram *FLC* Tipe-2

*Input FLC* tipe-2 yang berupa error ( $e$ ) dan delta error ( $\Delta e$ ) masuk ke dalam blok proses fuzzifikasi. Fuzzifikasi bertujuan untuk mengubah bilangan *crisp* (bilangan tegas) menjadi himpunan fungsi keanggotaan fuzzy. Ilustrasi dari bentuk fungsi keanggotaan *FLC* tipe-2 adalah seperti Gambar 2.11 berikut.



**Gambar 2. 11.** *Membership Function* Logika Fuzzy Tipe-2 [4]  
(Adapted)

Rentang derajat keanggotaan dalam himpunan fuzzy adalah 0 sampai 1. Fungsi keanggotaan untuk *FLC* tipe-2 memiliki perbedaan dengan *FLC* tipe-1, dimana pada *FLC* tipe-2 untuk setiap fungsi keanggotaan terdiri dari dua batas yaitu *upper membership function (UMF)* dan *lower membership function (LMF)*. Daerah yang dibatasi oleh *UMF* dan *LMF* disebut sebagai *footprint of uncertainty (FOU)* seperti terlihat pada Gambar 2.12 berikut.



**Gambar 2. 12.** *UMF*, *LMF* dan *FOU* pada Fungsi Keanggotaan *FLC* Tipe-2 [19]

Diagram blok umum *FLC* tipe-2 digambarkan pada Gambar 2.10. *FLC* tipe-2 berisi lima interkoneksi blok yaitu *fuzzifier*, *rule base*, *inference engine*, *type reducer* dan *defuzzifier*. Hal ini sangat mirip dengan *FLC* tipe-1. Perbedaannya hanya terlihat pada blok *defuzzifier* dari *FLC* T1 yang digantikan oleh blok pengolahan *output* dalam *FLC* tipe-2. Karena *output* dari *inference engine* adalah himpunan fuzzy tipe-2, maka harus diubah menjadi himpunan fuzzy tipe-1 sebelum masuk ke *defuzzifier*. Blok *type reducer* diperkenalkan antara *inference engine* dan blok *defuzzifier* memetakan sistem fuzzy tipe-2 menjadi sistem fuzzy tipe-1, dan kemudian defuzzifikasi memetakan sistem fuzzy tipe-1 menjadi bilangan tegas.

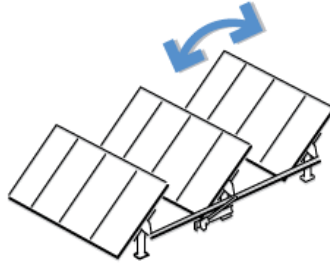
Prinsip *FLC* tipe-2 tidak jauh berbeda dengan *FLC* tipe-1. *Fuzzifier* memetakan *input* bilangan tegas ( $e$ ) ke himpunan tipe-2



fuzzy. Struktur umum untuk *FLC* tipe-1 dan *FLC* tipe-2 sama dan hanya perbedaan adalah anteseden dan konsekuensi dari *FLC* tipe-2 interval diwakili sebagai himpunan fuzzy tipe-2. *Inference engine* menggabungkan aturan dan menghasilkan *output* himpunan fuzzy tipe-2 dari *input* himpunan fuzzy tipe-2. *Type reducer* mengurangi himpunan fuzzy tipe-2 ke *output* himpunan fuzzy tipe-1 yang dikonversi kembali ke *output* bilangan tegas melalui *defuzzifier*. Akhirnya diperoleh hasil bilangan tegas. Seperti yang terlihat, meningkatkan tipe sistem fuzzy hanya akan meningkatkan cakupan tingkat ketidakpastian dari sistem dan semua prinsip logika fuzzy lainnya seperti prosedur *inferencing*, teknik defuzzifikasi sama untuk kedua tipe.

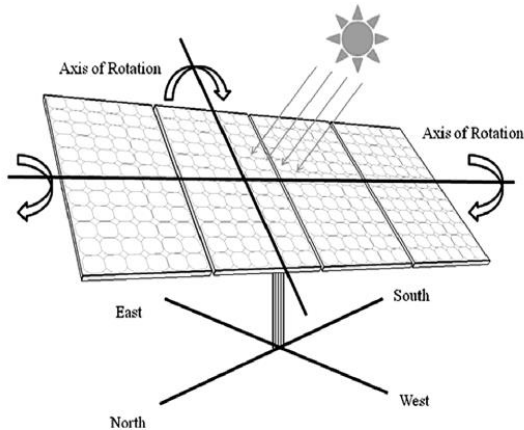
## 2.6 Solar Tracker

*Solar tracker* atau penjejak matahari merupakan suatu mekanisme yang membuat modul *PV* bergerak sesuai dengan arah pergerakan matahari agar menghasilkan daya maksimum. *Solar tracker* dapat dikategorikan menjadi *passive solar tracker* dan *active solar tracker*. *Passive solar tracker* memiliki beberapa konsep dalam menggerakkan modul *PV* mengikuti arah gerak matahari salah satunya adalah menerapkan prinsip pemuaiian termal dan pelacakan arah matahari berdasarkan nilai lintang dan bujur. Prinsip *thermal expansion* atau pemuaiian termal pada *passive solar tracker* memanfaatkan pemuaiian material yang disebabkan oleh energi panas yang dipancarkan matahari untuk menimbulkan ketidakseimbangan pada modul *PV* sehingga dapat bergerak sesuai dengan arah gerak matahari untuk mendapatkan daya maksimal. Prinsip lain dari *passive solar tracker* yaitu menggunakan nilai lintang dan bujur dari posisi modul *PV* dengan bantuan model matematis yang dapat mengetahui berapa derajat modul *PV* harus digerakkan agar selalu menghadap ke arah matahari agar mendapatkan daya maksimum. *Active solar tracker* menggunakan motor untuk menggerakkan modul *PV* mengikuti arah matahari dengan *LDR* sebagai sensor yang melakukan pengukuran langsung terhadap objek untuk mendeteksi posisi matahari.



**Gambar 2. 13.** *Single-Axis Solar Tracker*

Sistem penjejak matahari dikategorikan menjadi *single-axis* dan *dual-axis solar tracker* berdasarkan sumbu putarnya. *Single-axis solar tracker* bergerak dalam satu arah sedangkan *dual-axis solar tracker* dapat berputar dalam dua arah seperti horizontal dan vertikal dengan mengambil sudut azimuth dan kemiringan sebagai referensi.



**Gambar 2. 14.** *Dual-Axis Solar Tracking System [9](Adapted)*

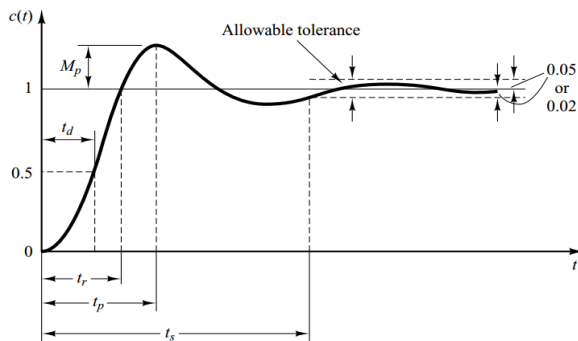
Dalam kondisi tersebut, terdapat dua teknik yang dapat digunakan yaitu *open loop control technique* dan *closed loop control technique*. *Open loop control technique* tergantung pada perhitungan tegangan yang sesuai dengan sudut *output* dan mengirimkannya ke motor *DC*. Sedangkan *closed loop control technique* sangat bergantung terhadap sinyal yang dikirim oleh

sensor pelacak matahari yang terpasang pada permukaan panel surya. Fungsi dari sensor ini adalah untuk mendeteksi posisi matahari dan mengirim sinyal kembali ke sirkuit kendali elektronik yang akan mengirimkan sinyal ke motor untuk memperbaiki posisi sebenarnya dari panel surya tegak lurus terhadap posisi matahari.

Setiap teknik memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Dimana *open loop* perlu untuk menjaga motor agar tetap beroperasi sepanjang waktu bahkan saat cuaca sedang berawan. Berbeda dengan teknik *closed loop* yang lebih hemat daya karena unit kendali dimatikan saat kondisi cuaca mendung dan beroperasi kembali saat kondisi cuaca cerah. Dalam teknik ini dibutuhkan sensor, perangkat kontrol elektronik, *timer* yang digunakan untuk memutar keseluruhan sistem, mengarah ke timur setelah matahari terbenam untuk memosisikan panel agar menghadap ke arah matahari di pagi hari berikutnya. Oleh karena itu pengaplikasian teknik ini akan memakan biaya yang tidak sedikit. Pertimbangan panel surya untuk memahami gerakan aksial dalam arah *yaw* dan vertikal. Pindah ke Kedua arah, bagian mekanik bisa digunakan di tata surya. Beberapa alat kontrol elektronik digunakan untuk mengendalikan mekanik sistem berbasis intensitas cahaya dengan menggunakan sensor.

## 2.7 Karakteristik Respon

Parameter karakteristik respon yang digunakan dalam uji performansi kontroler adalah *error steady state* ( $e_{ss}$ ), *maximum overshoot* ( $M_p$ ), *rise time* ( $t_r$ ), *settling time* ( $t_s$ ) dan *peak time* ( $t_p$ ).

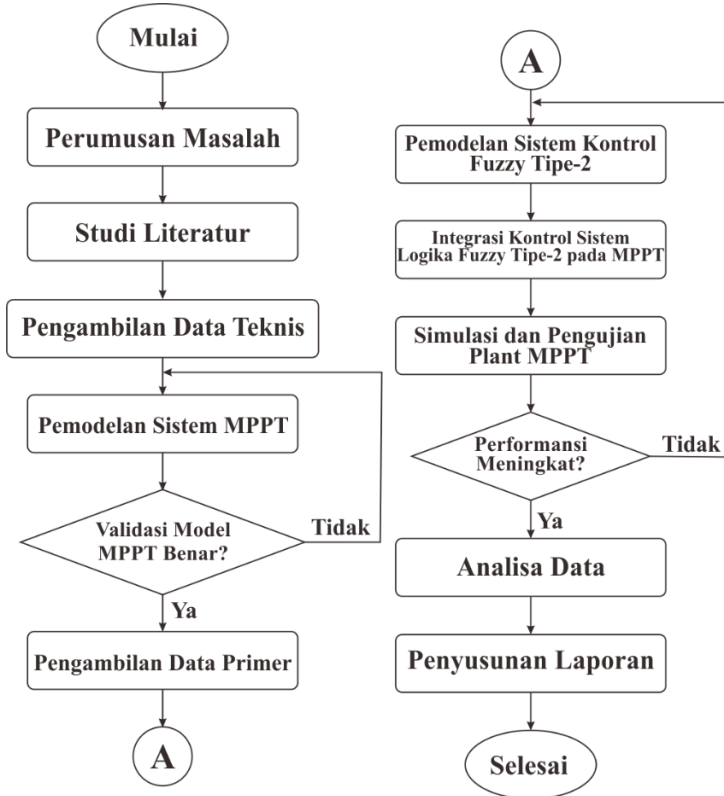


**Gambar 2. 15.** Karakteristik Respon Transien [20]

*Rise time* adalah waktu yang dibutuhkan untuk menaikkan respon dari 10% ke 90%, 5% ke 95% atau 0% ke 100% dari nilai akhir, *peak time* merupakan waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai titik puncak pertama *settling time* merupakan waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai kondisi stabil, *maximum overshoot* adalah nilai maksimal pada kurva yang diukur dari titik *set point*, *error steady state* adalah *error* dari nilai steady state dengan nilai *set point* dengan batasan minimum dan maksimum yang diperbolehkan bernilai 2% sampai 5% [20].

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Rancangan penelitian dilakukan melalui beberapa tahap yang dijelaskan dalam diagram alir pada Gambar 3.1 sebagai berikut.



**Gambar 3. 1.** Diagram Alir Penelitian

Penelitian dimulai dengan melakukan perumusan masalah dari topik bahasan penelitian yang telah dipilih sebelumnya. Studi literatur adalah tahap yang dilakukan setelah perumusan masalah. Tahap ini dilakukan dengan mencari referensi terkait dengan topik bahasan yang digunakan sebagai dasar dalam penyusunan tugas

akhir. Oleh karena itu diperlukan referensi yang tepat, akurat dan sesuai untuk memudahkan proses pengerjaan tugas akhir serta penulisan laporan penelitian. Pendalaman materi difokuskan pada materi yang berkaitan dengan *photovoltaic (PV)*, *active dual-axis solar tracker*, *maximum power point tracking (MPPT)*, konverter *DC-DC*, logika fuzzy tipe-2 dan perancangan *MPPT* berbasis logika fuzzy tipe-2.

Tahap penelitian selanjutnya adalah pengambilan data sekunder atau data teknis. Data teknis yang diambil adalah berupa spesifikasi sistem yang meliputi spesifikasi modul *PV* sebagai divais utama dalam penelitian dan konverter *DC-DC* yang berperan sebagai interface antara modul *PV* dengan beban yang terpasang. Spesifikasi sistem yang akan digunakan perlu diketahui sebelum melakukan pemodelan sistem *MPPT*. Spesifikasi modul *PV* yang diperlukan meliputi tegangan saat *maximum power point* ( $V_{mp}$ ), arus saat *maximum power point* ( $I_{mp}$ ), arus *short circuit* ( $I_{sc}$ ), tegangan *open circuit* ( $V_{oc}$ ), daya maksimum ( $P_{max}$ ), koefisien suhu  $V_{oc}$  dan koefisien suhu  $I_{sc}$  pada kondisi *STC (Standard Test Condition)*. Konverter *DC-DC* yang digunakan adalah *buck-boost* dengan parameter yang dibutuhkan meliputi nilai tegangan *input* ( $V_{in}$ ), tegangan *output* ( $V_{out}$ ), arus *output* ( $I_{out}$ ), besar beban resistor, nilai induktor dan nilai kapasitor.

Tahap penelitian berikutnya yaitu melakukan pemodelan sistem berupa pemodelan panel *PV* dan konverter *DC-DC* yang ditunjang dengan perangkat lunak berupa *MATLAB R2015a*. Pemodelan *PV* dilakukan untuk mengetahui karakteristik modul *PV* terhadap variasi temperatur dan iradiasi matahari yang diterima oleh *PV*. Konverter *DC-DC* yang berupa *buck-boost converter* dirancang dengan mempertimbangkan keluaran tegangan yang diinginkan agar *output* bisa mencapai *MPP*. Pemodelan *PV* dan konverter *DC-DC* kemudian divalidasi kebenarannya. Validasi sistem dilakukan dengan membandingkan nilai keluaran model pada *software* dengan data teknis yang telah diambil sebelumnya. Jika nilai keluaran model telah mendekati nilai pada data teknis, maka pemodelan sistem telah valid dan tidak perlu dilakukan pemodelan ulang.

Penelitian dilanjutkan dengan pengambilan data primer yang berupa data temperatur dan iradiasi matahari yang diterima modul *PV* serta kecepatan angin yang digunakan untuk menentukan parameter perancangan *MPPT* sistem kontrol fuzzy tipe-2. Data primer lain berupa arus dan tegangan yang keluar dari modul *PV* pun diambil untuk digunakan dalam validasi data. Pengambilan data primer dilakukan selama sehari dari pukul 06.00 – 17.00 WIB saat cuaca cerah dengan rute pengambilan data yaitu Institut Teknologi Sepuluh Nopember – Jembatan Merah Plaza (JMP) – Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

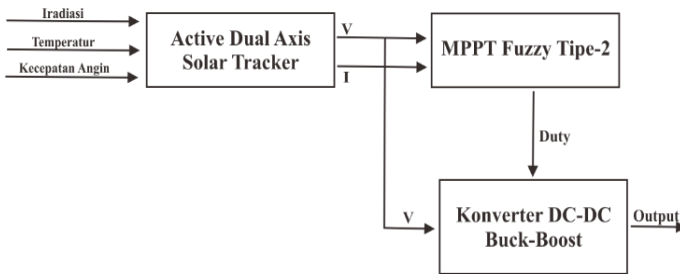
Tahap penelitian dilanjutkan dengan memodelkan sistem kontrol logika fuzzy tipe 2 berdasarkan karakteristik modul *PV* dan konverter *DC-DC* yang digunakan dalam sistem. Sistem kontrol logika fuzzy dan sistem kontrol konvensional *Perturb and Observe (P&O)* juga dimodelkan untuk selanjutnya dibandingkan dengan *output* dari sistem kontrol logika fuzzy tipe-2. Rule base yang digunakan dalam sistem kontrol fuzzy tipe-2 dirancang berdasarkan karakteristik dari *input* yang masuk ke fuzzy yaitu berupa error dan  $\Delta$ error serta memperhatikan karakteristik dari kontroler *buck-boost*. Tahap ini dilanjutkan dengan melakukan integrasi pemodelan sistem kontrol dengan *MPPT* yang telah divalidasi.

Simulasi dan pengujian *plant MPPT* yang merupakan tahap selanjutnya dalam penelitian dilakukan dengan *software* penunjang berupa MATLAB R2015a. Pengujian *plant* dilakukan dengan membandingkan hasil keluaran daya dari *MPPT* yang terpasang pada *solar tracker* dengan *MPPT* yang terpasang pada *PV fixed*. Performansi dapat dikatakan meningkat apabila hasil perbandingan menunjukkan nilai *output* dari *MPPT* yang terpasang pada *solar tracker* lebih besar daripada *output MPPT* yang terpasang pada *PV fixed*. Namun, apabila hasil simulasi menunjukkan hal sebaliknya maka perlu dilakukan pemodelan sistem kontrol fuzzy tipe-2 untuk mendapatkan hasil yang menunjukkan performansi meningkat. Penelitian dilanjutkan dengan tahap pengambilan data akhir dan analisa data dari hasil simulasi dan pengujian *plant MPPT*. Penyusunan laporan merupakan tahap akhir dari penelitian.

Laporan akan ditulis berdasarkan semua tahapan yang telah dilakukan dengan harapan dapat menjadi bahan penelitian selanjutnya.

### 3.1 Diagram Blok *MPPT* berbasis Logika Fuzzy Tipe-2

Diagram blok sistem *MPPT* berbasis logika fuzzy tipe-2 ditunjukkan oleh Gambar 3.2. *Input* dari modul *PV* berupa temperatur, iradiasi matahari dan kecepatan angin dengan *output* berupa arus dan tegangan yang terukur.



**Gambar 3. 2.** Diagram Blok *MPPT* Berbasis Fuzzy Tipe-2

*Input* yang masuk ke kontroler *MPPT* berbasis logika fuzzy tipe-2 adalah nilai error ( $e$ ) dan  $\Delta$ error ( $\Delta e$ ) dengan *output* berupa nilai *duty cycle* yang menjadi masukan dari konverter *buck-boost* dengan rentang nilai 0-1.

$$e(k) = \frac{dP}{dV}(k) - \frac{dP}{dV}(k-1) \quad (3.1)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (3.2)$$

Nilai daya  $P$  yang menjadi *input* untuk perhitungan error  $e(k)$  didapatkan dari hasil perkalian arus ( $I$ ) dan tegangan ( $V$ ) *output* dari *PV*. Error  $e(k)$  didapatkan dari perhitungan  $\frac{dP}{dV}$  saat ini dikurangi nilai  $\frac{dP}{dV}$  sebelumnya.

Konverter *buck-boost* bertugas untuk memvariasikan nilai resistansi ekuivalen berdasarkan nilai *duty cycle* yang masuk dalam konverter dari hasil *MPPT* Fuzzy Tipe-2. *MOSFET* diperlukan untuk menguiah nilai *duty cycle* menjadi nilai *PWM* sebelum masuk ke konverter *buck-boost*.



### 3.2 Spesifikasi Sistem

Modul *PV* yang digunakan dalam penelitian ini adalah tipe *poly-crystalline* dengan daya sebesar 250 WP. Spesifikasi *PV* selengkapnya didapatkan dari *datasheet* yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

**Tabel 3. 1.** Spesifikasi Modul *PV*

|   |                         |
|---|-------------------------|
| Tipe Modul <i>PV</i>                                      | Poly-crystalline 250 WP |
| <i>Maximum Power at STC (<math>P_{MAX}</math>)</i>        | 250 W                   |
| <i>Maximum Power Voltage at STC (<math>V_{MP}</math>)</i> | 30 V                    |
| <i>Maximum Power Current at STC (<math>I_{MP}</math>)</i> | 8,34 A                  |
| <i>Open Circuit Voltage at STC (<math>V_{OC}</math>)</i>  | 36,8 V                  |
| <i>Short Circuit Current at STC (<math>I_{SC}</math>)</i> | 9 A                     |
| <i>Temperature Coefficient of <math>V_{OC}</math></i>     | -0.0036 V/°C            |
| <i>Temperature Coefficient of <math>I_{SC}</math></i>     | 0.00053 A/°C            |
| <i>Series Connected Cell per Module</i>                   | 36                      |

Konverter *DC-DC* yang digunakan adalah *buck-boost*. Konverter *DC-DC buck-boost* merupakan tipe konverter *DC-DC* yang mampu menghasilkan tegangan *output* yang lebih tinggi ataupun lebih rendah dari tegangan *input* yang masuk ke dalam konverter. Spesifikasi dari konverter *buck-boost* yang digunakan dalam sistem berdasarkan perhitungan pada persamaan (2.5) sampai dengan persamaan (2.9) dapat dilihat dalam Tabel 3.2.

**Tabel 3. 2.** Spesifikasi Konverter *DC-DC Buck-Boost*

| Parameter                  | Nilai      |
|----------------------------|------------|
| $V_{in}$                   | 28,9 V     |
| $V_{out}$                  | 30 V       |
| $I_{out}$                  | 8,34 A     |
| <i>Frekuensi Switching</i> | 30 kHz     |
| Beban Resistansi           | 4 ohm      |
| Induktor                   | 0,000014 H |
| Kapasitor                  | 0,005 F    |

### 3.3 Pemodelan PV, Solar Tracker dan Konverter DC-DC Buck-Boost

Pemodelan PV, solar tracker dan konverter buck-boost dibuat dengan menggunakan *software* penunjang yaitu SIMULINK MATLAB R2015a. Pemodelan ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari masing-masing sistem yang akan digunakan.

#### 3.3.1 Pemodelan PV

PV dimodelkan berdasarkan rangkaian ekuivalen satu dioda yang terdiri dari 4 komponen penyusun yaitu dioda, *photocurrent*, *shunt resistor* dan resistansi internal pada PV ( $R_{PV}$ ). Berdasarkan Hukum Arus Kirchoff, arus dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (3.3)$$

Idealnya  $I_{sh} = 0$  karena  $R_{sh} \approx \infty$ , sehingga persamaan (3.3) dapat ditulis kembali menjadi :

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_o \left[ \exp\left(\frac{V + IR_{pv}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.4)$$

I dan V dapat direpresentasikan sebagai fungsi radiasi dan temperatur seperti berikut:

$$I = \left[ \left( \frac{S}{S_{ref}} \right) (\mu(T - T_{ref}) + 1) - I_{sc} \right] + I_n \quad (3.5)$$

$$V = V_n - \Phi(T - T_{ref}) - R_{pv}(I - I_n) \quad (3.6)$$

Nilai  $S_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$  sedangkan beberapa parameter lainnya seperti  $I_{sc}$ ,  $I_{mp}$ ,  $V_{oc}$ ,  $V_{mp}$ ,  $\mu$ ,  $\Phi$ ,  $W_p$  ditunjukkan dalam Tabel 3.1 dan  $R_{PV}$  dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\Phi_{ref} = \frac{2V_{mp} - V_{oc}}{\frac{I_{sc}}{I_{sc} - I_{mp}} + \ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right)} \quad (3.7)$$

$$R_{pv} = \frac{\Phi_{ref} \ln\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right) + V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (3.8)$$

Kecepatan angin yang merupakan *input* tambahan yang masuk ke *PV* selain temperatur dan iradiasi matahari memberikan pengaruh dalam *input* temperatur [19]. Nilai konstanta,  $w_1$ ,  $w_2$  dan  $w_3$  terdapat dalam Tabel 3.3.

$$T_{module} = w_1 * T_{ambient} + w_2 * Irradiance + w_3 * Wind Speed + constant \quad (3.9)$$

**Tabel 3. 3.** Koefisien Parameter *Input*

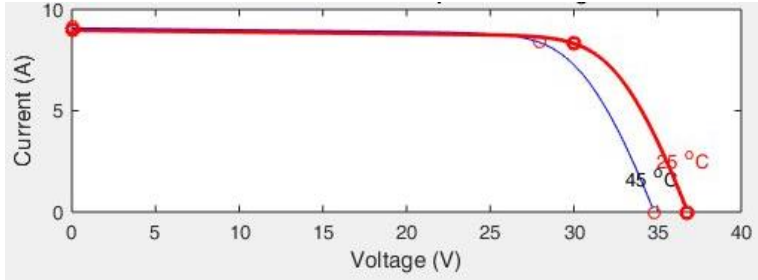
| Modul                          | w1    | w2   | w3     |
|--------------------------------|-------|------|--------|
| <i>Average Polycrystalline</i> | 0,954 | 0,03 | -1,629 |

*PV* dapat dimodelkan di *software* SIMULINK MATLAB R2015a berdasarkan persamaan dan koefisien diatas menjadi pemodelan yang dilampirkan pada Lampiran A. Pemodelan *PV* saat parameter dalam kondisi *STC* (*Standard Test Conditions*) dirancang dengan tujuan melakukan validasi pemodelan. Pemodelan *PV* dalam kondisi *STC* terlampir dalam Lampiran A. Kondisi *STC* dari parameter yaitu saat nilai temperatur 25°C dan nilai iradiasi 1000 W/m<sup>2</sup>. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil keluaran simulasi pemodelan *PV* saat kondisi *STC* dengan parameter pada *datasheet* modul *PV* yang digunakan. Hasil perbandingan terdapat pada Tabel 3.4 berikut.

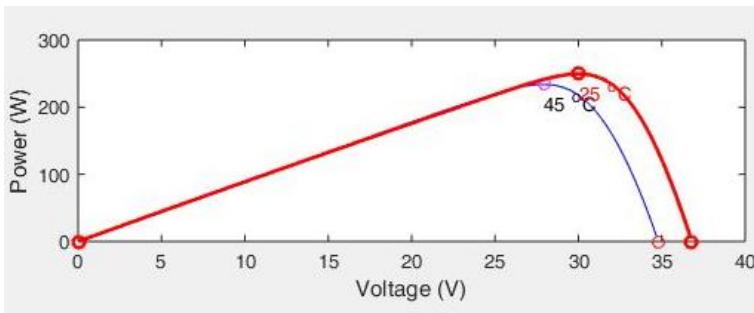
**Tabel 3. 4.** Perbandingan Pemodelan *PV*

| Parameter                       | Datasheet | Model   |
|---------------------------------|-----------|---------|
| Daya Maksimum ( $P_{Max}$ )     | 250 W     | 275,7 W |
| Arus Maksimum ( $I_{MPP}$ )     | 8,34 A    | 9,15 A  |
| Tegangan Maksimum ( $V_{MPP}$ ) | 30 V      | 30,13 V |

Kurva karakteristik pemodelan *PV* dan perbandingan dengan hasil percobaan adalah seperti Gambar 3.4, Gambar 3.5, Gambar 3.6 dan Gambar 3.7 berikut.



(a)

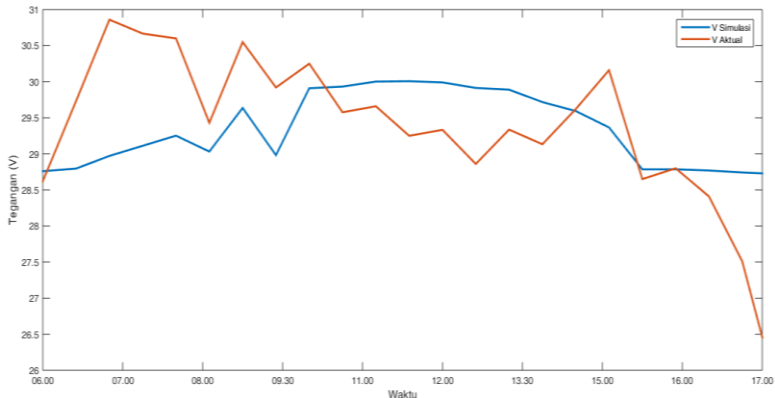


(b)

**Gambar 3.3.** (a) Kurva I-V dan (b) P-V Modul *PV*

Gambar 3.4 menunjukkan hasil simulasi dari pemodelan *PV* saat kondisi *STC*. Plot grafik pada Gambar 3.3. (a) adalah kurva karakteristik I-V sedangkan plot grafik Gambar 3.3. (b) adalah kurva P-V dengan garis berwarna merah dan biru. Garis merah adalah hasil yang didapatkan saat  $T = 25^{\circ}\text{C}$  sedangkan garis berwarna biru didapatkan saat *input*  $T = 45^{\circ}\text{C}$ . *Input* temperatur yang digunakan untuk validasi adalah saat  $T = 25^{\circ}\text{C}$  karena kondisi *STC*. Kurva karakteristik I-V dan P-V menunjukkan hasil arus dan tegangan yang keluar dari *PV* yaitu didapatkan  $I_{\text{mpp}}$  bernilai 9,15 A,  $V_{\text{mpp}}$  bernilai 30,13 V dan  $P_{\text{max}}$  sebesar 275,7 W. Tabel berisi hasil

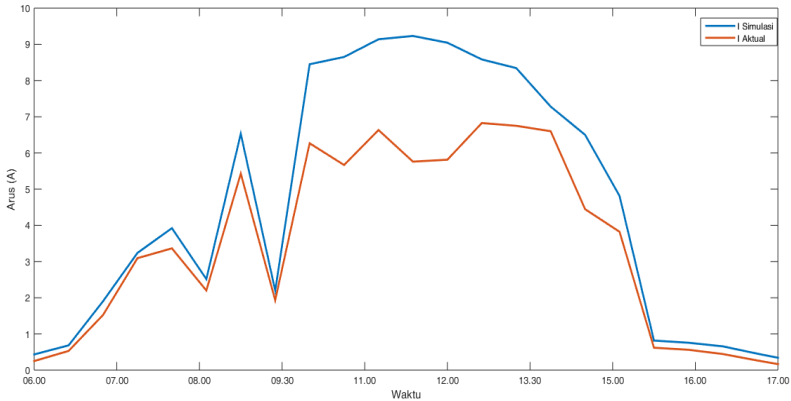
pengambilan data pada tanggal 17 April 2018 terlampir pada Lampiran B.



**Gambar 3. 4.** Perbandingan Tegangan Simulasi dan Aktual

Gambar 3.4 menggambarkan perbandingan tegangan keluaran dari modul PV antara hasil simulasi pemodelan PV dan hasil pengambilan data dengan *input* berupa temperatur, iradiasi matahari dan kecepatan angin yang sama yaitu data yang diambil pada tanggal 17 April 2018 pukul 06.00 hingga 17.00 WIB. Data terlampir pada Lampiran B. Pengambilan data hanya dilakukan sampai pukul 17.00 WIB karena setelah waktu tersebut matahari sudah terbenam sehingga tidak memungkinkan untuk proses pengambilan data temperatur dan iradiasi matahari. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa tegangan keluaran hasil simulasi pemodelan PV lebih stabil daripada tegangan yang didapatkan dari pengambilan data secara aktual. Tegangan hasil simulasi PV menunjukkan akurasi dan presisi yang baik dengan nilai tegangan yang tercatat memiliki rentang nilai 28,6 Volt sampai 30 Volt dari tegangan maksimum yang ingin dicapai untuk memperoleh daya maksimum yaitu sebesar 30 Volt. Tegangan yang didapatkan dari pengambilan data aktual menunjukkan fluktuasi yang cukup besar dengan puncak tegangan tertinggi pada pukul 07.00 WIB dengan tegangan sebesar 30,86 Volt dan

mengalami penurunan hingga menjadi 25,76 Volt pada pukul 17.00 WIB. Tabel yang memuat perbandingan tegangan dari hasil simulasi dan pengambilan data terdapat dalam Lampiran B.



**Gambar 3. 5.** Perbandingan Arus Simulasi dan Percobaan

Perbandingan arus keluaran antara hasil simulasi pemodelan PV pada SIMULINK MATLAB R2015a dengan hasil pengambilan data secara aktual selama 11 jam operasi yaitu mulai pukul 06.00 WIB hingga 17.00 WIB pada tanggal 17 April 2018 ditunjukkan pada Gambar 3.5. Hasil perbandingan didapatkan bahwa arus *output* dari simulasi memiliki nilai yang lebih tinggi daripada arus *output* dari hasil pengambilan data aktual. Puncak tertinggi dari hasil simulasi dan hasil pengambilan data secara berturut-turut yaitu 9,2 A pada pukul 11.30 WIB dan 6,8 A pada pukul 13.30 WIB. Profil nilai arus antara kedua hasil yang dibandingkan cenderung sama yaitu pada pukul 08.30 WIB, 09.30 WIB dan 15.00 WIB mengalami penurunan yang drastis dengan nilai yang hampir sama dan mencapai nilai puncak pada waktu dan nilai yang hampir sama pula yaitu pada pukul 08.00 WIB, 09.00 WIB dan 10.00 WIB, namun nilai arus *output* dari hasil pengambilan aktual tidak bisa menghasilkan arus yang lebih besar dari 6,8 A sedangkan simulasi pemodelan PV dapat menghasilkan arus *output* yang mencapai 9,2 A. Perbandingan arus antara

keluaran hasil simulasi dan hasil pengambilan data aktual tercantum dalam Tabel pada Lampiran B.

### 3.3.2 Pemodelan *Solar Tracker*

Pemodelan sistem *active dual axis solar tracker* terdiri dari beberapa pemodelan komponen penyusun meliputi pemodelan *PV*, pemodelan sensor *LDR* dan pemodelan motor *DC*.

#### 3.3.2.1 Pemodelan Sensor *LDR*

Sensor *LDR* berfungsi mengubah *input* yang berupa intensitas cahaya menjadi resistansi. Keluaran dari sensor *LDR* akan menjadi masukan untuk kontroler. Pemodelan sensor *LDR* menggunakan rangkaian pembagi tegangan untuk mengubah *output* sensor yang berupa resistansi menjadi tegangan agar bisa diproses di dalam kontroler. Rangkaian pembagi tegangan pada pemodelan sensor *LDR* diberikan resistor sebesar 1000  $\Omega$  yang dihubungkan secara seri. Hubungan masukan dan keluaran sensor *LDR* adalah sebagai berikut [20].

$$\text{Log } R = -\frac{3}{4} \text{Log } I + 5 \quad (3.10)$$

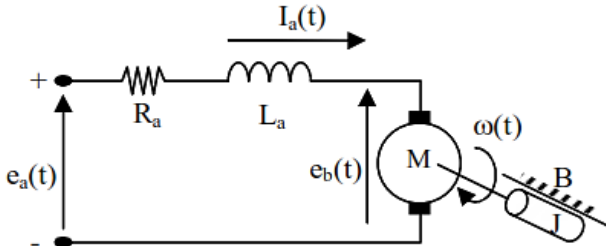
Nilai intensitas cahaya efektif pada sistem *PV* didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$I_{eff} = I_{max} \sin \theta \quad (3.11)$$

$I_{max}$  merupakan intensitas cahaya matahari maksimum yang diterima oleh sensor *LDR*. Berdasarkan persamaan (3.10) dan (3.11), sensor *LDR* dapat dimodelkan menggunakan SIMULINK MATLAB R2015a pada Gambar yang tercantum dalam Lampiran A. *Input* dari pemodelan sensor *LDR* adalah sudut dan intensitas cahaya matahari yang didapatkan dari pengambilan data selama satu hari mulai dari pukul 06.00 sampai pukul 17.00 WIB. Sensor *LDR* yang digunakan ada empat yaitu sensor *LDR* Barat, sensor *LDR* Timur, sensor *LDR* Utara dan sensor *LDR* Selatan. Sudut masukan untuk sensor *LDR* Barat adalah sudut yaw, sensor *LDR* Timur adalah sudut azimuth, sensor *LDR* Utara adalah sudut altitude dan sensor *LDR* Selatan adalah sudut pitch.

### 3.3.2.2 Pemodelan Motor DC

Motor DC memiliki dua elemen penyusun yaitu penyusun elektrik dan mekanik. Penyusun mekanik dalam pemodelan motor DC diturunkan dari Hukum Kirchoff II dan penyusun elektrik diturunkan dari Hukum Newton II.



**Gambar 3. 6.** Rangkaian Motor DC

Hukum Kirchoff II dan Hukum Newton II dapat diperoleh transformasi Laplace menjadi persamaan berikut.

$$V(s) = R_a \cdot I_a(s) + L_a \cdot I_a(s)S + E_b(t) \quad (3.12)$$

Dimana  $V$  adalah tegangan pada motor DC, sehingga ketika motor bergerak dengan kecepatan tertentu maka akan muncul tegangan balik (EMF). Tegangan EMF dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$E_b(t) = K_b \cdot \omega(t) \quad (3.13)$$

$$V_a(s) - K_b \cdot \omega(s) = I_a(s)(R_a + L_a S) \quad (3.14)$$

$$I_a = \frac{V_a(s) - K_b \cdot \omega(s)}{(R_a + L_a S)} \quad (3.15)$$

$$I_a = V_a(s) - K_b \cdot \omega(s) \cdot \frac{1}{(R_a + L_a S)} \quad (3.16)$$

$$K_t \cdot I_a(s) = J_m \cdot \omega(s)s + B_m \cdot \omega(s) \quad (3.17)$$

$$\omega(s) = \frac{K_t \cdot I_a}{J_m s + B_m} \quad (3.18)$$



$$\omega(s) = K_t \cdot I_a \cdot \frac{1}{J_m s + B_m} \quad (3.19)$$

Torsi yang dihasilkan oleh motor dapat dicari dari Hukum Newton Kedua tentang gerak rotasi seperti persamaan berikut.

$$T_m(t) = J_m \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + B_m \cdot \omega(t) \quad (3.20)$$

$$T_m(t) = K_T \cdot I_a(t) \quad (3.21)$$

Pemodelan motor *DC* yang dirancang menggunakan *software* SIMULINK MATLAB R2015a terlampir pada Lampiran A. Pemodelan *PV*, sensor *LDR* dan motor *DC* kemudian dihubungkan menjadi pemodelan sistem *active dual axis solar tracker* seperti yang terlampir dalam Lampiran A.

### 3.3.3 Pemodelan Konverter *Buck-Boost*

Pemodelan konverter *buck-boost* bertujuan untuk mengetahui kesesuaian karakteristik konverter dengan spesifikasi konverter *buck-boost* pada Tabel 3.2. Perancangan komponen-komponen penyusun konverter *buck-boost* dapat dicari melalui persamaan (2.5) sampai persamaan (2.9). Pemodelan konverter *buck-boost* yang dirancang di *software* SIMULINK MATLAB R2015a ditunjukkan dalam gambar yang terlampir dalam Lampiran A.

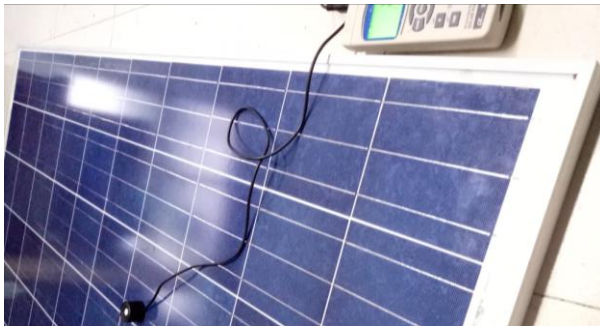
## 3.4 Pengambilan Data Primer

Data primer yang meliputi data temperatur, iradiasi matahari dan kecepatan angin diambil dengan tujuan mengetahui profil temperatur dan iradiasi matahari yang diterima oleh *active dual axis solar tracker* serta kecepatan angin yang mempengaruhi *input* temperatur. Pengambilan data primer dilakukan beberapa kali, namun data primer yang digunakan yaitu pengambilan pada tanggal 25 April 2018 karena data yang didapatkan dianggap paling benar diantara pengambilan data pada tanggal lainnya. Data diambil selama satu hari yaitu pada pukul 06.00 hingga 17.00 WIB dengan rute pengambilan di sekitar Kota Surabaya mulai dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember ke Jembatan Merah Plaza dan kembali ke Institut Teknologi Sepuluh Nopember.



**Gambar 3. 7.** Pengambilan Data Kecepatan Angin

Gambar 3.7 merupakan salah satu dokumentasi pengambilan data primer yaitu pengambilan data kecepatan angin menggunakan alat ukur anemometer. Pengambilan data dilakukan dengan mengarahkan anemometer sesuai arah angin yang bergerak pada saat pengambilan data sehingga *propeller* pada anemometer akan berputar karena pengaruh angin. Besar nilai kecepatan angin ditampilkan pada *display* yang ada pada anemometer.



**Gambar 3. 8.** Pengambilan Data Iradiasi Matahari

Gambar 3. 8 merupakan dokumentasi saat pengambilan data primer berupa iradiasi matahari. Alat ukur yang digunakan dalam

proses pengambilan data adalah pyranometer. Pengambilan data dilakukan dengan meletakkan sensor pada permukaan modul *PV* kemudian nilai iradiasi matahari yang terukur akan tampak pada *display* pyranometer.



**Gambar 3. 9.** Pengambilan Data Temperatur

Pengambilan data primer temperatur ditunjukkan pada Gambar 3. 9. Pengambilan data temperatur menggunakan alat ukur termometer *infrared*. Data temperatur yang diambil adalah temperatur lingkungan dan temperatur permukaan modul *PV*. Pengambilan data menggunakan termometer *infrared* dilakukan dengan mengarahkan sensor *infrared* ke arah objek yang akan diukur. Objek yang ingin diukur adalah permukaan modul *PV* dan lingkungan sekitar modul *PV* sehingga sinar *infrared* yang terpancarkan oleh alat ukur termometer *infrared* diarahkan hingga mengenai objek yang ingin diukur temperaturnya. Sinar *infrared* akan muncul dengan menekan tombol pada termometer *infrared*. Dokumentasi dalam proses pengambilan data lainnya seperti data arus dan tegangan *output* dari modul *PV* yang digunakan dalam validasi pemodelan *PV* serta proses pengambilan data motor *DC* dan sensor *LDR* terdapat pada Lampiran A.

**Tabel 3. 5.** Data Primer *PV Fixed*

| Waktu (WIB) | Temperatur (°C) | Iradiasi (W/m <sup>2</sup> ) | Kecepatan Angin (m/s) |
|-------------|-----------------|------------------------------|-----------------------|
| 06.00       | 23,8            | 34,9                         | 0                     |
| 06.30       | 24,2            | 60,3                         | 0                     |
| 07.00       | 24,8            | 133,5                        | 0,1                   |
| 07.30       | 25,4            | 266                          | 0                     |
| 08.00       | 25,9            | 404,5                        | 0                     |
| 08.30       | 27,4            | 558,2                        | 0                     |
| 09.00       | 28,5            | 635,9                        | 4                     |
| 09.30       | 29,6            | 747,8                        | 1,5                   |
| 10.00       | 33,8            | 566,4                        | 2,5                   |
| 10.30       | 34,6            | 876,5                        | 0,1                   |
| 11.00       | 36,7            | 819,5                        | 2,5                   |
| 11.30       | 36,92           | 912,5                        | 1,8                   |
| 12.00       | 36,6            | 794,3                        | 1,3                   |
| 12.30       | 38              | 751,3                        | 0,2                   |
| 13.00       | 35,6            | 620,2                        | 0,6                   |
| 13.30       | 30,4            | 594,2                        | 0                     |
| 14.00       | 28,7            | 583,2                        | 0                     |
| 14.30       | 27,8            | 493,4                        | 2,9                   |
| 15.00       | 24,8            | 274,6                        | 0                     |
| 15.30       | 24,4            | 209,5                        | 0,2                   |
| 16.00       | 24,4            | 65,6                         | 1,7                   |
| 16.30       | 23,6            | 46,9                         | 0,8                   |
| 17.00       | 23,4            | 18,8                         | 0,1                   |

**Tabel 3. 6.** Data Primer *Active Dual Axis Solar Tracker*

| Waktu (WIB) | Temperatur (°C) | Iradiasi (W/m <sup>2</sup> ) | Kecepatan Angin (m/s) |
|-------------|-----------------|------------------------------|-----------------------|
| 06.00       | 24              | 70,1                         | 0                     |
| 06.30       | 24,2            | 150,5                        | 0                     |
| 07.00       | 25              | 407,7                        | 0,2                   |
| 07.30       | 25,7            | 360,2                        | 0                     |
| 08.00       | 25,9            | 539,8                        | 0                     |
| 08.30       | 27,4            | 692,9                        | 1,7                   |
| 09.00       | 28,9            | 705,3                        | 1,8                   |
| 09.30       | 30              | 848,1                        | 0,5                   |
| 10.00       | 34              | 816,4                        | 2,2                   |
| 10.30       | 34,6            | 920,4                        | 0,1                   |
| 11.00       | 36,7            | 872,5                        | 2                     |
| 11.30       | 36,9            | 921,5                        | 0,1                   |
| 12.00       | 37,4            | 795,4                        | 0,8                   |
| 12.30       | 38              | 767,4                        | 0,2                   |
| 13.00       | 36,2            | 752,4                        | 0,3                   |
| 13.30       | 30,5            | 671,2                        | 0                     |
| 14.00       | 28,7            | 662,9                        | 1,2                   |
| 14.30       | 28              | 610,6                        | 0                     |
| 15.00       | 26              | 374,8                        | 0,2                   |
| 15.30       | 24,4            | 284,8                        | 4,5                   |
| 16.00       | 24,5            | 77,5                         | 1,5                   |
| 16.30       | 23,8            | 73,4                         | 0,4                   |
| 17.00       | 23,4            | 40,7                         | 0,1                   |

Data primer berupa data temperatur, iradiasi matahari dan kecepatan angin selama 11 jam operasi ditunjukkan pada Tabel 3.5 untuk *PV fixed* dan Tabel 3.6 untuk *active dual axis solar tracker*. Puncak iradiasi tertinggi untuk *PV fixed* dan *active dual axis solar tracker* didapatkan pada pukul 11.30 WIB dengan nilai 912,5 W/m<sup>2</sup> dan 923,2 W/m<sup>2</sup>. Nilai temperatur tertinggi pada *PV fixed* didapatkan pada pukul 12.00 WIB yaitu 60,2°C dan pada pukul 11.00 WIB untuk *active dual axis solar tracker* dengan nilai 60,6°C.

### 3.5 Perancangan Kontrol Logika Fuzzy dan Fuzzy Tipe-2

Sistem kontrol logika fuzzy tipe-2 dengan variasi nilai *footprint of uncertainty (FOU)* digunakan sebagai algoritma kontrol pada *MPPT*. Sistematika kontrol logika fuzzy tipe-2 terdiri dari beberapa elemen meliputi fuzzifikasi, *inference system*, *rule base*, *type reducer* dan defuzzifikasi.

Fuzzifikasi merupakan tahap pertama dalam perancangan kontrol logika fuzzy tipe-2. Proses fuzzifikasi merupakan proses pemetaan ruang *input* dalam bentuk bilangan numerik/tegas atau bisa disebut *crisp number* ke ruang *output* dalam bentuk bilangan fuzzy yang dikarakterisasi melalui variabel linguistik karena sistem kontrol logika fuzzy hanya mampu membaca *input* dalam bentuk bilangan linguistik. Variabel-variabel linguistik dari hasil proses fuzzifikasi memiliki domain fuzzy dan derajat keanggotaan fuzzy. *Input* yang telah berbentuk bilangan linguistik masuk ke dalam *inference engine* dan terjadi proses implikasi dalam menalar nilai masukan untuk menentukan nilai keluaran sebagai bentuk pengambilan keputusan. Pengambilan keputusan dalam *inference engine* didasari oleh *rule base*. *Rule base* merupakan suatu bentuk aturan relasi *if-then*. *Type reducer* merupakan proses mengubah bentuk fuzzy tipe-2 menjadi fuzzy untuk dapat dilakukan tahap terakhir berupa defuzzifikasi. Defuzzifikasi merupakan kontradiksi dari proses fuzzifikasi yaitu merupakan proses pemetaan dari bilangan fuzzy ke bilangan numerik atau *crisp number*.

*Input* yang masuk dalam kontrol logika fuzzy tipe-2 adalah nilai error ( $e$ ) dan delta error ( $\Delta e$ ) dengan *output* berupa *duty cycle*

(D). Sistem kontrol logika fuzzy dirancang untuk dibandingkan hasilnya dengan kontrol logika fuzzy tipe-2. Sistematika kontrol logika fuzzy tidak jauh berbeda dengan kontrol logika fuzzy tipe-2 namun tanpa adanya *type reducer* yaitu terdiri dari 4 elemen meliputi fuzzifikasi, *inference system*, *rule base* dan defuzzifikasi dengan *input* dan *output* yang sama dengan logika fuzzy tipe-2.

Tipe fuzzy yang digunakan adalah Takagi Sugeno karena dianggap paling sesuai dengan rancangan yang diinginkan. *Output* dari tipe fuzzy Takagi Sugeno lebih sederhana dan mudah dirancang karena tidak berbentuk bilangan fuzzy melainkan berupa bilangan numerik. Bentuk keanggotaan yang digunakan adalah kombinasi antara bentuk trapesium dan segitiga. *Membership function (MF)* yang digunakan berjumlah lima fungsi keanggotaan yaitu meliputi *NB (Negative Big)*, *NS (Negative Small)*, *ZE (Zero)*, *PS (Positive Small)* dan *PB (Positive Big)*. Lima fungsi keanggotaan tersebut berlaku pada *input error (e)* dan delta error ( $\Delta e$ ) pada logika fuzzy dan fuzzy tipe-2.

Desain untuk setiap fungsi keanggotaan dimulai dengan menentukan *range* masing-masing *input*. *Range input* ditentukan dari hasil *trial and error* berdasarkan persebaran data *input error (e)* dan delta error ( $\Delta e$ ) yang dihitung dari *output* tegangan dan daya yang keluar dari *PV fixed* maupun *active dual axis solar tracker* dengan menggunakan persamaan (3.1) dan (3.2). Batas-batas pada masing-masing *membership function (MF)* dari logika fuzzy dan logika fuzzy tipe-2 dicantumkan dalam Tabel 3.7 untuk *input error (e)* dan Tabel 3.8 untuk *input delta error ( $\Delta e$ )*.

**Tabel 3. 7.** Batas-Batas MF *Input (e)*

| <i>Membership Function (MF)</i> | Logika Fuzzy   | Logika Fuzzy Tipe-2       |
|---------------------------------|----------------|---------------------------|
| <i>NB (Negative Big)</i>        | [-Inf -5 -1 3] | U : [-Inf 10 12.5 15.3 1] |
|                                 |                | L : [-Inf 10 12.5 14.7 1] |
| <i>NS (Negative Small)</i>      | [1.4 7.8 11]   | U : [13.7 18 20.3 1]      |
|                                 |                | L : [14.3 18 19.7 1]      |

**Tabel 3.7.** Lanjutan

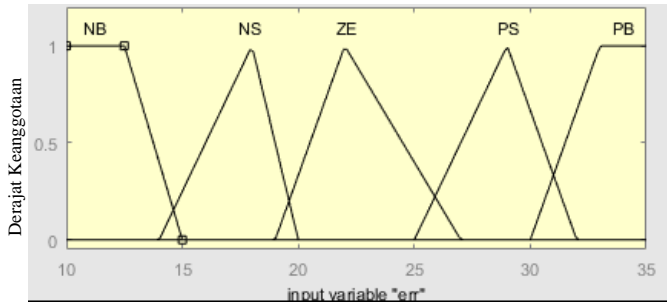
| <i>Membership Function (MF)</i> | Logika Fuzzy          | Logika Fuzzy Tipe-2    |
|---------------------------------|-----------------------|------------------------|
| <i>ZE (Zero)</i>                | [9.4 14.2<br>22.2]    | U : [18.7 22 27.3 1]   |
|                                 |                       | L : [19.3 22 26.7 1]   |
| <i>PS (Positive Small)</i>      | [19 25.4<br>30.2]     | U : [24.7 29 32.3 1]   |
|                                 |                       | L : [25.3 29 31.7 1]   |
| <i>PB (Positive Big)</i>        | [26.2 31 34.2<br>Inf] | U : [29.7 33 35 Inf 1] |
|                                 |                       | L : [30.3 33 35 Inf 1] |

**Tabel 3. 8.** Batas-Batas MF input ( $\Delta e$ )

| <i>Membership Function (MF)</i> | Logika Fuzzy                | Logika Fuzzy Tipe-2      |
|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| <i>NB (Negative Big)</i>        | [-Inf -15 -<br>12.71 10.41] | U : [-Inf -10 -8 -5.7 1] |
|                                 |                             | L : [-Inf -10 -8 -6.3 1] |
| <i>NS (Negative Small)</i>      | [-11.56 -<br>8.118 -3.529]  | U : [7.3 -4 0.3 1]       |
|                                 |                             | L : [-6.7 -4 -0.3 1]     |
| <i>ZE (Zero)</i>                | [-4.676 2.206<br>7.941]     | U : [-1.3 5 10.3 1]      |
|                                 |                             | L : [-0.7 5 9.7 1]       |
| <i>PS (Positive Small)</i>      | [5.647 14.82<br>18.26]      | U : [7.7 16 19.3 1]      |
|                                 |                             | L : [8.3 16 18.7 1]      |
| <i>PB (Positive Big)</i>        | [17.12 19.41<br>24 Inf]     | U : [17.7 20 24 Inf 1]   |
|                                 |                             | L : [18.3 20 24 Inf 1]   |

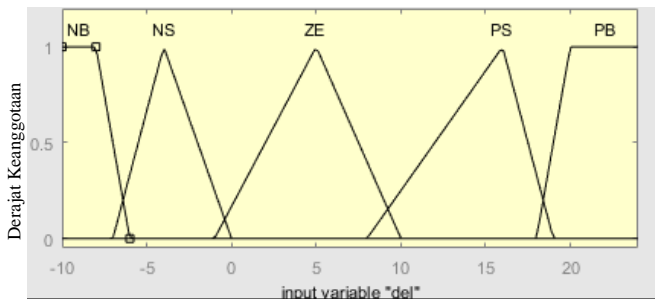
Batas-batas yang telah disebutkan dalam Tabel 3.7 dan Tabel 3.8 kemudian diterapkan dalam perancangan logika fuzzy dan fuzzy tipe-2. Perancangan ini dilakukan dengan menggunakan *FIS editor* yang ada di dalam *software* MATLAB R2015a.





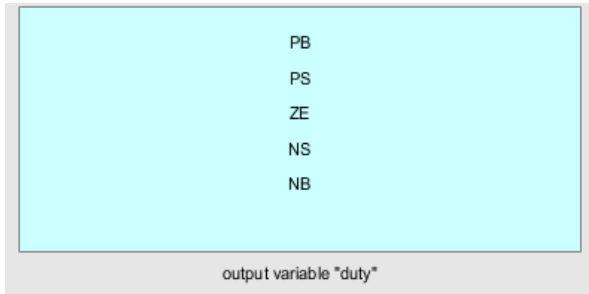
**Gambar 3. 10.** Fungsi Keanggotaan Logika Fuzzy *Input* (e)

Gambar 3.6 menunjukkan desain *membership function* (MF) logika fuzzy untuk *input error* (e) dengan *range* nilai 10 hingga 35. Perancangan pada Gambar 3.6 menerapkan batas-batas yang telah tercantum pada Tabel 3.7 dengan total 5 fungsi keanggotaan yaitu NB, NS, ZE, PS dan PB.



**Gambar 3. 11.** Fungsi Keanggotaan Logika Fuzzy *Input* ( $\Delta e$ )

Perancangan *membership function* (MF) logika fuzzy pada *FIS editor* untuk *input delta error* ( $\Delta e$ ) ditunjukkan pada Gambar 3.7. Lima fungsi keanggotaan yang menerapkan batas-batas pada Tabel 3.8 memiliki *range* nilai antara -10 hingga 24. Fungsi keanggotaan yang digunakan untuk *input delta error* ( $\Delta e$ ) sama dengan fungsi keanggotaan yang digunakan untuk *input error* (e) dengan jumlah dan penamaan yang sama yaitu NB, NS, ZE, PS dan PB namun dengan batas-batas yang berbeda karena nilai delta error ( $\Delta e$ ) memiliki nilai yang berbeda dengan nilai error (e).



**Gambar 3. 12.** Fungsi Keanggotaan Fuzzy Output (D)

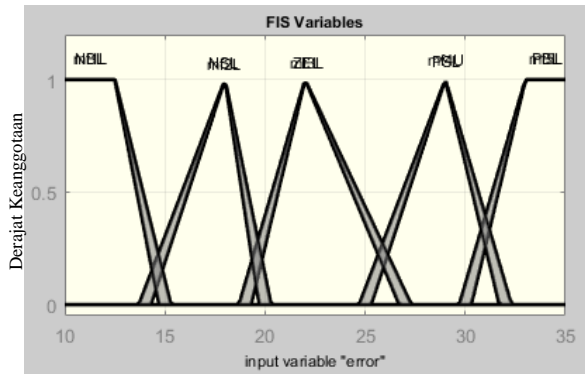
*Output* dari logika fuzzy yang dirancang adalah nilai *duty cycle* (*D*). Perancangan *output* pada *FIS editor* ditunjukkan pada Gambar 3.8 dengan *range* nilai 0 – 1. *Membership function* (*MF*) yang digunakan sama dengan *MF* pada *input error* (*e*) dan delta error ( $\Delta e$ ) yaitu *NB*, *NS*, *ZE*, *PS* dan *PB*. Nilai untuk setiap *MF* terdapat pada Gambar 3.10 berikut.

| NB   | NS  | ZE   | PS  | PB   |
|------|-----|------|-----|------|
| 0,34 | 0,4 | 0,46 | 0,5 | 0,52 |

**Gambar 3. 13.** Parameter *Output* (*D*) Logika Fuzzy dan Fuzzy Tipe-2

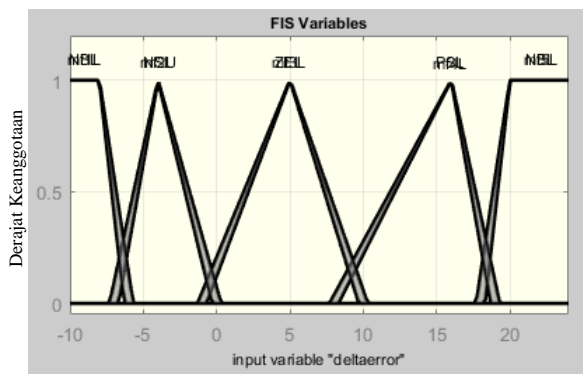
Perbedaan dari logika fuzzy dan logika fuzzy tipe-2 adalah adanya *FOU* (*footprints of uncertainty*) pada kontrol logika fuzzy tipe-2. Perancangan sistem kontrol logika fuzzy tipe-2 menggunakan 3 variasi *FOU* yaitu  $FOU \pm 0.1$ ,  $\pm 0.3$  dan  $\pm 0.5$  dengan *input* berupa error (*e*) dan delta error ( $\Delta e$ ) dan *output* yaitu *duty cycle* (*D*). *Output* logika fuzzy tipe-2 yang berupa *duty cycle* dari ketiga variasi *FOU* dibandingkan untuk menemukan

lebar  $FOU$  yang paling tepat untuk diterapkan pada sistem yang digunakan. Hasil perbandingan menunjukkan  $output\ duty\ cycle$  terbaik di antara 3 variasi  $FOU$  adalah  $FOU \pm 0.3$ .



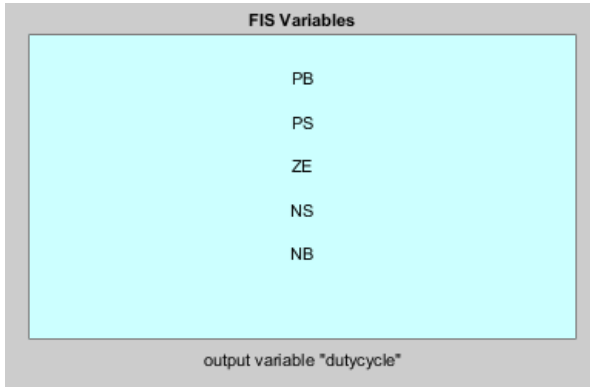
**Gambar 3. 14.** Fungsi Keanggotaan Fuzzy Tipe-2  $Input\ (e)\ FOU \pm 0,3$

$Input\ error\ (e)$  dengan  $FOU \pm 0,3$  logika fuzzy tipe-2 menggunakan 5  $membership\ function\ (MF)$  yaitu  $NB, NS, ZE, PS$  dan  $PB$  seperti tampak pada Gambar 3.11. Batas-batas yang digunakan dalam perancangan tercantum pada Tabel 3.7 dengan batas  $upper$  dan  $lower$  untuk tiap fungsi keanggotaan.



**Gambar 3. 15.** Fungsi Keanggotaan Fuzzy Tipe-2  $Input\ (\Delta e)\ FOU \pm 0,3$

Gambar 3.12 menunjukkan *membership function (MF)* dari *input delta error ( $\Delta e$ )* dengan *FOU  $\pm 0,3$*  logika fuzzy tipe-2. Jumlah dan penamaan pada fungsi keanggotaan *input delta error ( $\Delta e$ )* sama dengan *input error (e)* yaitu *NB, NS, ZE, PS* dan *PB*.



**Gambar 3. 16.** Fungsi Keanggotaan Fuzzy Tipe-2 *Output (D)*  
FOU  $\pm 0,3$

*Output* dari logika fuzzy tipe-2 yang berupa nilai *duty cycle (D)* dirancang dengan *range* nilai 0 – 1. Perancangan *output* pada *FIS editor* ditunjukkan pada Gambar 3.13. *Membership function (MF)* yang digunakan sama dengan *MF* pada *input error (e)* dan *delta error ( $\Delta e$ )* yaitu *NB, NS, ZE, PS* dan *PB*. Parameter untuk setiap fungsi keanggotaan ditunjukkan pada Gambar 3.10.

*Input* yang berupa bilangan *crisp* dinyatakan dalam fungsi keanggotaan fuzzy diolah dalam *inference engine* yang memiliki prinsip sebab akibat (*IF THEN*) dengan *rule base* yang berfungsi untuk mengatur *output* fuzzy sesuai dengan *input* yang diterima oleh sistem. *Rule base* adalah kumpulan aturan sebab-akibat yang digunakan untuk mengambil keputusan akhir dari logika fuzzy. Perancangan *rule base* dilakukan dengan sistem *trial and error* untuk menemukan rancangan *rule base* yang dianggap paling tepat untuk sistem. Dengan jumlah fungsi keanggotaan *input* dan *output* yang masing-masing berjumlah 5, *rule base* dapat dirancang dengan jumlah 25.

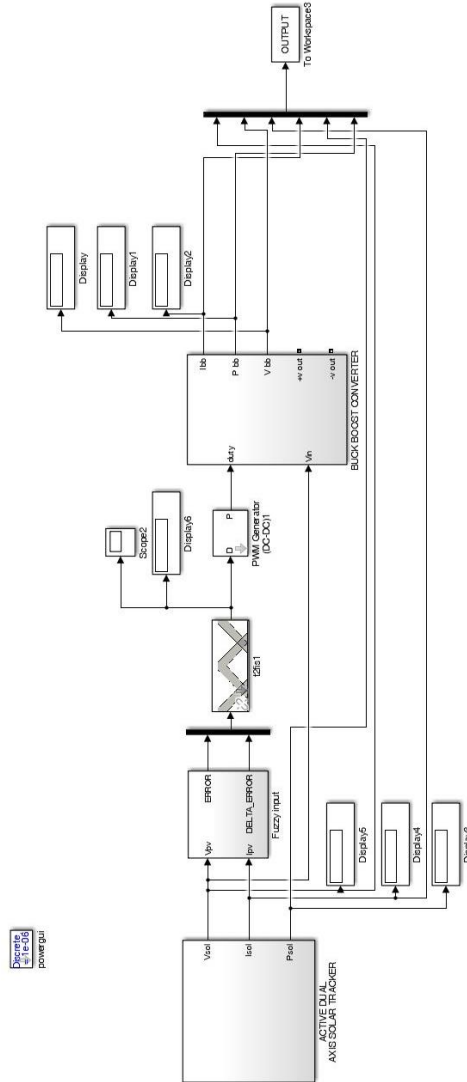
**Tabel 3. 9.** *Rule Base* Logika Fuzzy dan Fuzzy Tipe-2

|            |    | e  |    |    |    |    |
|------------|----|----|----|----|----|----|
|            |    | NB | NS | ZE | PS | PB |
| $\Delta e$ | NB | NS | PS | ZE | PS | PS |
|            | NS | PS | PS | PB | PB | PS |
|            | ZE | PS | PB | PB | PB | PB |
|            | PS | PS | PS | PB | PB | PB |
|            | PB | PB | PS | ZE | PS | PB |

Tabel 3.6 menunjukkan 25 *rule base* yang digunakan dalam perancangan sistem kontrol logika fuzzy dan fuzzy tipe-2. Perancangan *rule base* dibuat dengan mempertimbangkan *input error* (e) dan delta error ( $\Delta e$ ) serta keputusan besar nilai *output duty cycle* yang dihasilkan dari logika fuzzy ataupun fuzzy tipe-2 agar sesuai dengan parameter *duty cycle input* konverter *buck-boost* untuk menghasilkan tegangan *output* sesuai dengan hasil yang diinginkan. Operator yang digunakan dalam merancang *rule base* adalah operator *AND*. Contohnya untuk *rule* pertama, jika *input* nilai error (e) termasuk dalam fungsi keanggotaan *NB* dan *input* nilai delta error ( $\Delta e$ ) termasuk dalam fungsi keanggotaan *NB* maka nilai *output duty cycle* (D) akan masuk dalam fungsi keanggotaan *NS*, konsep ini berlaku untuk semua *rule*.

### 3.6 Simulasi Perancangan MPPT berbasis Fuzzy Tipe-2

Simulasi perancangan dimulai dengan melakukan integrasi sistem kontrol pada *MPPT* dengan menggunakan *software* SIMULINK MATLAB R2015a. Pemodelan *PV* dihubungkan dengan konverter *DC-DC buck-boost* kemudian dihubungkan dengan *MPPT Fuzzy Tipe-2* untuk mengatur *duty cycle* sesuai dengan kondisi *input* berupa temperatur, iradiasi dan kecepatan angin yang bervariasi sesuai dengan pengambilan data primer yang telah dilakukan sehingga bisa diperoleh daya maksimal yang keluar dari modul *PV*.



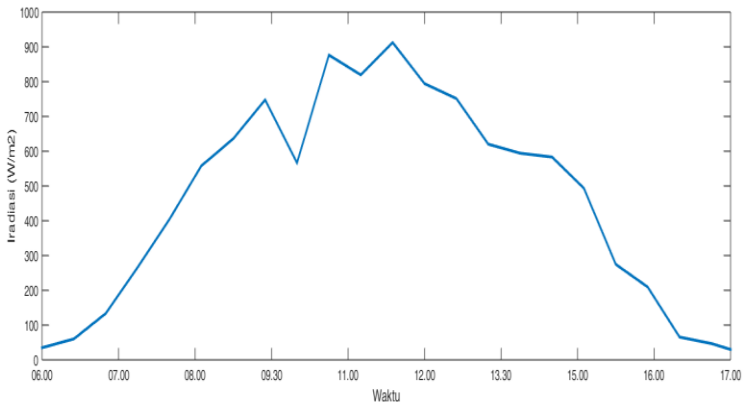
**Gambar 3. 17.** Pemodelan MPPT Berbasis Logika Fuzzy Tipe-2

Pemodelan *MPPT* berbasis fuzzy tipe-2 secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 3.15.

## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Profil *Input* Modul PV

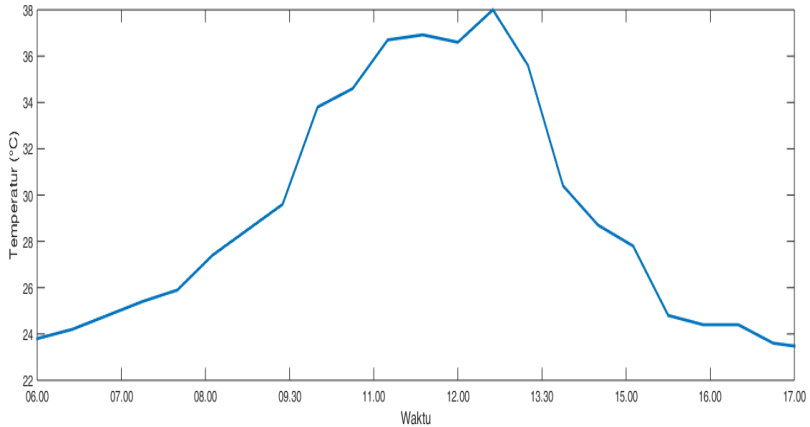
Data temperatur lingkungan dan iradiasi matahari yang menjadi *input PV fixed* dan *active dual axis solar tracker* didapatkan dari pengambilan data tercantum pada Tabel 3.5. Data yang didapat kemudian diplot dalam grafik seperti Gambar 4.1 sampai Gambar 4.4 berikut. Data ini membantu penulis dalam melakukan analisa hasil simulasi yang didapatkan karena hasil keluaran tegangan dan arus dari *PV fixed* maupun *active dual axis solar tracker* dipengaruhi oleh besarnya nilai temperatur dan iradiasi matahari yang diterima.



**Gambar 4. 1.** Iradiasi Matahari PV *fixed* Selama 11 Jam Operasi

Gambar 4.1 menunjukkan nilai iradiasi matahari yang diterima oleh modul PV pada sistem PV *fixed* yang menjadi *input* sistem PV *fixed* bersamaan dengan nilai temperatur lingkungan modul PV untuk simulasi uji *tracking MPPT* berbasis logika fuzzy tipe-2. Data iradiasi matahari diambil setiap selang waktu 30 menit pada tanggal 25 April 2018 pukul 06.00 hingga pukul 17.00 WIB dengan rute pengambilan data mulai dari lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember menuju Jembatan Merah Plaza dan kembali lagi ke Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Nilai

iradiasi mulai mengalami peningkatan setiap jamnya mulai dari pukul 06.00 WIB dengan nilai iradiasi yang masih rendah yaitu sebesar  $32,7 \text{ W/m}^2$  dengan puncak nilai iradiasi matahari tertinggi yaitu pada pukul 11.30 WIB dengan nilai  $912,5 \text{ W/m}^2$ . Penurunan nilai iradiasi matahari mulai terjadi setelah pukul 11.30 WIB hingga pukul 17.00 WIB saat hampir tenggelamnya matahari dengan nilai iradiasi hanya mencapai  $18,4 \text{ W/m}^2$ .

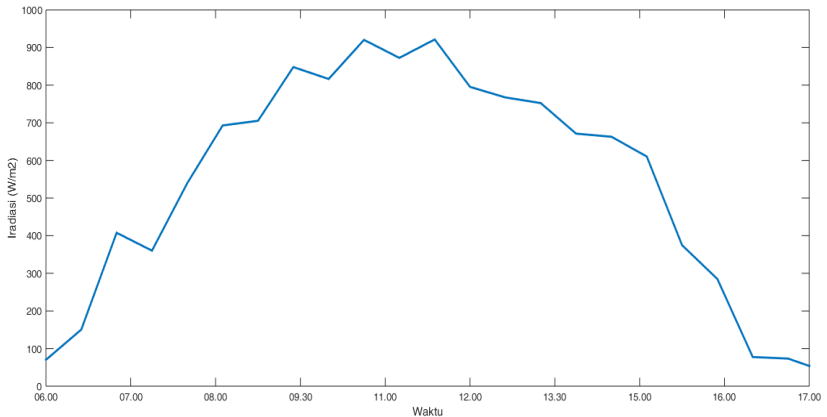


**Gambar 4. 2.** Temperatur PV *Fixed* Selama 11 Jam Operasi

Data nilai temperatur lingkungan modul *PV* pada sistem *PV fixed* yang didapatkan pada pengambilan data tanggal 25 April 2018 ditunjukkan pada Gambar 4.2. Pengambilan data dilakukan setiap 30 menit selama 11 jam operasi yaitu dimulai pada pukul 06.00 sampai pukul 17.00 WIB dengan rute pengambilan data mulai dari lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember menuju Jembatan Merah Plaza dan kembali lagi ke Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Pukul 06.00 WIB setelah matahari mulai terbit, nilai temperatur adalah sebesar  $23,8^{\circ}\text{C}$  dan mengalami peningkatan hingga mencapai puncak nilai temperatur tertinggi pada pukul 12.30 WIB yaitu saat matahari tepat berada di atas modul *PV* secara tegak lurus dengan nilai  $28^{\circ}\text{C}$ . Nilai temperatur mulai mengalami penurunan setelah dicapai puncak tertinggi nilai temperatur yaitu setelah pukul 12.30 WIB hingga pukul 17.00 WIB

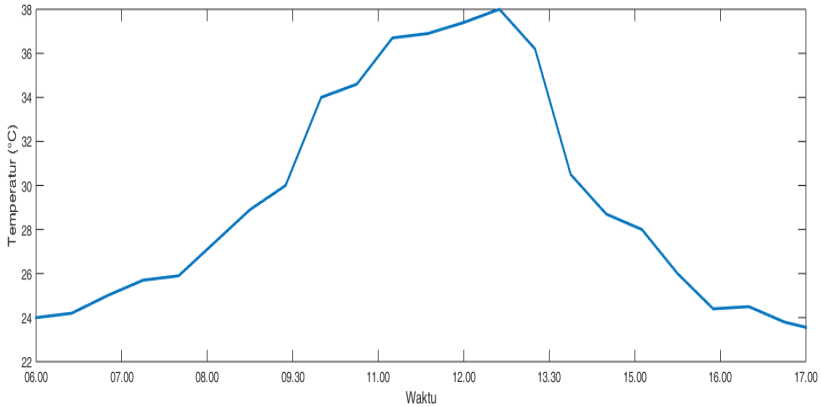


dengan temperatur lingkungan modul *PV* hanya mencapai nilai 23,4°C.



**Gambar 4. 3.** Iradiasi Matahari *Active Dual Axis Solar Tracker* Selama 11 Jam Operasi

Gambar 4.3 menunjukkan nilai iradiasi matahari yang diterima oleh modul *PV* pada sistem *active dual axis solar tracker* untuk simulasi uji *tracking MPPT* berbasis logika fuzzy tipe-2. Data iradiasi matahari diambil setiap selang waktu 30 menit pada tanggal 25 April 2018 pukul 06.00 sampai dengan pukul 17.00 WIB dengan rute pengambilan data mulai dari lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember menuju Jembatan Merah Plaza dan kembali lagi ke Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Peningkatan nilai iradiasi dimulai pada pukul 06.00 WIB dengan nilai iradiasi matahari yang masih rendah yaitu sebesar 70,1 W/m<sup>2</sup>. Nilai iradiasi matahari semakin meningkat seiring pertambahan waktu dengan puncak tertinggi yaitu pada pukul 11.30 WIB dengan nilai 923,2 W/m<sup>2</sup>. Penurunan nilai iradiasi matahari mulai terjadi setelah pukul 11.30 WIB hingga pukul 17.00 WIB saat matahari mulai tenggelam dengan nilai iradiasi mencapai 47 W/m<sup>2</sup>.



**Gambar 4. 4.** Temperatur *Active Dual Axis Solar Tracker* Selama 11 Jam Operasi

Nilai temperatur lingkungan modul *PV* pada sistem *active dual axis solar tracker* yang didapatkan pada pengambilan data tanggal 25 April 2018 ditunjukkan pada Gambar 4.4. Pengambilan data dilakukan setiap 30 menit selama 11 jam operasi yaitu mulai pukul 06.00 hingga pukul 17.00 WIB dengan rute pengambilan data mulai dari lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember menuju Jembatan Merah Plaza dan kembali lagi ke Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Nilai temperatur lingkungan *PV* yang diukur pada pukul 06.00 WIB setelah matahari mulai terbit adalah sebesar 24°C dan semakin meningkat hingga mencapai puncak nilai temperatur tertinggi pada pukul 12.30 dengan nilai 38°C. Penurunan yang signifikan dari nilai temperatur mulai terjadi setelah pukul 12.30 WIB hingga pukul 17.00 WIB dengan temperatur lingkungan modul *PV* mencapai nilai 23,4°C.

Pengambilan data dilakukan setiap setengah jam sehingga terdapat 24 data seperti terlihat pada Gambar 4.1, Gambar 4.2, Gambar 4.3 dan Gambar 4.4. Pada keempat grafik, sumbu y menyatakan nilai temperatur dan iradiasi matahari sedangkan sumbu x menyatakan waktu pengambilan data mulai dari pukul 06.00 WIB hingga pukul 17.30 WIB dengan selisih pengambilan data 30 menit. Pengambilan data dilakukan hanya sampai pukul

17.30 WIB karena setelah pukul 17.30 matahari sudah terbenam sehingga tidak memungkinkan untuk pengambilan data temperatur dan iradiasi matahari.

#### 4.2 Simulasi Uji *Tracking MPPT* berbasis Fuzzy Type-2

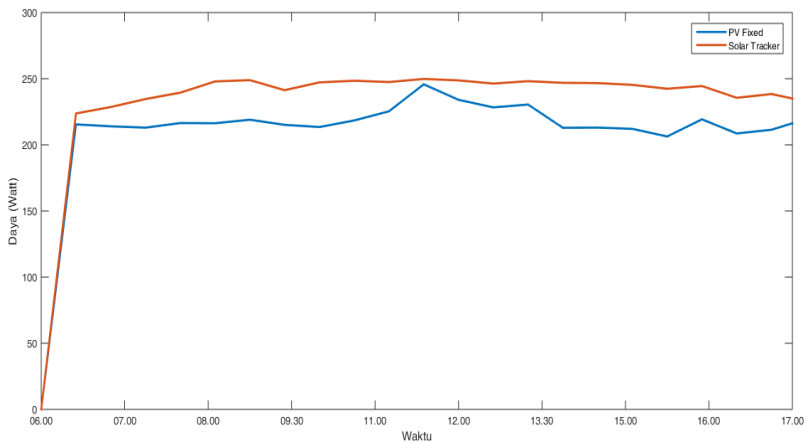
Simulasi *tracking* dilakukan dengan tujuan mengetahui perbandingan daya keluaran kontroler *MPPT* berbasis logika fuzzy type 2 yang telah dirancang sebelumnya dengan variasi kondisi klimatik. Data yang digunakan dalam simulasi uji *tracking* adalah data primer yang diambil pada tanggal 25 April 2018 seperti pada Tabel 3.5 dan Tabel 3.6. Data primer tersebut kemudian diplot dengan menggunakan *software* MATLAB R2015a untuk memudahkan proses perbandingan. Simulasi uji *tracking* dilakukan pada dua sistem yang berbeda yaitu pada *PV fixed* dan *active dual axis solar tracker*.

**Tabel 4. 1.** Data Daya Output *PV Fixed* dan *Active Dual Axis Solar Tracker*

| Waktu | P <i>PV Fixed</i> (Watt) | P <i>Solar Tracker</i> (Watt) |
|-------|--------------------------|-------------------------------|
| 06.00 | 5,76E-19                 | 5,67E-19                      |
| 06.30 | 215,455                  | 223,725                       |
| 07.00 | 214,001                  | 228,584                       |
| 07.30 | 213,004                  | 234,622                       |
| 08.00 | 216,465                  | 239,458                       |
| 08.30 | 216,329                  | 247,918                       |
| 09.00 | 218,991                  | 248,918                       |
| 09.30 | 215,116                  | 241,333                       |
| 10.00 | 213,474                  | 247,208                       |
| 10.30 | 218,425                  | 248,452                       |
| 11.00 | 225,359                  | 247,456                       |
| 11.30 | 245,757                  | 249,823                       |
| 12.00 | 234,044                  | 248,733                       |
| 12.30 | 228,319                  | 246,330                       |

**Tabel 4.1.** Lanjutan

| Waktu | P <i>PV Fixed</i> (Watt) | P <i>Solar Tracker</i> (Watt) |
|-------|--------------------------|-------------------------------|
| 13.00 | 230,465                  | 248,115                       |
| 13.30 | 212,899                  | 246,905                       |
| 14.00 | 213,047                  | 246,662                       |
| 14.30 | 212,078                  | 245,359                       |
| 15.00 | 206,323                  | 242,403                       |
| 15.30 | 219,285                  | 244,449                       |
| 16.00 | 208,594                  | 235,56                        |
| 16.30 | 211,416                  | 238,41                        |
| 17.00 | 219,535                  | 232,782                       |

**Gambar 4. 5.** Perbandingan Daya Output *PV Fixed* dan *Active Dual Axis Solar Tracker*

Gambar 4.7 menunjukkan perbandingan daya output dari MPPT berbasis logika fuzzy tipe-2 antara *PV fixed* dan *active dual axis solar tracker*. Daya yang dibandingkan merupakan keluaran dari konverter *buck-boost*. Masukan konverter *buck-boost* adalah

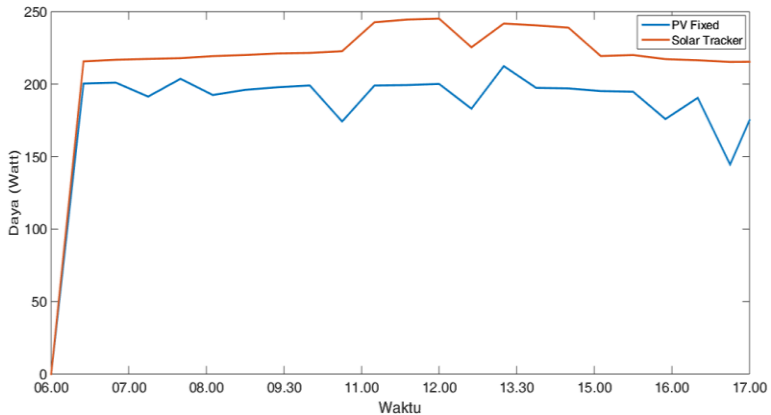
tegangan *output* dari *PV fixed* ataupun *active dual axis solar tracker* dan *duty cycle* yang merupakan *output* dari kontrol logika fuzzy tipe-2. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa daya *output* dari *active dual axis solar tracker* lebih baik dari daya *output PV fixed* dengan rata-rata daya *output* secara berturut-turut yaitu sebesar 231,9 Watt dan 209,4 Watt. Sebagian besar titik daya *output* dari *active dual axis solar tracker* memiliki nilai yang mendekati *set point* yaitu 250 Watt dan cukup stabil dengan sedikit fluktuasi daya. Daya *output* mulai naik dan mendekati *set point* 250 Watt dengan nilai 247,9 pada pukul 08.30 WIB dan puncak daya dicapai pada pukul 11.30 WIB saat modul *PV* berada tegak lurus dengan posisi matahari dengan nilai sebesar 249,8 Watt kemudian mulai menurun hingga pukul 17.30 dengan daya sebesar 232,6 Watt. Hasil simulasi pada *PV fixed* terlihat kurang stabil dan terdapat fluktuasi daya yang lebih banyak jika dibandingkan dengan keluaran *active dual axis solar tracker*. Daya mulai mengalami kenaikan yang signifikan pada pukul 11.00 WIB nilai *output* yaitu 225,35 Watt dan puncak daya tertinggi dicapai setelahnya yaitu sebesar 245,75 Watt pada pukul 11.30 WIB saat posisi matahari tegak lurus dengan arah hadap *PV fixed*.

### 4.3 Simulasi Uji *Tracking MPPT* berbasis Logika Fuzzy

Simulasi uji *tracking MPPT* berbasis logika fuzzy dilakukan untuk mengetahui daya keluaran dan perbandingannya dengan *MPPT* berbasis logika fuzzy tipe-2. Sama dengan simulasi uji *tracking MPPT* berbasis logika fuzzy tipe-2, simulasi ini membandingkan dua sistem berbeda yaitu *PV fixed* dan *active dual axis solar tracker*. Data yang digunakan dalam simulasi ini sama dengan data pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 untuk *PV fixed* sedangkan untuk *active dual axis solar tracker* menggunakan data yang sama dengan data untuk Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 untuk *input* sistem. Data-data yang telah disebutkan terlampir pada Lampiran B. Hasil simulasi yang berupa daya *output* diplot dan dibandingkan antara *PV fixed* dan *active dual axis solar tracker* pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.8 berikut.

**Tabel 4. 2.** Data Daya Output PV Fixed dan Active Dual Axis Solar Tracker

| Waktu | P PV fixed (Watt) | P Solar Tracker (Watt) |
|-------|-------------------|------------------------|
| 06.00 | 6,41E-19          | 5,67E-19               |
| 06.30 | 200,397           | 215,671                |
| 07.00 | 201,045           | 216,816                |
| 07.30 | 191,38            | 217,395                |
| 08.00 | 203,69            | 217,902                |
| 08.30 | 192,478           | 219,322                |
| 09.00 | 196,05            | 220,084                |
| 09.30 | 197,837           | 221,155                |
| 10.00 | 199,091           | 221,527                |
| 10.30 | 174,206           | 222,702                |
| 11.00 | 199,05            | 242,649                |
| 11.30 | 199,355           | 244,523                |
| 12.00 | 200,137           | 245,187                |
| 12.30 | 183,042           | 225,403                |
| 13.00 | 212,436           | 241,788                |
| 13.30 | 197,428           | 240,532                |
| 14.00 | 197,05            | 238,969                |
| 14.30 | 195,201           | 219,369                |
| 15.00 | 194,762           | 220,069                |
| 15.30 | 175,884           | 217,252                |
| 16.00 | 190,546           | 216,468                |
| 16.30 | 144,518           | 215,306                |
| 17.00 | 195,347           | 215,494                |



**Gambar 4. 6.** Perbandingan Daya *Output* PV Fixed dan Active Dual Axis Solar Tracker

Gambar 4.8 menunjukkan perbandingan daya antara MPPT berbasis logika fuzzy pada *PV fixed* dan *active dual axis solar tracker*. Daya output *active dual axis solar tracker* menunjukkan hasil yang lebih baik dari pada *PV fixed*. Rata-rata nilai daya output secara berturut-turut dari *PV fixed* dan *active dual axis solar tracker* adalah bernilai 188,729 Watt dan 219,96 Watt. Namun, rata-rata nilai daya output yang mendekati set poin 250 Watt masih rendah. Pada *active dual axis solar tracker*, puncak daya tertinggi adalah sebesar 245,187 Watt pada pukul 13.00 WIB. Nilai daya output yang turun dapat disebabkan salah satunya karena *membership function (MF)* pada logika fuzzy kurang sesuai dengan karakteristik data input yang masuk ke dalam kontrol logika fuzzy. Faktor lain yang dapat menjadi penyebab turunnya nilai daya output adalah karena *plant* hanya cocok dengan kontroler yang bertipe adaptif.

#### 4.4 Simulasi Uji Tracking MPPT berbasis P&O

Metode *Perturb and Observe (P&O)* merupakan metode kontrol konvensional pada MPPT. Simulasi uji tracking dengan metode *P&O* dilakukan dengan tujuan mengetahui daya keluaran

dan perbandingan antara sistem *MPPT* yang menerapkan metode kontrol konvensional seperti metode *Perturb and Observe (P&O)* dan *MPPT* yang menerapkan metode kontrol dengan konsep *artificial intelligent* seperti logika fuzzy dan fuzzy tipe-2. Simulasi uji *tracking MPPT* berbasis *P&O* ini membandingkan daya *output* dari dua sistem yang sama dengan simulasi uji *tracking* sebelumnya yaitu sistem *PV fixed* dan sistem *active dual axis solar tracker*. *Input* dari kontroler *P&O* adalah tegangan dan arus yang keluar dari *PV fixed* maupun dari *active dual axis solar tracker* dengan *output* berupa *duty cycle* yang kemudian menjadi *input* konverter *buck-boost* setelah di-generate menjadi sinyal *PWM* oleh *PWM generator*. Parameter-parameter pada konverter *buck-boost* yang digunakan dalam semua simulasi memiliki nilai yang sama yaitu tertera pada Tabel 3.2. *Script* yang digunakan dalam simulasi ini akan dilampirkan pada Lampiran D. Perbandingan hasil simulasi antara *PV fixed* dan *active dual axis solar tracker* terlihat pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.9 berikut.

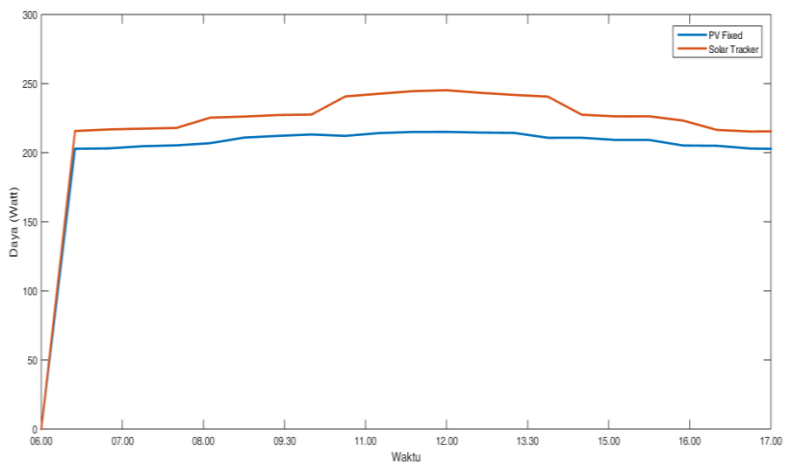
**Tabel 4. 3.** Data Daya *Output PV Fixed* dan *Active Dual Axis Solar Tracker*

| Waktu | P <i>PV Fixed</i> (Watt) | P <i>Solar Tracker</i> (Watt) |
|-------|--------------------------|-------------------------------|
| 06.00 | 6,78E-19                 | 5,67E-19                      |
| 06.30 | 202,831                  | 215,671                       |
| 07.00 | 203,103                  | 216,816                       |
| 07.30 | 204,684                  | 217,395                       |
| 08.00 | 205,275                  | 217,901                       |
| 08.30 | 206,865                  | 225,331                       |
| 09.00 | 210,903                  | 226,116                       |
| 09.30 | 212,154                  | 227,220                       |
| 10.00 | 213,168                  | 227,599                       |
| 10.30 | 212,152                  | 240,675                       |
| 11.00 | 214,191                  | 242,652                       |
| 11.30 | 214,980                  | 244,521                       |



**Tabel 4.3.** Lanjutan

| Waktu | P <i>PV Fixed</i> (Watt) | P <i>Solar Tracker</i> (Watt) |
|-------|--------------------------|-------------------------------|
| 12.00 | 215,044                  | 245,186                       |
| 12.30 | 214,549                  | 243,319                       |
| 13.00 | 214,311                  | 241,793                       |
| 13.30 | 210,766                  | 240,543                       |
| 14.00 | 210,793                  | 227,482                       |
| 14.30 | 209,217                  | 226,249                       |
| 15.00 | 209,204                  | 226,295                       |
| 15.30 | 205,172                  | 223,230                       |
| 16.00 | 204,980                  | 216,469                       |
| 16.30 | 202,981                  | 215,310                       |
| 17.00 | 202,679                  | 215,493                       |

**Gambar 4. 7.** Perbandingan Daya *Output* pada *PV Fixed* dan *Active Dual Axis Solar Tracker*

Metode *Perturb and Observe (P&O)* merupakan metode konvensional yang paling banyak digunakan secara umum [22]. Metode ini menggunakan algoritma *feedback* sederhana. Konsep metode ini secara sederhana adalah tegangan dari panel *PV* diberikan gangguan secara berkala dan daya *output* yang sesuai dibandingkan dengan siklus gangguan sebelumnya. Gangguan yang diberikan dijaga pada arah yang sama sampai nilai *MPP* tercapai apabila terjadi peningkatan daya, jika terjadi penurunan daya maka arah perturbasi dibalik agar tercapai nilai *MPP*. Perbandingan hasil simulasi antara *MPPT* berbasis *P&O* dapat dilihat pada Gambar 4.9. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa daya *output active dual axis solar tracker* lebih baik dari pada *PV fixed* dengan rata-rata daya keluaran secara berturut-turut yaitu 222,867 Watt dan 204,325 Watt. Kurva dari *PV fixed* menunjukkan data yang stabil tanpa adanya fluktuasi daya yang ekstrim. Puncak daya pada *PV fixed* dicapai pada pukul 12.00 WIB dengan nilai sebesar 215 Watt. Sistem *active dual axis solar tracker* menunjukkan hasil yang cukup stabil dengan sedikit fluktuasi daya. Daya *output* mulai meningkat pada pukul 08.30 dan 10.30 WIB dengan nilai secara berturut-turut yaitu 225,3 Watt dan 240,6 Watt. Nilai daya tertinggi dicapai dengan nilai sebesar 245,186 Watt pada pukul 12.00 WIB kemudian mengalami penurunan hingga pukul 17.30 dengan daya sebesar 214,38 Watt. Kekurangan dari metode ini adalah turunnya nilai *output* daya dari sistem *PV* saat *input* yang diberikan memiliki variasi nilai yang berubah terlalu lambat atau terlalu cepat, sehingga untuk mendapatkan daya *output* yang tinggi, nilai *input* yang diberikan harus stabil [23].

#### **4.5 Perbandingan Peningkatan Daya Output Kontroler**

Perbandingan daya *output* dari setiap kontroler yang telah disimulasikan pada *PV fixed* maupun *active dual axis solar tracker* kemudian dibandingkan. Perbandingan peningkatan daya *output* dimulai dengan menghitung daya dari setiap hasil simulasi yang didapatkan. Persamaan (4.1) digunakan untuk mengetahui persentase peningkatan daya *output* dari setiap kontroler yang telah disimulasikan dan diuji. Perbandingan dilakukan pada hasil

simulasi *PV fixed* dan *active dual axis solar tracker* untuk setiap kontroler dan pada hasil simulasi kontroler untuk setiap sistem *PV fixed* dan *active dual axis solar tracker*.

$$\text{Peningkatan Daya Output} = \left( \frac{P_{\text{tracker}} - P_{\text{PV fixed}}}{P_{\text{PV fixed}}} \right) 100\% \quad (4.1)$$

Data perhitungan perbandingan peningkatan daya *output* untuk setiap hasil simulasi *MPPT* pada sistem *PV fixed* dan *active dual axis solar tracker* beberapa kontroler tercantum dalam Tabel berikut.

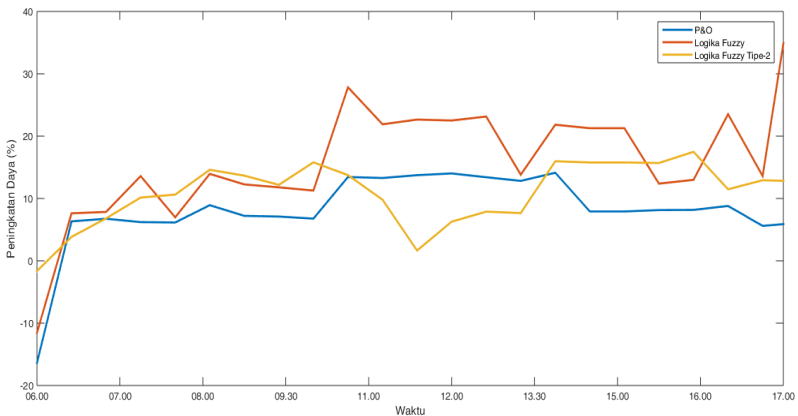
**Tabel 4. 4.** Perbandingan Peningkatan Daya *Output* dari *PV Fixed* ke *Active Dual Axis Solar Tracker* pada Beberapa Kontroler

| Waktu | Peningkatan Daya <i>Output PV</i> pada Beberapa Kontroler (%) |              |                     |
|-------|---|--------------|---------------------|
|       | <i>P&amp;O</i>  | Logika Fuzzy | Logika Fuzzy Tipe-2 |
| 06.00 | -16,371   | -11,544      | -1,635              |
| 06.30 | 6,330   | 7,622        | 3,838               |
| 07.00 | 6,751   | 7,844        | 6,814               |
| 07.30 | 6,209   | 13,593       | 10,149              |
| 08.00 | 6,150   | 6,9775       | 10,621              |
| 08.30 | 8,926   | 13,946       | 14,602              |
| 09.00 | 7,213   | 12,259       | 13,665              |
| 09.30 | 7,101   | 11,786       | 12,187              |
| 10.00 | 6,769   | 11,269       | 15,802              |
| 10.30 | 13,444  | 27,838       | 13,747              |
| 11.00 | 13,287  | 21,903       | 9,805               |
| 11.30 | 13,741  | 22,657       | 1,654               |
| 12.00 | 14,016  | 22,509       | 6,276               |
| 12.30 | 13,409  | 23,142       | 7,888               |
| 13.00 | 12,823  | 13,816       | 7,658               |

**Tabel 4.4.** Lanjutan

| Waktu | Peningkatan Daya <i>Output</i> pada <i>PV</i> Beberapa Kontroler (%) |              |                     |
|-------|--|--------------|---------------------|
|       | <i>P&amp;O</i>   | Logika Fuzzy | Logika Fuzzy Tipe-2 |
| 13.30 | 14,127   | 21,832       | 15,972              |
| 14.00 | 7,917  | 21,273       | 15,777              |
| 14.00 | 7,917  | 21,273       | 15,777              |
| 14.30 | 8,140  | 12,380       | 15,692              |
| 15.00 | 8,169  | 12,993       | 17,487              |
| 15.30 | 8,801  | 23,520       | 11,475              |
| 16.00 | 5,604  | 13,604       | 12,927              |
| 16.30 | 6,073  | 48,981       | 12,768              |
| 17.00 | 6,322  | 10,313       | 6,034               |

Data peningkatan daya *output* pada Tabel 4.4 kemudian dibuat dalam grafik supaya memudahkan proses perbandingan pada Gambar 4.8 berikut.



**Gambar 4. 8.** Perbandingan Peningkatan Daya *Output* pada Beberapa Kontroler

Gambar 4.10 menunjukkan perbandingan peningkatan daya antara 3 kontroler yang telah disimulasikan dan diuji pada sistem *PV fixed* dan *active dual axis solar tracker*. Rata-rata peningkatan daya *output* masing-masing kontroler dari *P&O*, logika fuzzy dan logika fuzzy tipe-2 secara berturut-turut adalah 8%; 16,1 % dan 10,48%. Puncak nilai peningkatan daya *output* tertinggi adalah sebesar 48,98% yang didapatkan dari sistem *MPPT* berbasis logika fuzzy tepatnya pada pukul 16.30 WIB dari daya *output* sistem *PV fixed* yang mulanya bernilai 144,5 Watt menjadi daya *output* sistem *active dual axis solar tracker* dengan nilai daya *output* sebesar 215,3 Watt.

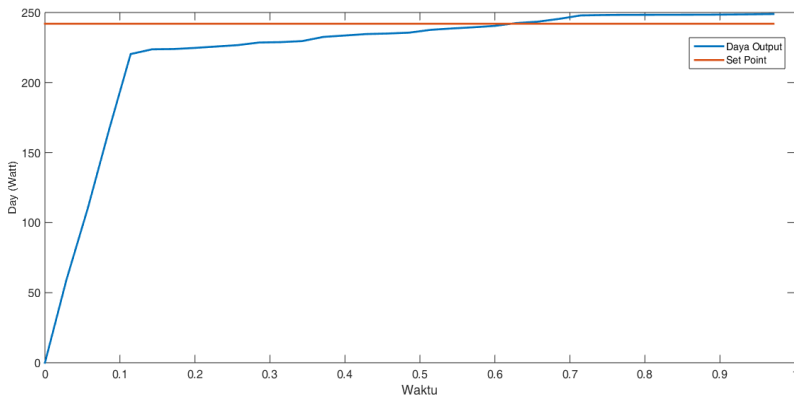
Peningkatan daya *output* tertinggi yang diperoleh pada sistem *MPPT* berbasis *P&O* adalah pada pukul 13.30 WIB dengan peningkatan sebesar 14,12% dari nilai daya keluaran sistem *PV fixed* sebesar 210,7 Watt menjadi 240,5 Watt yaitu hasil yang didapat oleh sistem *active dual axis solar tracker*. Sistem *MPPT* berbasis logika fuzzy tipe-2 yang telah diuji *tracking* berhasil memperoleh peningkatan daya *output* tertinggi sebesar 17,48%. Peningkatan ini diperoleh pada pukul 15.00 WIB dengan selisih daya dari sistem *PV fixed* dengan *active dual axis solar tracker* sebesar 36,08 Watt yaitu dari daya *output* bernilai 206,323 menjadi 242,4 Watt.

Perbandingan peningkatan daya *output* selain dilakukan pada sistem *MPPT*, dilakukan pula pada sistem tanpa *MPPT*. Perbandingan ini dilakukan antara daya *output* yang keluar dari sistem *PV fixed* dan *active dual axis solar tracker* tanpa dihubungkan dengan kontroler apapun dan konverter *DC-DC buck-boost*. Hasil yang didapatkan dari rata-rata perbandingan peningkatan daya *output* antara sistem *PV fixed* ke *active dual axis solar tracker* tanpa terhubung dengan *MPPT* adalah sebesar 43,69% dengan puncak peningkatan daya keluaran sistem tertinggi pada pukul 06.30 WIB sebesar 165,78% dengan selisih daya *output* sebesar 27,07 Watt dari daya *output* sistem *PV fixed* yang bernilai 16,3 Watt menjadi 43,39 Watt yaitu keluaran dari sistem *active dual axis solar tracker*.

#### 4.6 Uji Indeks Performansi Kontroler

Kontrol logika fuzzy tipe-2 diuji dengan memperhatikan karakteristik respon dari daya *output* terhadap waktu yang dihasilkan kontroler. Parameter karakteristik respon yang digunakan dalam uji performansi adalah *error steady state* ( $e_{ss}$ ), *maximum overshoot* ( $M_p$ ), *rise time* ( $t_r$ ), *settling time* ( $t_s$ ) dan *peak time* ( $t_p$ ). *Rise time* adalah waktu yang dibutuhkan untuk menaikkan respon dari 10% ke 90%, 5% ke 95% atau 0% ke 100% dari nilai akhir, *peak time* merupakan waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai titik puncak pertama *settling time* merupakan waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai kondisi stabil, *maximum overshoot* adalah nilai maksimal pada kurva yang diukur dari titik *set point*, *error steady state* adalah *error* dari nilai steady state dengan nilai *set point* dengan batasan minimum dan maksimum yang diperbolehkan bernilai 2% sampai 5% [20].

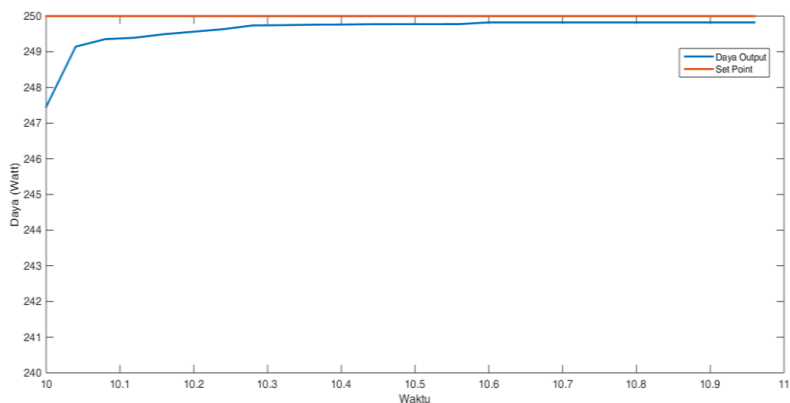
Uji performansi yang dilakukan meliputi uji saat pagi, siang dan sore hari. Grafik uji performansi pagi hari didapatkan seperti Gambar 4.10 berikut.



**Gambar 4. 9.** Grafik Karakteristik Respon Pagi Hari

Gambar 4.10 menunjukkan karakteristik respon daya *output* pagi hari yaitu pada rentang waktu dari pukul 06.00 WIB sampai 09.00 WIB. Sumbu x menyatakan waktu dan sumbu y menyatakan daya *output* dengan garis biru adalah daya *output* yang dihasilkan

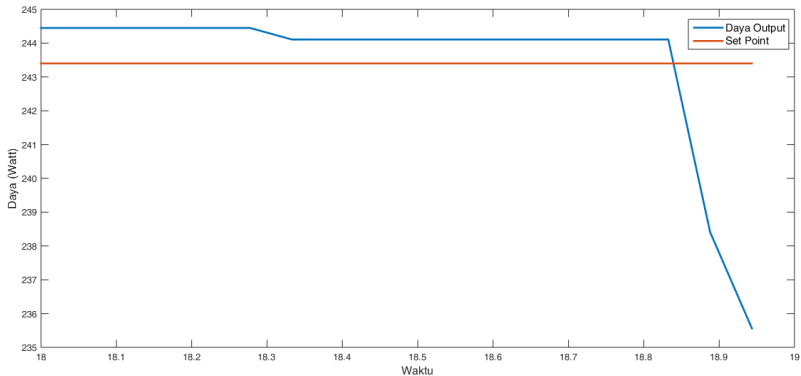
oleh kontroler logika fuzzy tipe-2 dan garis merah adalah *set point* yang bernilai 242 Watt. Daya maksimum yang dapat dihasilkan dari modul PV yang digunakan adalah sebesar 250 Watt sesuai dengan *datasheet* yaitu pada Tabel 3.1. *Set point* yang digunakan saat uji performansi pagi hari tidak mencapai 250 Watt karena pada pukul 06.00 WIB sampai 09.00 WIB *input* temperatur dan iradiasi matahari yang diterima oleh modul PV masih rendah sehingga daya *output* yang dihasilkan belum bisa mencapai daya maksimal. Daya saat kondisi *steady* didapatkan pada *settling time* ke 0,664 detik yaitu bernilai 243,9 Watt. *Rise time* yang didapatkan dari grafik karakteristik respon pada Gambar 4.10 adalah sebesar 0,163 detik dengan *maximum overshoot* bernilai 0%. Puncak tertinggi dari daya *output* pada pukul 06.00 WIB sampai 09.00 WIB didapatkan nilai daya *output* 248,91 Watt yaitu pada *peak time* mencapai 0,9714 detik. Parameter karakteristik respon dari ketiga uji yaitu uji pada pagi, siang dan sore hari tercantum pada Tabel 4.5. Grafik yang menunjukkan uji performansi saat siang hari ditunjukkan pada Gambar 4.11 berikut.



**Gambar 4. 10.** Grafik Karakteristik Respon Siang Hari

Grafik karakteristik respon dari uji performansi siang hari ditunjukkan pada Gambar 4.11. Waktu dalam satuan detik ditunjukkan pada sumbu x sedangkan sumbu y menunjukkan daya

keluaran dari kontroler pada siang hari tepatnya pada pukul 11.00 WIB sampai 12.00 WIB. *Set point* yang ditunjukkan oleh garis merah pada Gambar 4.11 bernilai 250 Watt. Nilai *set point* ini ditetapkan sesuai dengan nilai keluaran maksimum yang dapat dicapai oleh modul PV yang digunakan yaitu tercantum dalam *datasheet* pada Tabel 3.1 karena *input* temperatur dan iradiasi tertinggi didapatkan pada pukul 11.00 WIB sampai 12.00 WIB sehingga dapat dihasilkan daya *output* yang tinggi pula. *Rise time* yang didapatkan dari hasil uji performansi pada siang hari bernilai 0,2078 detik. Waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi *steady* yang bernilai 249,8 Watt adalah sebesar 10,56 detik. *Peak time* atau waktu yang diperlukan respon untuk mencapai nilai maksimum adalah sebesar 10,84 detik dengan nilai maksimum 249,8 yang hampir mendekati nilai *set point* yaitu 250 Watt. Nilai *maximum overshoot* yang diperoleh dari uji performansi cenderung rendah yaitu sebesar 0,000002%.



**Gambar 4. 11.** Grafik Karakteristik Respon Sore Hari

Gambar 4. 12 merupakan grafik karakteristik respon dari hasil uji performansi kontroler logika fuzzy tipe-2 pada saat sore hari yaitu pukul 15.00 WIB sampai pukul 17.00 WIB. Grafik respon dari daya *output* kontroler yang ditunjukkan pada sumbu y terhadap waktu dalam detik yang ditunjukkan pada sumbu x. Dua kurva di dalam grafik yaitu kurva dengan garis merah dan biru



secara berturut-turut merepresentasikan *set point* dan daya *output* kontroler. Nilai *Set point* yang digunakan pada uji performansi saat sore hari bernilai 243,4 Watt yang ditentukan karena nilai temperatur dan iradiasi matahari yang diterima oleh modul PV lebih rendah dibandingkan pada saat siang hari. Nilai puncak tertinggi dari daya *output* sebesar 244,4 Watt didapatkan saat *peak time* bernilai 18 detik. Waktu yang diperlukan respon untuk mencapai *steady state* adalah selama 18,94 detik dengan nilai daya saat kondisi *steady* sebesar 235,7 Watt. Nilai *rise time* yang diperoleh adalah sebesar 0,0884 detik. Tabel 4.5 berikut menunjukkan parameter dari ketiga uji yang telah dilakukan.

**Tabel 4. 5.** Hasil Uji Performansi

| Uji                                    | 06.00 WIB    | 11.00 WIB     | 17.00 WIB     |
|--|--------------|---------------|---------------|
| <i>Rise Time</i> ( $t_r$ )             | 0,163 detik  | 0,2078 detik  | 0,0884 detik  |
| <i>Settling Time</i> ( $t_s$ )         | 0,664 detik  | 10,5603 detik | 18,9401 detik |
| <i>Peak Time</i> ( $t_p$ )             | 0,9714 detik | 10,84 detik   | 18 detik      |
| <i>Maximum Overshoot</i> ( $M_p$ )     | 0%           | 0,00%         | 3,77%         |
| <i>Error Steady State</i> ( $e_{ss}$ ) | 0,79%        | 0,08%         | 3,16%         |

Tabel 4.5 menunjukkan hasil yang didapatkan dari uji performansi kontroler. Nilai *rise time* yang paling baik ditunjukkan pada waktu sore hari (pukul 17.00 WIB) yaitu hanya 0,0884 detik dengan *rise time* saat pagi (pukul 06.00 WIB) dan siang hari (pukul 11.00 WIB) secara berturut-turut adalah 0,163 detik dan 0,2078 detik. *Settling time* dan *peak time* terbaik ditunjukkan pada saat pengujian pagi hari dengan besar nilai secara berturut-turut adalah 0,664 detik dan 0,9714 detik. *Maximum overshoot* dari ketiga

waktu pengujian yaitu pagi, siang dan sore hari mendapatkan hasil terbaik pada pengujian pagi hari yaitu dengan nilai 0%. Nilai *error steady state* pada tabel 4.5 menunjukkan bahwa dari ketiga uji performansi meliputi uji pada pagi, siang dan sore hari masih berada pada batas yang diperbolehkan yaitu dengan batas minimum dan maksimum dari 2% hingga 5% sehingga kontroler yang diuji dapat bekerja dengan baik [20].

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat ditarik berdasarkan metode penelitian dan analisa data yang telah dilakukan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

- a. Parameter-parameter yang berpengaruh dalam perancangan *MPPT* berbasis logika fuzzy tipe-2 pada *active dual axis solar tracker* adalah temperatur permukaan dan temperatur lingkungan modul *PV*, iradiasi matahari yang diterima *PV*, kecepatan angin, resistansi beban dan kontroler yaitu logika fuzzy tipe-2 yang meliputi parameter berupa *input error* ( $e$ ), *input delta error* ( $\Delta e$ ), *output duty cycle* ( $D$ ), fungsi keanggotaan, batas-batas tiap fungsi keanggotaan, *rule base*, parameter defuzzifikasi dan *footprint of uncertainty* (*FOU*)
- b. Peningkatan daya *output* tertinggi yang berhasil diperoleh dengan menerapkan *MPPT* berbasis logika fuzzy tipe-2 pada sistem *active dual axis solar tracker* diperoleh pada pukul 15.00 WIB dengan selisih daya dari sistem *PV fixed* dengan *active dual axis solar tracker* sebesar 36,08 Watt yaitu dari daya *output PV fixed* bernilai 206,323 menjadi daya *output active dual axis solar tracker* 242,4 Watt atau sebesar 10,48% dengan peningkatan tertinggi adalah 17,48%.

### 5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

- a. Melengkapi sistem *MPPT* dengan *battery charging system* supaya *output* tegangan yang keluar dari modul *PV* dapat tersimpan dalam baterai.
- b. Memperhitungkan konsumsi daya masing-masing komponen agar dapat diketahui efisiensi secara keseluruhan sistem.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] BP, *BP Statistical Review of World Energy 2017*, Edinburgh, Scotland: Pureprint Group Limited, 2017.
- [2] N. ALTIN, "Single Phase Grid Interactive PV System With MPPT Capability Based on Type-2 Fuzzy Logic Systems," *IEEE Conferences Publications*, pp. 1-6, 2012.
- [3] M. S. Munna, K. M. Rahman, M. A. I. Bhuyan and M. A. Hoque, "Design, Implementation and Performance Analysis of a Dual-Axis Autonomous Solar Tracker," *IEEE Conferences*, pp. 1-5, 2015.
- [4] S. Soltani and M. J. Kouhanjani, "Fuzzy Logic Type-2 Controller Design for MPPT in Photovoltaic System," *IEEE Conferences*, pp. 149-155, 2017.
- [5] B. Wijiatmoko, "Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi," 7 November 2017. [Online]. Available: <http://ebtke.esdm.go.id/post/2017/11/07/1809/ebt.penting.untuk.masa.depan.ketahanan.energi.nasional>. [Accessed 16 November 2017].
- [6] S. Pratama, "Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi," 1 November 2017. [Online]. Available: <https://www.bppt.go.id/profil/organisasi/40-berita-bppt-3/berita-teknologi-informasi-energi-material/171-pemanfaatan-plts-sebagai-energi-alternatif-potensial-di-indonesia>. [Accessed 16 November 2017].
- [7] T. Kaur, S. Mahajan, S. Verma, Priyanka and J. Gambhir, "Arduino based Low Cost Active Dual Axis Solar Tracker," *IEEE Conferences*, pp. 1-5, 2016.
- [8] H. C. Lu and T. L. Shih, "Fuzzy System Control Design with Application to Solar Panel Active Dual-Axis Sun Tracker System," *IEEE Conferences*, pp. 1878-1883, 2010.
- [9] M. Sidek, N. Azis, W. Hasan, M. Ab Kadir, S. Shafie and M. Radzi, "Automated Positioning Dual-Axis Solar

- Tracking System with Precision Elevation and Azimuth Angle Control," *Elsevier*, pp. 160-170, 2107.
- [10] G. R. Yu and Y. C. Lin, "Design of MPPT by Using Interval Type-2 T-S Fuzzy Controller," *IEEE Conferences*, pp. 734-738, 2014.
- [11] S. Titri, C. Larbes, K. Y. Toumi and K. Benatchba, "A new MPPT controller based on the Ant colony optimization algorithm for Photovoltaic systems under partial shading conditions," *Applied Soft Computing*, vol. 58, pp. 465-479, 2017.
- [12] P. C. Cheng, B. R. Peng, Y. H. Liu, Y. S. Cheng and J. W. Huang, "Optimization of a Fuzzy Logic Control Based MPPPT Algorithm Using The Particle Swarm Optimization Technique," *Energies*, vol. Volume 8, pp. 5338-5360, 2015.
- [13] D. Verma, S. Nema, A. Shandilya and S. K. Dash, "Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques : Recapitulation in Solar Photovoltaic Systems," *Elsevier*, pp. 1018-1034, 2016.
- [14] P. Kofinas, S. Doltsinis, A. Dounis and G. Vouros, "A Reinforcement Learning Approach for MPPT Control Method of Photovoltaic Sources," *Elsevier*, pp. 461-473, 2017.
- [15] Y. Soufi, M. Bechouat and S. Kahla, "Fuzzy-PSO Controller Design for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic System," *Elsevier*, pp. 8680-8688, 2017.
- [16] S. Singh, L. Mathew and S. S.L., "Design and Simulation of Intelligent Control MPPT Technique for PV Module using MATLAB/SIMSCAPE," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. Volume 2, no. Issue 9, pp. 2320-3765, 2013.
- [17] U. Yilmaz, A. Kircay and S. Borekci, "PV System Fuzzy Logic MPPT Method and PI Control as a Charge Controller," *Elsevier*, pp. 994-1001, 2018.

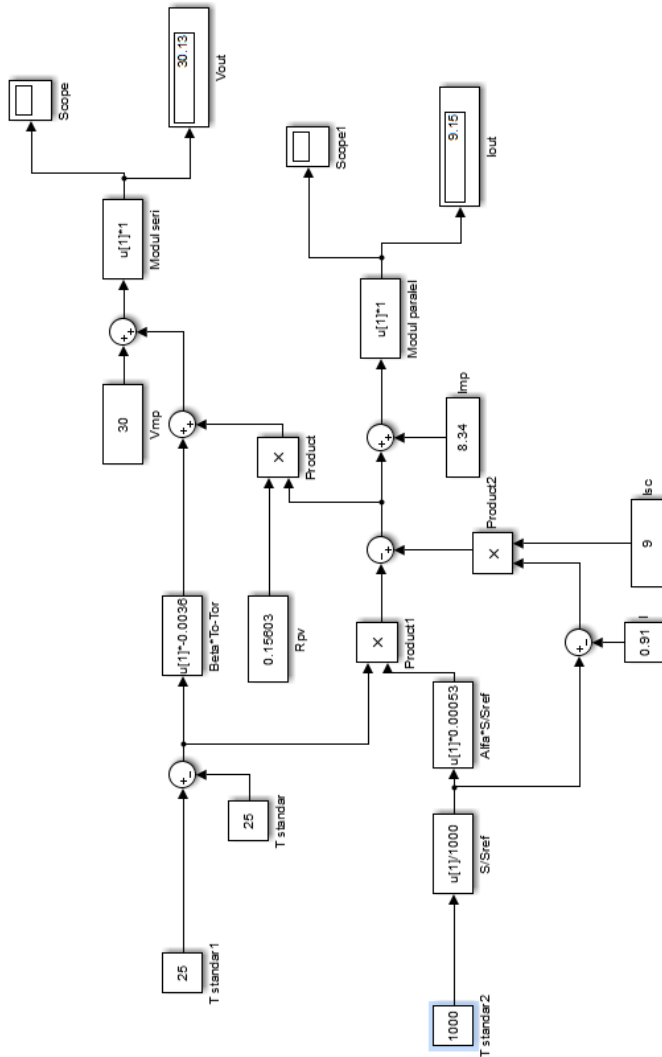
- [18] G. R. Yu and Y. C. Lin, "Design of MPPT by Using Interval Type-2 T-S Fuzzy Controller," *IEEE*, pp. 734-738, 2014.
- [19] I. Abadi, "Type-2 Fuzzy Logic Controller Based PV Passive Two-Axis Solar Tracking System," *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, vol. Vol 10, pp. 1827-6660, 2015.
- [20] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, New Jersey: Prentice Hall, 2010.
- [21] G. T. Mani, L. Ji, Y. Tang and L. Petacci, "Photovoltaic Module Thermal/Wind Performance : Long-Term Monitoring and Model Development for Energy Rating," *NCPV*, p. 936, 2003.
- [22] I. Abadi, A. Musyafa and A. Soeprijanto, "Design and Implementation of Active Two Axes Solar Tracking System Using Particle Swarm Optimization," *International Review of Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.)*, vol. 8, 2015.
- [23] O. Ezinwanne, F. Zhongwen and L. Zhijun, "Energy Performance and Cost Comparison of MPPT Techniques for Photovoltaics and other Applications," *Elsevier*, pp. 297-303, 2016.
- [24] P. Chapman and T. ESRAM, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Technique," *Elsevier*, vol. 22, pp. 439-449, 2007.

*Halaman ini sengaja dikosongka*



## LAMPIRAN

### Lampiran A. Pemodelan Sistem pada *software* SIMULINK MATLAB R2015a

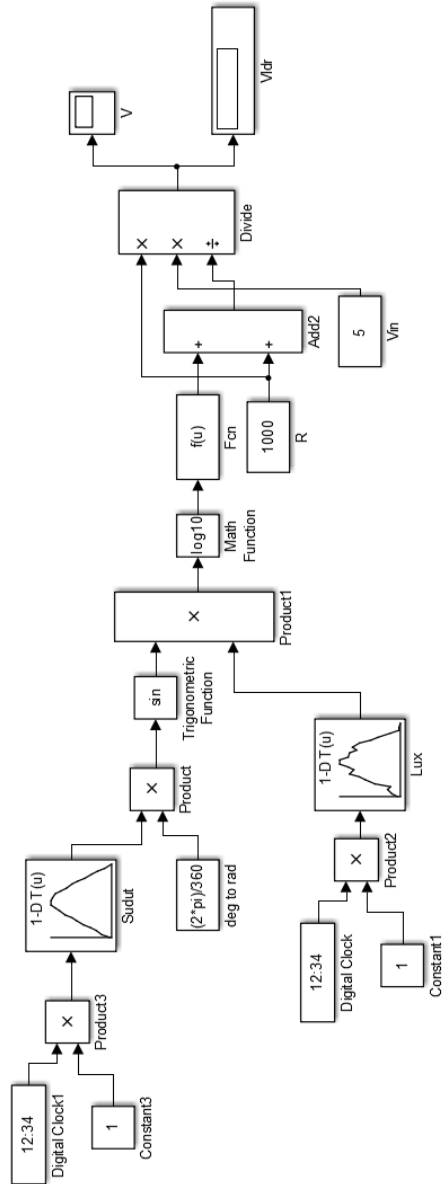


**Gambar A. 1.** Pemodelan PV Saat Kondisi STC

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

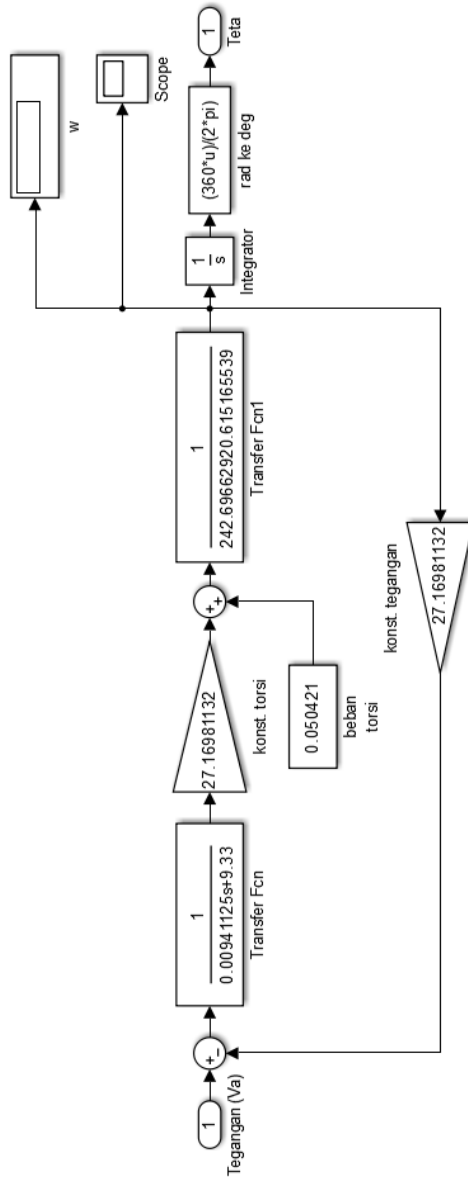


*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**Gambar A. 3.** Pemodelan Sensor *LDR*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**Gambar A. 4.** Pemodelan Motor DC

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

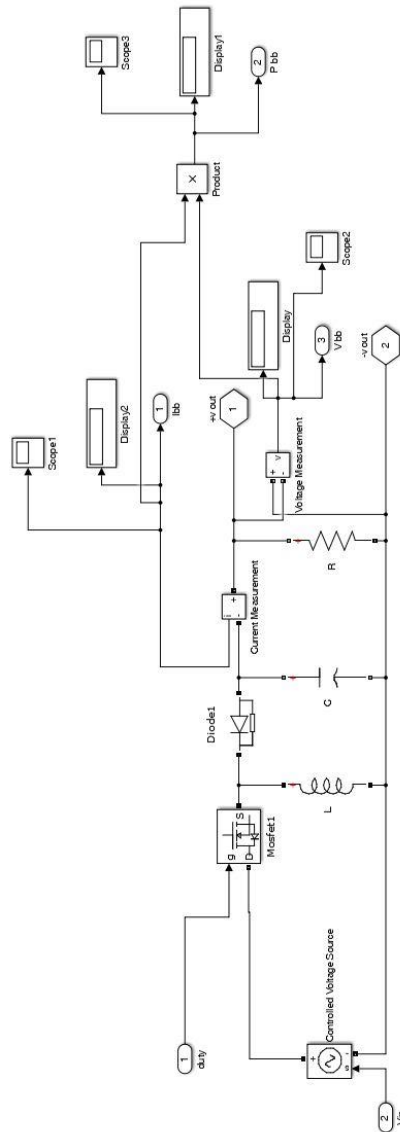




*Halaman ini sengaja dikosongkan*

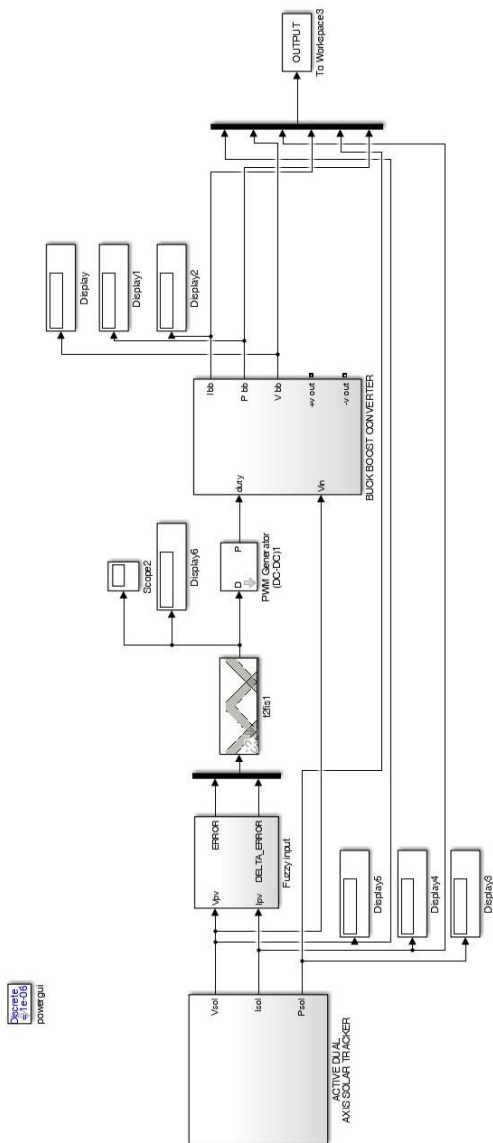


*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**Gambar A. 7.** Pemodelan Konverter DC-DC Buck-Boost

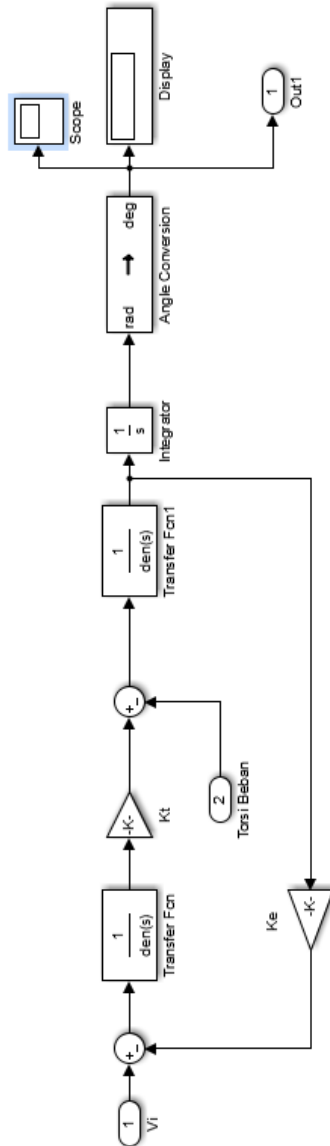
*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**Gambar A. 8.** Pemodelan MPPT Berbasis Logika Fuzzy Tipe-2

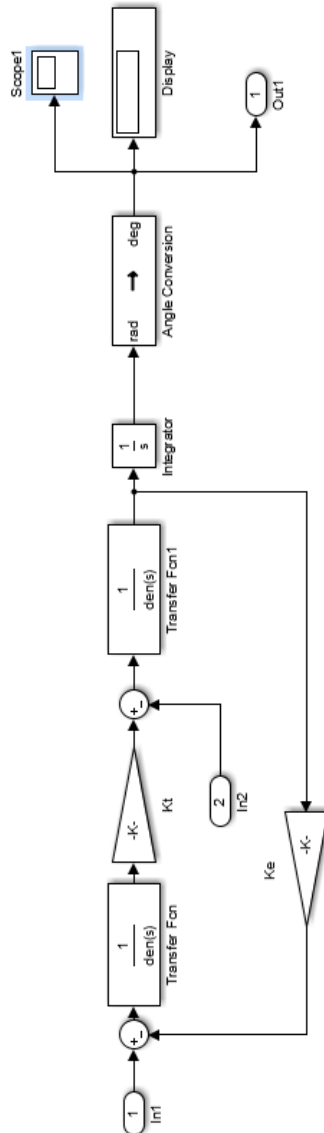
*Halaman ini sengaja dikosongkan*





**Gambar A. 9.** Pemodelan Motor *DC Pitch*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**Gambar A. 10.** Pemodelan Motor *DC Yaw*

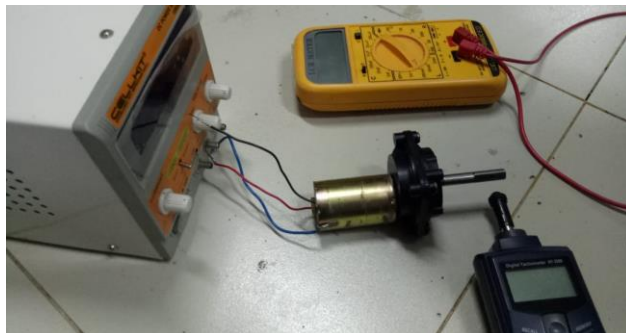
*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**Gambar A. 11.** Pengambilan Data Kecepatan Angin Menggunakan Anemometer



**Gambar A. 12.** Pengambilan Data Sensor LDR

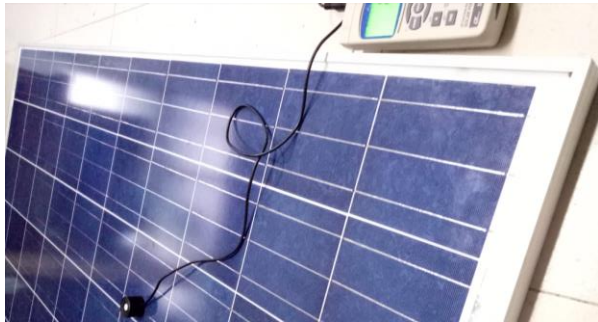


**Gambar A. 13.** Pengambilan Data Motor DC

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**Gambar A. 14.** Pengambilan Data V dan I PV



**Gambar A. 15.** Pengambilan Data Iradiasi Menggunakan Pyranometer



**Gambar A. 16.** Proses Pengambilan Data dengan Rute ITS-JMP-ITS

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## Lampiran B. Tabel Hasil Data

**Tabel B. 1.** Hasil Pengambilan Data 17 April 2018

| Waktu | Iradiasi Matahari (W/m <sup>2</sup> ) | Temperatur (°C) | Kecepatan Angin (m/s) |
|-------|---------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| 06.00 | 31,5                                  | 26,867          | 0                     |
| 06.30 | 59,367                                | 27,667          | 2                     |
| 07.00 | 194,9                                 | 31,8            | 1,333                 |
| 07.30 | 343,7                                 | 50,667          | 1,7                   |
| 08.00 | 419,5                                 | 41,2            | 1,133                 |
| 08.30 | 263,067                               | 41,533          | 1,733                 |
| 09.00 | 709,933                               | 47,6            | 0,2                   |
| 09.30 | 227,533                               | 41,6            | 1,967                 |
| 10.00 | 923,933                               | 55              | 0,3                   |
| 10.30 | 946,4                                 | 57,267          | 4,333                 |
| 11.00 | 1000,967                              | 59,133          | 2,1                   |
| 11.30 | 1011,333                              | 61,667          | 0,2                   |
| 12.00 | 990,333                               | 58,267          | 1,367                 |
| 12.30 | 938,933                               | 59,533          | 3,667                 |
| 13.00 | 912,167                               | 55,867          | 2,1                   |
| 13.30 | 793,767                               | 57,533          | 2,4                   |
| 14.00 | 706,933                               | 58,2            | 1,8                   |
| 14.30 | 518,8                                 | 48,2            | 7,7                   |
| 15.00 | 74,1                                  | 36,4            | 3,233                 |
| 15.30 | 67,467                                | 33,533          | 1,4                   |
| 16.00 | 56,333                                | 33,8            | 1,3                   |
| 16.30 | 33,867                                | 32,667          | 0,233                 |
| 17.00 | 13                                    | 30,4            | 0,667                 |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**Tabel B. 2.** Hasil Pengambilan Data Nilai Tegangan Sensor *LDR*

| Pukul | Intensitas Cahaya (lux) | Tegangan (Volt) |         |         |         |
|-------|-------------------------|-----------------|---------|---------|---------|
|       |                         | LDR 1           | LDR 2   | LDR 3   | LDR 4   |
| 06.00 | 4126,667                | 2,658           | 2,546   | 2,562   | 2,563   |
| 06.30 | 11070                   | 4,27233         | 4,26267 | 4,31833 | 4,208   |
| 07.00 | 16126,67                | 4,41033         | 4,557   | 4,602   | 4,5986  |
| 07.30 | 11836,667               | 4,38267         | 4,534   | 4,582   | 4,66    |
| 08.00 | 29733,333               | 4,622           | 4,4067  | 4,63167 | 4,323   |
| 08.30 | 39400                   | 4,39933         | 4,54267 | 4,58433 | 4,59    |
| 09.00 | 46333,333               | 4,60567         | 4,69067 | 4,72    | 4,7176  |
| 09.30 | 56466,667               | 4,63267         | 4,716   | 4,74067 | 4,76    |
| 10.00 | 52366,667               | 4,56267         | 4,69    | 4,738   | 4,7     |
| 10.30 | 57766,667               | 4,98356         | 4,989   | 4,98833 | 4,9906  |
| 11.00 | 68066,667               | 4,81221         | 4,729   | 4,755   | 4,758   |
| 11.30 | 66833,333               | 4,67533         | 4,70967 | 4,768   | 4,79    |
| 12.00 | 57800                   | 4,9832          | 4,985   | 4,98803 | 4,99    |
| 12.30 | 56465                   | 4,635           | 4,716   | 4,7307  | 4,723   |
| 13.00 | 49566,667               | 4,628           | 4,706   | 4,736   | 4,55    |
| 13.30 | 53433,333               | 4,635           | 4,711   | 4,74    | 4,741   |
| 14.00 | 45366,667               | 4,565           | 4,654   | 4,699   | 4,69    |
| 14.30 | 33766,667               | 4,522           | 4,625   | 4,668   | 4,666   |
| 15.00 | 25466,667               | 4,87693         | 4,885   | 4,88483 | 4,8876  |
| 15.30 | 11946,667               | 4,388           | 4,525   | 4,58133 | 4,567   |
| 16.00 | 2566,6667               | 3,27633         | 3,158   | 3,17867 | 3,23267 |
| 16.30 | 4020                    | 3,66167         | 3,01567 | 3,15667 | 3,14167 |
| 17.00 | 1621                    | 1,591           | 1,664   | 1,533   | 1,43    |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**Tabel B. 3.** Hasil Pengambilan Data Nilai Resistansi Sensor *LDR*

| Pukul | Intensitas Cahaya (lux) | Resistansi (Ohm) |         |         |         |
|-------|-------------------------|------------------|---------|---------|---------|
|       |                         | LDR 1            | LDR 2   | LDR 3   | LDR 4   |
| 06.00 | 4126,667                | 305,900          | 234,467 | 209,200 | 286,667 |
| 06.30 | 11070,000               | 164,933          | 113,100 | 115,167 | 106,000 |
| 07.00 | 16126,667               | 139,700          | 96,133  | 118,033 | 93,000  |
| 07.30 | 11836,667               | 152,067          | 121,367 | 104,433 | 186,967 |
| 08.00 | 29733,333               | 98,200           | 72,367  | 77,167  | 68,200  |
| 08.30 | 39400,000               | 89,500           | 68,500  | 64,067  | 65,900  |
| 09.00 | 46333,333               | 84,267           | 63,267  | 62,233  | 62,167  |
| 09.30 | 56466,667               | 81,167           | 60,133  | 62,100  | 55,500  |
| 10.00 | 52366,667               | 83,067           | 60,633  | 60,067  | 55,067  |
| 10.30 | 57766,667               | 73,533           | 71,167  | 56,100  | 51,000  |
| 11.00 | 68066,667               | 72,667           | 55,400  | 55,100  | 50,333  |
| 11.30 | 66833,333               | 68,633           | 53,067  | 67,833  | 62,633  |
| 12.00 | 57800,000               | 77,900           | 58,100  | 57,867  | 57,067  |
| 12.30 | 56465,000               | 80,750           | 67,133  | 65,167  | 65,500  |
| 13.00 | 49566,667               | 79,967           | 62,433  | 60,400  | 69,133  |
| 13.30 | 53433,333               | 79,967           | 62,433  | 60,400  | 69,133  |
| 14.00 | 45366,667               | 114,900          | 70,533  | 79,967  | 63,800  |
| 14.30 | 33766,667               | 105,267          | 79,300  | 76,467  | 71,200  |
| 15.00 | 25466,667               | 113,967          | 84,067  | 83,900  | 76,000  |
| 15.30 | 11946,667               | 147,200          | 102,300 | 114,833 | 93,367  |
| 16.00 | 2566,667                | 446,000          | 282,000 | 286,067 | 247,000 |
| 16.30 | 4020,000                | 344,467          | 224,500 | 224,700 | 191,733 |
| 17.00 | 1621,000                | 547,000          | 339,200 | 364,633 | 309,000 |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**Tabel B. 4.** Parameter Motor *DC*

| V  | Rad/s  | Ke      | Kt      | Tm     | Jm       | Bm     |
|----|--------|---------|---------|--------|----------|--------|
| 2  | 0,0517 | 38,7097 | 38,7097 | 0,3871 | 211,7647 | 7,4922 |
| 3  | 0,0850 | 35,2941 | 35,2941 | 0,3529 | 305,6604 | 4,1522 |
| 4  | 0,1283 | 31,1688 | 31,1688 | 0,3117 | 273,4177 | 2,4287 |
| 5  | 0,1667 | 30,0000 | 30,0000 | 0,3000 | 264,7059 | 1,8000 |
| 6  | 0,1950 | 30,7692 | 30,7692 | 0,3077 | 272,2689 | 1,5779 |
| 7  | 0,2267 | 30,8824 | 30,8824 | 0,3088 | 181,2950 | 1,3625 |
| 8  | 0,2750 | 29,0909 | 29,0909 | 0,2909 | 258,6826 | 1,0579 |
| 9  | 0,3083 | 29,1892 | 29,1892 | 0,2919 | 259,8930 | 0,9467 |
| 10 | 0,3567 | 28,0374 | 28,0374 | 0,2804 | 250,0000 | 0,7861 |
| 11 | 0,3917 | 28,0851 | 28,0851 | 0,2809 | 250,6329 | 0,7171 |
| 12 | 0,4417 | 27,1698 | 27,1698 | 0,2717 | 242,6966 | 0,6152 |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**Tabel B. 5.** Data Perbandingan Output Simulasi dan Pengambilan Data Aktual

| Waktu | V Simulasi (V) | V Aktual (V) | I Simulasi (A) | I Aktual (A) |
|-------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| 06.00 | 28,759623      | 28,62        | 0,433469       | 0,251        |
| 06.30 | 28,795867      | 29,733       | 0,684219       | 0,53         |
| 07.00 | 28,971217      | 30,86        | 1,903398       | 1,524        |
| 07.30 | 29,111631      | 30,667       | 3,238624       | 3,093        |
| 08.00 | 29,252324      | 30,6         | 3,921898       | 3,364        |
| 08.30 | 29,031653      | 29,43        | 2,515298       | 2,2          |
| 09.00 | 29,636365      | 30,55        | 6,530893       | 5,43         |
| 09.30 | 28,98156       | 29,92        | 2,195795       | 1,93         |
| 10.00 | 29,909274      | 30,25        | 8,450706       | 6,267        |
| 10.30 | 29,932429      | 29,576       | 8,651415       | 5,667        |
| 11.00 | 30,002038      | 29,66        | 9,140595       | 6,633        |
| 11.30 | 30,007231      | 29,25        | 9,232343       | 5,76         |
| 12.00 | 29,990324      | 29,333       | 9,045536       | 5,813        |
| 12.30 | 29,91363       | 28,86        | 8,583212       | 6,826        |
| 13.00 | 29,889593      | 29,336       | 8,34458        | 6,75         |
| 13.30 | 29,717523      | 29,133       | 7,280216       | 6,6          |
| 14.00 | 29,593378      | 29,62        | 6,499958       | 4,446        |
| 14.30 | 29,366134      | 30,16        | 4,812821       | 3,822        |
| 15.00 | 28,785061      | 28,65        | 0,816452       | 0,619        |
| 15.30 | 28,78609       | 28,8         | 0,756898       | 0,562        |
| 16.00 | 28,7695        | 28,41        | 0,656734       | 0,445        |
| 16.30 | 28,74205       | 27,51        | 0,454665       | 0,266        |
| 17.00 | 28,720924      | 25,76        | 0,266963       | 0,1          |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**Tabel B. 6.** Hasil Pengambilan Data Iradiasi Matahari dan Temperatur pada *PV Fixed* Tanggal 25 April 2018

| Waktu (WIB) | Temperatur (°C) | Iradiasi (W/m <sup>2</sup> ) | Kecepatan Angin (m/s) |
|-------------|-----------------|------------------------------|-----------------------|
| 06.00       | 23,8            | 34,9                         | 0                     |
| 06.30       | 24,2            | 60,3                         | 0                     |
| 07.00       | 24,8            | 133,5                        | 0,1                   |
| 07.30       | 25,4            | 266                          | 0                     |
| 08.00       | 25,9            | 404,5                        | 0                     |
| 08.30       | 27,4            | 558,2                        | 0                     |
| 09.00       | 28,5            | 635,9                        | 4                     |
| 09.30       | 29,6            | 747,8                        | 1,5                   |
| 10.00       | 33,8            | 566,4                        | 2,5                   |
| 10.30       | 34,6            | 876,5                        | 0,1                   |
| 11.00       | 36,7            | 819,5                        | 2,5                   |
| 11.30       | 36,92           | 912,5                        | 1,8                   |
| 12.00       | 36,6            | 794,3                        | 1,3                   |
| 12.30       | 38              | 751,3                        | 0,2                   |
| 13.00       | 35,6            | 620,2                        | 0,6                   |
| 13.30       | 30,4            | 594,2                        | 0                     |
| 14.00       | 28,7            | 583,2                        | 0                     |
| 14.30       | 27,8            | 493,4                        | 2,9                   |
| 15.00       | 24,8            | 274,6                        | 0                     |
| 15.30       | 24,4            | 209,5                        | 0,2                   |
| 16.00       | 24,4            | 65,6                         | 1,7                   |
| 16.30       | 23,6            | 46,9                         | 0,8                   |
| 17.00       | 23,4            | 18,8                         | 0,1                   |

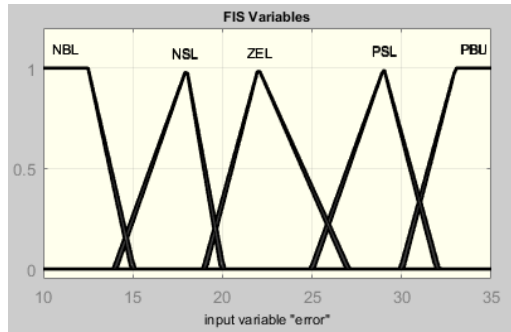
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**Tabel B. 7.** Hasil Pengambilan Data Iradiasi Matahari dan Temperatur pada *Active Dual Axis Silar Tracker* Tanggal 25 April 2018

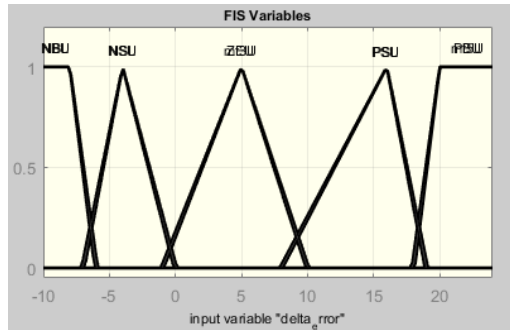
| Waktu (WIB) | Temperatur (°C) | Iradiasi (W/m <sup>2</sup> ) | Kecepatan Angin (m/s) |
|-------------|-----------------|------------------------------|-----------------------|
| 06.00       | 24              | 70,1                         | 0                     |
| 06.30       | 24,2            | 150,5                        | 0                     |
| 07.00       | 25              | 407,7                        | 0,2                   |
| 07.30       | 25,7            | 360,2                        | 0                     |
| 08.00       | 25,9            | 539,8                        | 0                     |
| 08.30       | 27,4            | 692,9                        | 1,7                   |
| 09.00       | 28,9            | 705,3                        | 1,8                   |
| 09.30       | 30              | 848,1                        | 0,5                   |
| 10.00       | 34              | 816,4                        | 2,2                   |
| 10.30       | 34,6            | 920,4                        | 0,1                   |
| 11.00       | 36,7            | 872,5                        | 2                     |
| 11.30       | 36,9            | 921,5                        | 0,1                   |
| 12.00       | 37,4            | 795,4                        | 0,8                   |
| 12.30       | 38              | 767,4                        | 0,2                   |
| 13.00       | 36,2            | 752,4                        | 0,3                   |
| 13.30       | 30,5            | 671,2                        | 0                     |
| 14.00       | 28,7            | 662,9                        | 1,2                   |
| 14.30       | 28              | 610,6                        | 0                     |
| 15.00       | 26              | 374,8                        | 0,2                   |
| 15.30       | 24,4            | 284,8                        | 4,5                   |
| 16.00       | 24,5            | 77,5                         | 1,5                   |
| 16.30       | 23,8            | 73,4                         | 0,4                   |
| 17.00       | 23,4            | 40,7                         | 0,1                   |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

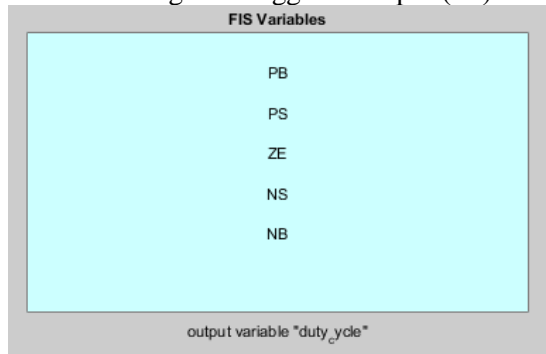
## Lampiran C. Fungsi Keanggotaan Logika Fuzzy Tipe-2



**Gambar C. 1.** Fungsi Keanggotaan Input (e)  $FOU \pm 0,1$



**Gambar C. 2.** Fungsi Keanggotaan Input ( $\Delta$ )  $FOU \pm 0,1$



**Gambar C. 3.** Fungsi keanggotaan output (D)  $FOU \pm 0,1$

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



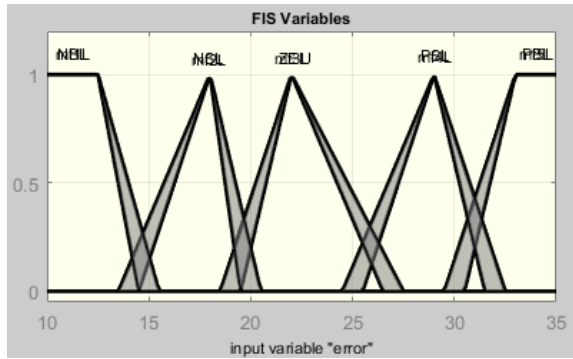
**Tabel C. 1.** Batas-Batas Fungsi Keanggotaan Input ( $e$ )  $FOU \pm 0,1$ 

| Membership Function (MF) | Logika Fuzzy Tipe-2       |
|--------------------------|---------------------------|
| NB (Negative Big)        | U : [-Inf 10 12,5 15,1 1] |
|                          | L : [-Inf 10 12,5 14,9 1] |
| NS (Negative Small)      | U : [13,9 18 20,1 1]      |
|                          | L : [14,1 18 19,9 1]      |
| ZE (Zero)                | U : [18,9 22 27,1 1]      |
|                          | L : [19,1 22 26,9 1]      |
| PS (Positive Small)      | U : [24,9 29 32,1 1]      |
|                          | L : [25,1 29 31,9 1]      |
| PB (Positive Big)        | U : [29,9 33 35 Inf 1]    |
|                          | L : [30,1 33 35 Inf 1]    |

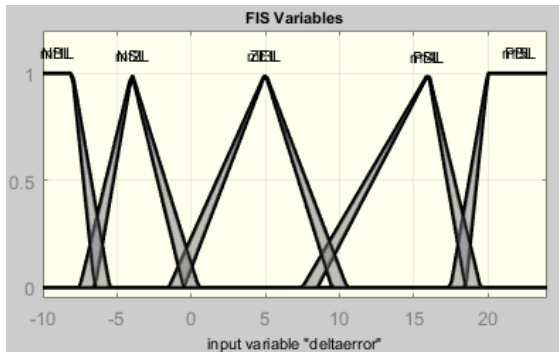
**Tabel C. 2.** Batas-Batas Fungsi Keanggotaan Input ( $\Delta e$ )  $FOU \pm 0,1$ 

| Membership Function (MF) | Logika Fuzzy Tipe-2      |
|--------------------------|--------------------------|
| NB (Negative Big)        | U : [-Inf -10 -8 -5,9 1] |
|                          | L : [-Inf -10 -8 -6,1 1] |
| NS (Negative Small)      | U : [-7,1 -4 0,1 1]      |
|                          | L : [-6,9 -4 -0,1 1]     |
| ZE (Zero)                | U : [-1,1 5 10,1 1]      |
|                          | L : [-0,9 5 9,9 1]       |
| PS (Positive Small)      | U : [7,9 16 19,1 1]      |
|                          | L : [8,1 16 18,9 1]      |
| PB (Positive Big)        | U : [17,9 20 24 Inf 1]   |
|                          | L : [18,1 20 24 Inf 1]   |

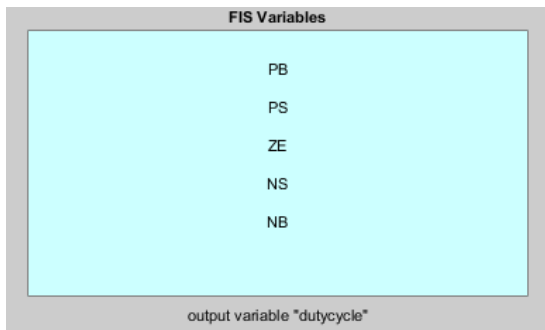
*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**Gambar C. 4.** Fungsi Keanggotaan Input (e)  $FOU \pm 0,5$



**Gambar C. 5.** Fungsi Keanggotaan Input ( $\Delta e$ )  $FOU \pm 0,5$



**Gambar C. 6.** Fungsi Keanggotaan Output (D)  $FOU \pm 0,5$

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**Tabel C. 3.** Batas-Batas Fungsi Keanggotaan Input ( $\epsilon$ )  $FOU \pm 0,5$ 

| Membership Function (MF) | Logika Fuzzy Tipe-2       |
|--------------------------|---------------------------|
| NB (Negative Big)        | U : [-Inf 10 12,5 15,5 1] |
|                          | L : [-Inf 10 12,5 14,5 1] |
| NS (Negative Small)      | U : [13,5 18 20,5 1]      |
|                          | L : [14,5 18 19,5 1]      |
| ZE (Zero)                | U : [18,5 22 27,5 1]      |
|                          | L : [19,5 22 26,5 1]      |
| PS (Positive Small)      | U : [24,5 29 32,5 1]      |
|                          | L : [25,5 29 31,5 1]      |
| PB (Positive Big)        | U : [29,5 33 35 Inf 1]    |
|                          | L : [30,5 33 35 Inf 1]    |

**Tabel C. 4.** Batas-Batas Fungsi Keanggotaan Input ( $\Delta\epsilon$ )  $FOU \pm 0,5$ 

| Membership Function (MF) | Logika Fuzzy Tipe-2      |
|--------------------------|--------------------------|
| NB (Negative Big)        | U : [-Inf -10 -8 -5,5 1] |
|                          | L : [-Inf -10 -8 -6,5 1] |
| NS (Negative Small)      | U : [-7,5 -4 0,5 1]      |
|                          | L : [-6,5 -4 -0,5 1]     |
| ZE (Zero)                | U : [-1,5 5 10,5 1]      |
|                          | L : [-0,5 5 9,5 1]       |
| PS (Positive Small)      | U : [7,5 16 19,5 1]      |
|                          | L : [8,5 16 18,5 1]      |
| PB (Positive Big)        | U : [17,5 20 24 Inf 1]   |
|                          | L : [18,5 20 24 Inf 1]   |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## Lampiran D. Daftar Notasi

|                  |   |
|------------------|---|
| $I$              | = Arus keluaran <i>PV</i> (A)                         |
| $I_{ph}$         | = Arus pada terminal <i>PV</i> (A)                    |
| $I_d$            | = Arus saturasi dioda (A)                             |
| $q$              | = Muatan listrik ( $1,6021 \times 10^{-19}$ C)        |
| $V$              | = Tegangan terminal (V)                               |
| $R_s$            | = Resistansi seri ekuivalen <i>array PV</i> (Ohm)     |
| $R_p$            | = Resistansi paralel ekuivalen <i>array PV</i> (Ohm)  |
| $n_2$            | = Jumlah <i>solar cell</i> yang terhubung secara seri |
| $k$              | = Konstanta Boltzmann ( $1,3865 \times 10^{-23}$ J/K) |
| $T$              | = Temperatur sel (K)                                  |
| $\alpha$         | = Azimuth, °(derajat)                                 |
| $\beta$          | = sudut pitch, °(derajat)                             |
| $\gamma$         | = altitude, °(derajat)                                |
| $\gamma_s$       | = sudut yaw, °(derajat)                               |
| $\delta$         | = sudut deklinasi, °(derajat)                         |
| $\omega$         | = sudut jam, °(derajat)                               |
| $\varphi$        | = lintang, °(derajat)                                 |
| $\theta_z$       | = sudut zenith, °(derajat)                            |
| $\theta_i$       | = sudut datang, °(derajat)                            |
| $n$              | = jumlah hari dalam 1 tahun (365 hari)                |
| $V_{out}$        | = Tegangan output konverter (V)                       |
| $V_{in}$         | = Tegangan input konverter (D)                        |
| $D$              | = <i>Duty cycle</i>                                   |
| $I_{out}$        | = Arus output konverter (A)                           |
| $L_{min}$        | = Induktansi induktor minimal konverter (H)           |
| $f$              | = Frekuensi <i>switching</i> (Hz)                     |
| $\Delta V_{out}$ | = <i>Ripple</i> tegangan output (V)                   |
| $C$              | = Kapasitansi kapasitor output konverter (F)          |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



Lampiran E. Source Code sistem *MPPT* berbasis P&O

```

function D = PO(V, I, T)
persistent Pn Po dP d dd n;
if isempty(V)
    V=30;
end
if isempty(I)
    I=0;
end
if isempty(Po)
    Po=0;
end
if isempty(Pn)
    Pn=0;
end
if isempty(dP)
    dP=0;
end
if isempty(d)
    d=1;
end
if isempty(dd)
    dd=0;
end
if isempty(n)
    n=1;
end
if (T>n*0.02)
    n=n+1;
    Po=Pn;
    Pn=V*I;
    dP=Pn-Po;
    if (dd==0) % to avoid dP/dd=inf
        if dP>1

```

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

```

dd=0.01;
    d=d+dd;
else
    if (dP<-1)
        dd=-0.01;
        d=d+dd;
    else
        dd=0;
    end
end
else
    if ((dP<1)&&(dP>-1)) % leave little margin
        dd=0;
        d=d+dd;
    else
        if ((dP/dd)>0) % positive slop
            dd=0.01;
            d=d+dd;
        else
            dd=-0.01;
            d=d+dd;
        end
    end
end
end
D=d/(d+1); % calculate duty, code to avoid duty
less than 0.1 and more than 0.9
if (D<0.1)
    D=0.1;
    d=D/(1-D);
else
    if (D>0.9)
        D=0.9;
        d=D/(1-D);
    else
        end
end
end
end

```

### BIODATA PENULIS



Nama Penulis yaitu Qurrotul Uyuniyah. Penulis lahir di Rembang, 27 Februari 1997. Pada tahun 2008 penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SD N Karanganyar, pada tahun 2011 menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 Kragan, pada tahun 2014 menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Rembang. Pada tahun yang sama, penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Departemen Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Konsentrasi tugas akhir yang dialami adalah bidang rekayasa instrumentasi dan kontrol. Pada bulan Juli 2018 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Studi Performansi *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* Berbasis Kontroler Logika Fuzzy Tipe-2 Pada *Plant Photovoltaic* Menggunakan *Active Dual Axis Solar Tracker*.**

Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, anda dapat menghubungi melalui email: [qurrotuluyuniyah97@gmail.com](mailto:qurrotuluyuniyah97@gmail.com).