



TUGAS AKHIR TF 141581

**ANALISIS UNJUK KERJA SISTEM PENJEJAK  
MATAHARI SATU SUMBU DAN DUA SUMBU  
DENGAN KONTROL ANFIS (ADAPTIVE NEURO-  
FUZZY INFERENCE SYSTEM)**

ILHAM AMIRUL AKBAR  
NRP 2413 100 132

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

Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017



FINAL PROJECT TF 141581

***ANALYSIS OF THE ONE-AXIS AND TWO AXIS  
SOLAR TRACKING SYSTEM PEFORMANCE WITH  
ANFIS CONTROL (ADAPTIVE NEURO-FUZZY  
INFERENCE SYSTEM)***

ILHAM AMIRUL AKBAR  
NRP 2413 100 132

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

Department Of Engineering Physics  
Faculty of Technology Industry  
Institute Technology of Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017

## **PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME**

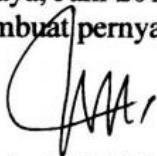
Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ilham Amirul Akbar  
NRP : 2413100132  
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Unjuk Kerja Sistem Penjejak Matahari Satu Sumbu dan Dua Sumbu dengan Kontrol ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*)” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sangsi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Surabaya, Juni 2017  
Yang membuat pernyataan,



Ilham Amirul Akbar  
NRP. 2413100132



## LEMBAR PENGESAHAN

### TUGAS AKHIR

**“ANALISIS UNJUK KERJA SISTEM PENJEJAK  
MATAHARI SATU SUMBU DAN DUA SUMBU DENGAN  
KONTROL ANFIS (ADAPTIVE NEURO-FUZZY  
INFERENCE SYSTEM)”**

Oleh :

**Ilham Amirul Akbar**  
**NRP. 2413 100 132**

Surabaya, 2017  
Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

  
**Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.**  
NIP: 19761006199903 1 002

Dosen Pembimbing II

  
**Arief Abdurrahman, S.T., M.T.**  
NIP: 19870712 201404 1 002





**“ANALISIS UNJUK KERJA SISTEM PENJEJAK  
MATAHARI SATU SUMBU DAN DUA SUMBU DENGAN  
KONTROL ANFIS (ADAPTIVE NEURO-FUZZY  
INFERENCE SYSTEM)”**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Program Studi S1 Teknik Fisika  
Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**ILHAM AMIRUL AKBAR**  
**NRP. 2413 100 132**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Dr. Imam Abadi, S.T., M.T. ....  (Pembimbing I)
2. Arief Abdurrahman, S.T., M.T. ....  (Pembimbing II)
3. Ir. Matradji, M.Sc. ....  (Ketua Penguji)
4. Ir. Yaumar, M.T. ....  (Penguji I)
5. Dyah Sawitri, S.T., M.T. ....  (Penguji II)

**SURABAYA**  
**JULI 2017**

# **ANALISIS UNJUK KERJA SISTEM PENJEJAK MATAHARI SATU SUMBU DAN DUA SUMBU DENGAN KONTROL ANFIS (ADAPTIVE NEURO- FUZZY INFERENCE SYSTEM)**

**Nama Mahasiswa : Ilham Amirul Akbar**  
**NRP : 2413 100 132**  
**Pembimbing : Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.**  
**Arief Abdurrahman S.T., M.T.**

## **Abstrak**

Energi matahari merupakan salah satu energi terbarukan yang mendapatkan perhatian lebih dari hari ke hari di banyak negara. Solar PV membutuhkan posisi yang tepat untuk mendapatkan hasil energi yang maksimum. Penelitian dilakukan dengan perbandingan unjuk kerja dengan dua metode penjejakan matahari dengan menggunakan satu sumbu dan dua sumbu dengan menggunakan kontrol ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*). Sistem penjejak matahari merupakan suatu sistem yang bekerja mendeteksi posisi matahari dengan menggunakan sensor cahaya dan mengontrol photovoltaic agar selalu tegak lurus terhadap matahari dengan mengubah sumbu pitch dan yaw dari suatu penjejak matahari. LDR (Light Dependent Resistor) merupakan salah satu sensor cahaya yang hambatan dari sensor itu sendiri berubah bergantung pada intensitas cahaya yang masuk. Motor DC digunakan sebagai penggerak panel PV dalam sebuah sistem penjejak matahari. Kontrol ANFIS pada penelitian memiliki indeks peformansi dengan nilai rise time sebesar 1.681 detik, settling time sebesar 2.588 detik, *maximum overshoot* sebesar 2.667 % dan *error steady state* sebesar 0.013 % serta peningkatan efesiensi daya terbaik terjadi pada sistem penjejak matahari dua sumbu terhadap *fixed* dengan nilai efesiensi 50.16 %.

**Kata kunci:** *Photovoltaic*, sistem penjejak matahari satu sumbu, sistem penjejak matahari dua sumbu, kontrol ANFIS, indeks unjuk kerja, keluaran daya *photovoltaic*.



# **ANALYSIS OF THE ONE-AXIS AND TWO AXIS SOLAR TRACKING SYSTEM PEFORMANCE WITH ANFIS CONTROL (ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM)**

**Name** : Ilham Amirul Akbar  
**NRP** : 2413 100 132  
**Supervisor** : Dr. Imam Abadi, S.T., M.T.  
Arief Abdurrahman S.T., M.T.

## **Abstract**

Solar energy is one of the most renewable energy of day-to-day attention in many countries. Solar PV needs the right position to get maximum energy yield. The study was conducted by comparing performance with two sun tracking methods using one axis and two axes using ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) control. The sun tracking system is a system that works mathematically by using a light sensor and photovoltaic control so that it is always perpendicular to the sun by changing the pitch and yaw axis of a solar tracker. The LDR (Light Dependent Resistor) is one of the light sensors whose resistance from the sensor itself changes depending on the intensity of the incoming light. DC motors are used as PV drive panels in a solar tracking system. ANFIS control in this research has a peformance index with a rise time of 1,681 seconds, settling time of 2,588 seconds, maximum overshoot of 2.667% and steady state error of 0.013 % with the best power efficiency improvement occurs in two-axis solar tracking system against fixed with efficiency value of 50.16%.

**Keywords:** Photovoltaic, one-axis solar tracking system, two-axis solar tracking system, ANFIS control, performance index, photovoltaic power output.



## KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan laporan penelitian Tugas Akhir yang berjudul **“Analisis Unjuk Kerja Sistem Penjejak Matahari Satu Sumbu dan Dua Sumbu dengan Kontrol ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*)”** dengan tepat waktu. Laporan ini dapat terselesaikan tepat waktu karena dukungan dan peran serta dari berbagai pihak. Sehubungan dengan adanya hal tersebut, maka dalam kesempatan kali ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Bapak dan Ibu beserta seluruh keluarga tercinta, terima kasih untuk dukungan tiada henti dan doa yang terus dipanjatkan hingga laporan Tugas Akhir ini dapat terselesaikan.
2. Bapak Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS.
3. Bapak Dr. Imam Abadi, S.T., M.T. selaku pembimbing Tugas Akhir yang telah membina dan membimbing dengan baik.
4. Bapak Arief Abdurakhman S.T., M.T. elaku pembimbing Tugas Akhir yang telah membina dan membimbing dengan baik.
5. Bapak Dr.rer.nat.Ir. Aulia M. T. Nasution MSc selaku Dosen Wali penulis.
6. Teman-teman tim *solar tracker* yang telah membantu banyak dalam Tugas Akhir ini.
7. Teman-teman S1 Teknik Fisika 2013 FTI-ITS.
8. Dosen dan Asisten di Laboratorium Kualitas Daya dan Teknik Sistem Tenaga PENS yang telah membantu banyak dalam Tugas Akhir ini.
9. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis menerima segala masukan baik berupa saran, kritik, dan segala bentuk tegur sapa demi kesempurnaan laporan Tugas Akhir ini.

Demikian laporan Tugas Akhir ini penulis persembahkan dengan harapan dapat bermanfaat dalam akademik baik bagi penulis sendiri maupun bagi pembaca.

Surabaya, 5 Juni 2017

Penulis.

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL.....</b>	<b>i</b>
<b>PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME .....</b>	<b>v</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xiii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xix</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xxi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Permasalahan.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Tugas Akhir .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Sistem Penjejak Matahari.....	5
2.2 Tipe Penjejak Matahari .....	6
2.3 Sensor Cahaya (LDR) .....	8
2.4 <i>Photovoltaic</i> .....	9
2.5 Motor DC .....	11
2.6 <i>Fuzzy Logic Controller</i> .....	13
2.7 Jaringan Syaraf Tiruan .....	14
2.8 ANFIS .....	16
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>19</b>
3.1 Diagram Alir .....	19
3.2 Diagram Blok Sistem Pengendalian <i>Solar Tracking</i> .....	23
3.2.1 Diagram Blok Sistem Penjejak Matahari Satu Sumbu.....	24
3.2.2 Diagram Blok Sistem Penjejak Matahari Dua Sumbu.....	19

3.3 Pengambilan Data.....	24
3.3.1 Pengambilan Data Motor DC .....	24
3.3.2 Pengambilan Data Sensor LDR.....	25
3.4 Penentuan Spesifikasi Sistem.....	27
3.5 Pemodelan Sistem .....	27
3.5.1 Pemodelan Sensor LDR .....	28
3.5.2 Pemodelan Motor DC.....	28
3.5.3 Pemodelan <i>Photovoltaic</i> .....	29
3.5.4 Pemodelan Sistem Penjejak Matahari .....	30
3.6 Perancangan Kontrol ANFIS.....	32
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>39</b>
4.1 Uji Unjuk Kerja Kontrol.....	39
4.1.1 Uji <i>Setpoint</i> .....	39
4.1.2 Uji <i>Tracking</i> .....	44
4.2 Uji Unjuk Kerja <i>Photovoltaic</i> .....	46
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>53</b>
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran .....	53

**DAFTAR PUSTAKA**  
**LAMPIRAN**

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar</b>	<b>2.1</b>	Struktur mekanik dari sistem penjejak matahari	5
<b>Gambar</b>	<b>2.2</b>	Sistem penjejak matahari satu sumbu	6
<b>Gambar</b>	<b>2.3</b>	<i>Two axis equatorial sun tracking system</i>	7
<b>Gambar</b>	<b>2.4</b>	<i>Two axis azimuth sun tracking system</i>	7
<b>Gambar</b>	<b>2.5</b>	Pembagi tegangan dan LDR	9
<b>Gambar</b>	<b>2.6</b>	Modul <i>photovoltaic</i>	10
<b>Gambar</b>	<b>2.7</b>	Motor DC	11
<b>Gambar</b>	<b>2.8</b>	Sistematika <i>fuzzy logic controller</i>	13
<b>Gambar</b>	<b>2.9</b>	Struktur neuron jaringan syaraf tiruan	14
<b>Gambar</b>	<b>2.10</b>	Arsitektur ANFIS	16
<b>Gambar</b>	<b>3.1</b>	Diagram alir penelitian	19
<b>Gambar</b>	<b>3.2</b>	Diagram alir perancangan ANFIS	22
<b>Gambar</b>	<b>3.3</b>	Diagram blok sistem penjejak matahari satu sumbu	23
<b>Gambar</b>	<b>3.4</b>	Diagram blok sistem penjejak matahari dua Sumbu	24
<b>Gambar</b>	<b>3.5</b>	Grafik tegangan dari <i>voltage divider</i> dengan intensitas cahaya	26
<b>Gambar</b>	<b>3.6</b>	Grafik resistansi dari <i>voltage divider</i> dengan intensitas cahaya	26
<b>Gambar</b>	<b>3.7</b>	Model sensor LDR	28
<b>Gambar</b>	<b>3.8</b>	Model motor DC	29
<b>Gambar</b>	<b>3.9</b>	<i>Model effective irradiance</i>	29
<b>Gambar</b>	<b>3.10</b>	Model <i>PV cell</i>	30
<b>Gambar</b>	<b>3.11</b>	Pemodelan sistem penjejak matahari	31
<b>Gambar</b>	<b>3.12</b>	<i>Membership function error</i> dan <i>delta error</i> pada sumbu <i>pitch</i> dan <i>yaw</i>	32
<b>Gambar</b>	<b>3.13</b>	<i>Membership function</i> dari <i>error</i> pada sumbu <i>pitch</i>	33
<b>Gambar</b>	<b>3.14</b>	<i>Membership function</i> dari <i>delta error</i> pada sumbu <i>pitch</i>	33
<b>Gambar</b>	<b>3.15</b>	<i>Membership function</i> dari <i>error</i> pada sumbu <i>yaw</i>	33

<b>Gambar</b>	<b>3.16</b>	<i>Membership function</i> dari <i>delta error</i> pada sumbu <i>yaw</i>	34
<b>Gambar</b>	<b>3.17</b>	<i>Membership function</i> dari <i>output</i> pada sumbu <i>yaw</i>	34
<b>Gambar</b>	<b>3.18</b>	<i>Membership function</i> dari <i>output</i> pada sumbu <i>pitch</i>	35
<b>Gambar</b>	<b>3.19</b>	Model kontrol ANFIS untuk motor DC pada sudut <i>pitch</i>	36
<b>Gambar</b>	<b>3.20</b>	Model kontrol ANFIS untuk motor DC pada sudut <i>yaw</i>	37
<b>Gambar</b>	<b>4.1</b>	Respon sudut <i>pitch</i> dengan <i>setpoint</i> $30^0$	39
<b>Gambar</b>	<b>4.2</b>	Respon sudut <i>pitch</i> dengan <i>setpoint</i> $45^0$	40
<b>Gambar</b>	<b>4.3</b>	Respon sudut <i>pitch</i> dengan Setpoint $60^0$	41
<b>Gambar</b>	<b>4.4</b>	Respon sudut <i>yaw</i> dengan <i>setpoint</i> $60^0$	42
<b>Gambar</b>	<b>4.5</b>	Respon Sudut <i>yaw</i> dengan <i>setpoint</i> $120^0$	42
<b>Gambar</b>	<b>4.6</b>	Respon Sudut <i>yaw</i> dengan <i>setpoint</i> $240^0$	43
<b>Gambar</b>	<b>4.7</b>	Uji <i>tracking</i> pada sudut <i>pitch</i>	44
<b>Gambar</b>	<b>4.8</b>	Uji <i>tracking</i> pada sudut <i>yaw</i>	45
<b>Gambar</b>	<b>4.9</b>	Profil daya <i>output PV</i> selama satu hari	47
<b>Gambar</b>	<b>4.10</b>	Profil daya <i>output PV</i> selama tiga hari	48
<b>Gambar</b>	<b>4.11</b>	Profil daya <i>output PV</i> selama lima hari	49
<b>Gambar</b>	<b>4.12</b>	Profil daya <i>output PV</i> selama tujuh hari	50

## **DAFTAR TABEL**

<b>Tabel</b>	<b>3.1</b>	Parameter-Parameter motor DC	25
<b>Tabel</b>	<b>3.2</b>	Parameter <i>photovoltaic</i>	27
<b>Tabel</b>	<b>4.1</b>	Indeks unjuk kerja pada sudut <i>pitch</i>	41
<b>Tabel</b>	<b>4.2</b>	Indeks unjuk kerja pada sudut <i>yaw</i>	44
<b>Tabel</b>	<b>4.3</b>	Perbandingan efisiensi daya	51

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi matahari merupakan salah satu energi terbarukan yang mendapatkan perhatian lebih dari hari ke hari di banyak negara [1]. Menurut undang-undang no. 30 tahun 2007 pasal 29 ayat 2 tentang energi bahwa pengembangan energi diarahkan untuk pengembangan energi terbarukan [2]. Menurut data dari IRENA (*The International Renewable Energy Agency*) pada tahun 2015 distribusi instalasi *solar photovoltaic* di Indonesia hanya sebesar 0,1 % saja dari keseluruhan teknologi energi terbarukan yang terinstalasi, di dunia sendiri terinstalasi sebesar 11,2 % dari teknologi keseluruhan energi terbarukan yang terinstalasi, padahal Indonesia merupakan negara yang berada di jalur khatulistiwa yang selalu tersinari matahari sepanjang tahun. Selain itu juga dalam rentang tahun 2010-2015 terjadi penurunan harga *photovoltaic* sebesar 75%-80%. [3].

Panel *photovoltaic* membutuhkan posisi yang tepat untuk mendapatkan hasil energi yang maksimum [4-6]. Penjejak matahari sendiri dapat diimplementasikan dengan menggunakan tipe penjejak matahari yang satu sumbu, apabila menginginkan akurasi yang lebih tinggi dapat memakai dua sumbu, untuk yang dua sumbu sendiri ada dua macam yaitu: *polar tracking* dan *azimuth tracking* [7]. Penjejak matahari tidak perlu selalu tepat menunjuk kearah matahari, bila meleset 10% pun, keluaran yang dihasilkan masih 98,5 % dari yang dihasilkan oleh penjejak matahari yang selalu menunjuk kearah matahari. Pada wilayah yang berawan, *gain* yang didapat sekitar 20 % setiap tahunnya, sedangkan pada wilayah yang cerah bisa mencapai 30-40% setiap tahunnya [8]. ANFIS merupakan singkatan dari *adaptive neuro-fuzzy interface system*, yang merupakan metode dengan menggabungkan jaringan syaraf tiruan dan sistem *fuzzy*. Sejumlah data akan dilatih terlebih dahulu yang kemudian diimplikasikan ke sistem *fuzzy* [9].

Pada penelitian sebelumnya penggunaan sistem penjejak matahari di wilayah tropis. Pada penelitian yang dilakukan pada tahun 2015 menunjukkan bahwa sistem penjejak matahari dengan satu sumbu apabila digunakan di wilayah tropis menghasilkan konversi daya yang lebih besar sekitar 25 % dibandingkan panel yang tetap [10]. Sedangkan pada penelitian tahun 2012 di Malaysia, menunjukkan rasio dari unjuk kerja sebesar 59,40 % untuk *photovoltaic* jenis P-Si dengan menggunakan sistem penjejak matahari dengan satu sumbu [11]. Oleh karena itu, perlu dilakukan perbandingan unjuk kerja dengan dua metode penjejak matahari dengan menggunakan satu sumbu dan dua sumbu dengan menggunakan kontrol ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) di wilayah tropis, agar bisa menunjukkan perbedaan unjuk kerja yang dihasilkan oleh sistem penjejak matahari dengan satu sumbu dan dua sumbu.

Penelitian akan dilakukan dengan cara mensimulasikan sistem penjejak matahari satu sumbu dan dua sumbu dengan kontrol ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference*) dengan mode penjejak matahari aktif. Pada sistem penjejak matahari satu sumbu digunakan dua buah LDR, masing-masing pada bagian timur dan barat. Pada sistem penjejak matahari dua sumbu digunakan empat buah LDR, masing-masing pada bagian utara, selatan, timur dan barat. Berdasarkan uraian diatas maka pada tugas akhir ini akan dirancang dan direalisakan “Analisis Unjuk Kerja Sistem Penjejak Matahari Satu Sumbu Dan Dua Sumbu Dengan Kontrol ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*)”.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, permasalahan yang akan dibahas pada penelitian Tugas Akhir ini adalah :

1. Bagaimana mendapatkan indeks performansi kontrol ANFIS yang diimplementasikan pada sistem penjejak matahari satu sumbu dan dua sumbu ?
2. Berapa peningkatan efisiensi yang dicapai oleh penjejak matahari bila dibandingkan dengan yang *fixed* ?

### 1.3 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan penyelesaian masalah pada penelitian ini maka batasan masalah yang diangkat adalah sebagai berikut :

1. Data radiasi, suhu, sudut *altitude* dan sudut *azimuth* yang digunakan berlaku di Surabaya, Jawa Timur, Indonesia.
2. Kontrol yang digunakan dalam sistem penjejak matahari adalah ANFIS.
3. Sistem penjejak matahari yang dipakai adalah satu sumbu, dua sumbu dengan *polar tracking* dan dua sumbu dengan *azimuth tracking*.
4. *Photovoltaic* yang digunakan adalah model TN-20 M
5. Tidak membahas mengenai konsumsi daya sistem elektrik.
6. Tidak membahas sistem penyimpanan listrik.
7. Mode penjejak matahari yang digunakan adalah aktif.
8. Variabel yang digunakan adalah *pitch* untuk yang satu sumbu dan *pitch* dan *yaw* untuk yang dua sumbu.
9. Penjejak matahari berada pada posisi yang tetap.

### 1.4 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan penelitian disusun berdasarkan rumusan masalah yang diambil. Berikut beberapa tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian Tugas Akhir ini adalah :

1. Mendapatkan indeks performansi kontrol ANFIS yang diimplementasikan pada sistem penjejak matahari satu sumbu dan dua sumbu.
2. Peningkatan efisiensi yang dicapai oleh penjejak matahari bila dibandingkan dengan yang *fixed*.

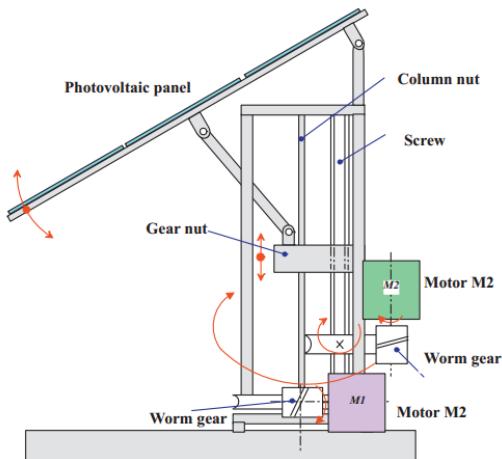
“Halaman ini memang dikosongkan”

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Sistem Penjejak Matahari

Sistem penjejak matahari merupakan suatu sistem yang bekerja mendeteksi posisi matahahari dengan menggunakan sensor cahaya dan mengontrol *photovoltaic* agar selalu tegak lurus terhadap matahari dengan mengubah sumbu *pitch* dan *yaw* dari suatu penjejak matahari. Tujuan dari sistem penjejak matahari sendiri agar *photovoltaic* selalu tegak lurus terhadap matahari, hal tersebut dapat mengoptimalkan daya keluaran dari *photovoltaic* itu sendiri. Daya keluaran dari *photovoltaic* itu sendiri jika semakin besar tentunya akan semakin besar jumlah energi yang dihasilkan dibandingkan dengan *photovoltaic* yang tidak selalu tegak lurus dengan matahari. Penjejak matahari sendiri terdiri dari beberapa komponen sensor, *controller*, motor DC, *battery* dan *photovoltaic*.[12]



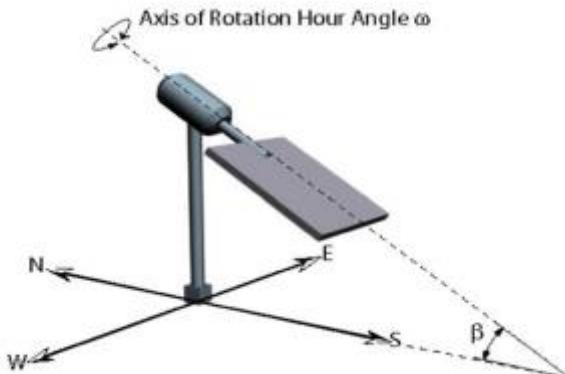
**Gambar 2.1** Struktur mekanik dari sistem penjejak matahari  
[20]

## 2.2 Tipe-tipe Penjejak Matahari

Terdapat tiga jenis penjejak matahari yang dipakai yaitu: penjejak matahari satu sumbu, penjejak matahari dua sumbu dengan *polar tracking* dan penjejak matahari dua sumbu dengan *azimuth tracking*.[7,13]

### a. Penjejak Satu Sumbu

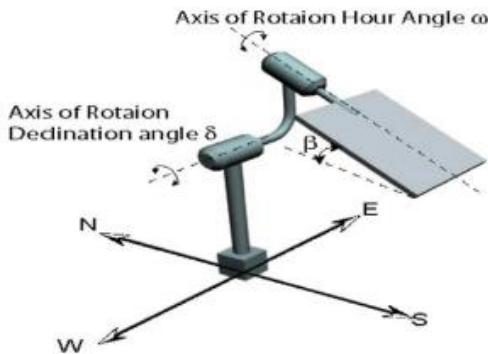
Sudut penjejak  $\rho$  adalah ukuran dari rotasi sumbu penjejak dan ketika penjejak satu sumbu bergerak horizontal dengan sudut *latitude* mengarah ke selatan, sehingga sumbu penjejak menjadi sejajar dengan rotasi bumi.



**Gambar 2.2** Sistem penjejak matahari satu sumbu [13]

### b. *Equatorial Tracking*

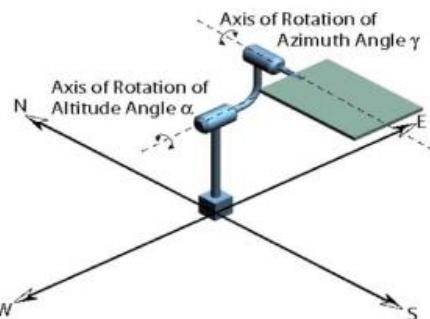
Satu sumbu dimiringkan dengan *latitude angle* tergantung dengan lokasi masing-masing. Sudut *tracking*  $\rho_1$  pada sumbu ini akan beputar sejajar dengan *hour angle*  $\omega$  ( $\rho_1 = \omega$ ), Sedangkan sudut *tracking*  $\rho_2$  yang dimana tegak lurus dengan *hour angle*  $\omega$  akan beputar sejajar dengan *declination angle*  $\delta$  ( $\rho_2 = \delta$ ).



**Gambar 2.3** Two axis equatorial sun tracking system [13]

### c. Azimuth Tracking

Satu sumbu berputar dengan sudut yang sejajar dengan *zenith angle* dengan sudut *tracking*  $\rho_1$  sama dengan *azimuth angle*  $\gamma$  ( $\rho_1 = \gamma$ ). Sumbu yang lainnya sejajar dengan permukaan bumi dengan sudut *tracking*  $\rho_2$  yang berputar sama dengan *altitude angle*  $\alpha$  ( $\rho_2 = \alpha$ ).



**Gambar 2.4** Two axis azimuth sun tracking system [13]

Pada tiga jenis penjejak matahari yang telah disebutkan diatas, pada penelitian yang dilakukan menggunakan penjejak matahari dengan jenis *azimuth tracking*.

### 2.3 Sensor Cahaya (LDR)

LDR (*Light Dependent Resistor*) merupakan salah satu sensor cahaya yang hambatan dari sensor itu sendiri berubah bergantung pada intensitas cahaya yang masuk. LDR digunakan untuk mengubah energi cahaya menjadi energi listrik. Secara umum LDR bekerja berdasarkan pengaruh dari intensitas cahaya yang datang pada bagian sensor. Besarnya intensitas cahaya akan mempengaruhi besarnya nilai resistansi pada LDR. Pada saat cahaya pada permukaan LDR redup, resistansi LDR rendah. Sedangkan pada saat cahaya terang, nilai resistansinya semakin kecil. Pengaruh intensitas cahaya terhadap resistansi LDR ini bersifat menurun secara eksponensial.

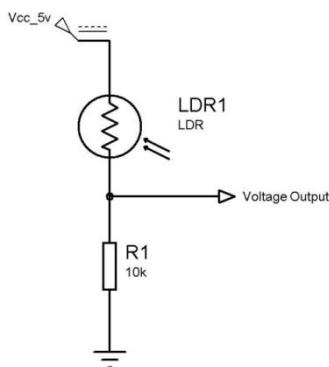
LDR merupakan sebuah sensor jenis semikonduktor yang dibuat dari *cadmium selenoide* dan timah sulfida. Sebuah *Light Dependent Resistor* (LDR) terdiri dari sebuah piringan bahan semikonduktor dengan dua buah elektroda pada permukaannya. LDR tergantung pada cahaya yang didapatkan oleh LDR itu sendiri, nilai hambatannya akan berubah-ubah tergantung dari intensitas cahaya yang didapatkan.

Dalam intensitas cahaya rendah, jumlah bahan piringan yang mengandung elektron bebas relatif kecil. Elektron bebas yang dapat mengalirkan muatan listrik juga sedikit sehingga bahan piringan ini tidak cukup baik sebagai konduktor. Dalam hal ini, berarti nilai hambatan pada LDR terbilang tinggi. Dalam intensitas cahaya tinggi, jumlah bahan piringan yang mengandung elektron bebas relatif banyak. Elektron bebas yang dapat mengalirkan muatan listrik juga banyak sehingga bahan piringan ini cukup baik

sebagai konduktor. Dalam hal ini, berarti nilai hambatan pada LDR terbilang rendah. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi intensitas cahaya yang mengenai bahan piringan maka semakin banyak elektron bebas yang tersedia dan semakin rendah pula hambatan pada LDR tersebut dan juga sebaliknya.[14-15]

Sebuah LDR dirangkai seri dengan satu resistor yang nilainya dapat diubah dan satu resistor yang nilainya tetap. Rangkaian seri ini berfungsi sebagai pembagi tegangan. Adapun persamaan pembagi tegangan adalah :

$$V_{out} = \frac{R2}{R1+R2} Vin \quad (2.1)$$



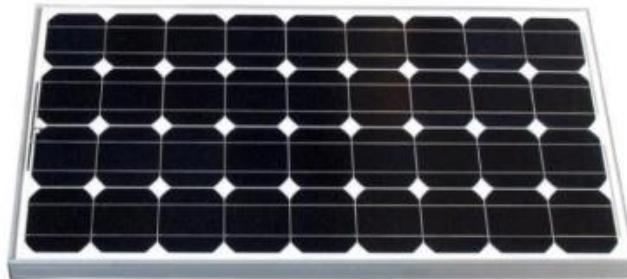
Gambar 2.5 Pembagi tegangan dan LDR [12]

## 2.4 Photovoltaic

*Photovoltaic* atau panel surya adalah sebuah devais yang terbuat dari material semikonduktor yang berfungsi mentransfer energi radiasi matahari menjadi energi listrik [19]. Efek fotolistrik dalam hal ini menyebabkan sel surya menyerap foton cahaya dan

melepaskan elektron. Ketika elektron bebas ditangkap, hasil arus listrik yang didapatkan dari elektron bebas tadi digunakan sebagai energi listrik.

Pada sel surya, bahan semikonduktor tipis dibuat agar membentuk medan listrik, dengan nilai positif dan negatif di masing-masing bahan sisi semikonduktor tersebut. Ketika energi cahaya mengenai sel surya, elektron akan lepas dari atom dalam bahan semikonduktor. Jika konduktor listrik yang melekat pada sisi positif dan negatif, membentuk sebuah rangkaian listrik, elektron dapat ditangkap dalam bentuk arus listrik. Sejumlah sel surya terhubung secara elektrik satu sama lain dan dipasang di struktur pendukung yang disebut dengan modul *photovoltaic*. Arus yang dihasilkan langsung bergantung pada seberapa banyak cahaya yang mengenai modul. Beberapa modul dapat dihubungkan bersama untuk membentuk sebuah *array*. Secara umum, semakin besar wilayah modul atau *array*, semakin banyak listrik yang akan dihasilkan. Modul *photovoltaic* dan array menghasilkan arus listrik searah (DC).

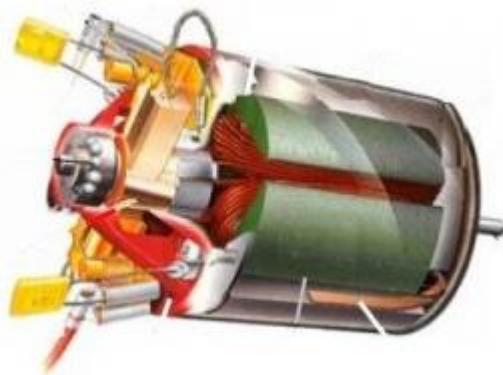


**Gambar 2.6** Modul *photovoltaic* [19]

## 2.5 Motor DC

Motor DC merupakan suatu komponen berupa motor listrik yang memerlukan *power supply* untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Kumparan medan pada motor DC terdapat dua macam, ada yang disebut dengan stator dan rotor. Motor DC mempunyai tiga komponen utama dalam pengoperasiannya, adapun komponen motor DC ini sebagai berikut :

- Kutub medan, kutub medan yang terdapat pada motor DC yang sederhana ada dua yaitu kutub utara dan kutub selatan.
- Dinamo, dinamo berputar dalam medan magnet yang terbentuk oleh kutub-kutub medan tadi dan dihubungkan dengan as penggerak untuk menggerakan beban yang dihubungkan ke motor DC.
- *Cummutator, commutator* untuk transmisi arus antara dinamo dan sumber daya.



**Gambar 2.7** Motor DC

Motor DC juga bisa digunakan sebagai penggerak panel PV dalam sebuah sistem penjejak matahari. Kelebihannya juga motor DC ini kecepatan berputarnya bisa diatur sehingga panel PV bisa

mengikuti matahari secara tepat. Pemodelan dari motor DC, yang mengubah nilai tegangan menjadi kecepatan rpm adalah sebagai berikut :[18]

$$V_a(t) = R_a \cdot I_a(t) + L_a \cdot \frac{dI_a(t)}{dt} + K_b \cdot \omega(t) \quad (2.2)$$

$$K_t \cdot I_a(t) = J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + B_m \cdot \omega(t) \quad (2.3)$$

Persamaan (2) dan (3) merupakan persamaan tegangan dan arus pada motor DC, kemudian agar bisa dimodelkan persamaan (2) dan (3) ditransformasi *laplace* terlebih dahulu.

$$V_a(s) = R_a \cdot I_a(s) + L_a \cdot I_a(s)s + K_b \cdot \omega(s) \quad (2.4)$$

$$K_t \cdot I_a(s) = J_m \cdot \omega(s)s + B_m \cdot \omega(s) \quad (2.5)$$

Setelah itu, substitusi persamaan (4) dan (5) menjadi :

$$V_a(s) = \omega(s) \cdot \frac{1}{K_t} \cdot [L_a \cdot J_m \cdot s^2 + (R_a \cdot J_m + L_a \cdot B_m)s + (R_a \cdot B_m + K_b \cdot K_t)] \quad (2.6)$$

Dengan hubungan nilai antara sudut dan kecepatan adalah  $\theta(s) = \frac{1}{s} \omega(s)$ , maka persamaan hubungan antara tegangan dan sudut adalah sebagai berikut :

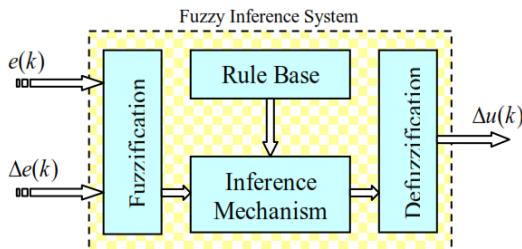
$$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{[L_a \cdot J_m \cdot s^3 + (R_a \cdot J_m + L_a \cdot B_m)s^2 + (R_a \cdot B_m + K_b \cdot K_t)s]} \quad (2.7)$$

Dimana :

- $V_a$  = Tegangan Armatur (V)
- $R_a$  = Resistansi Armarur (R)
- $L_a$  = Induktansi Armatur (H)
- $I_a$  = Arus Armatur (A)
- $\omega$  = Kecepatan Angular (rad/s)
- $\theta$  = Posisi *Angular Shaft Rotor* (rad)
- $J_m$  = Inersia Motor (Nm.s<sup>2</sup>)
- $B_m$  = *Viscous Friction Coefficient* (Nm.sec/rad)
- $K_t$  = Konstanta Torsi (Nm/A)
- $K_b$  = *Back EMF Constant* (Vs/rad)

## 2.6 Fuzzy Logic Controller

Logika *fuzzy* merupakan sebuah logika yang memiliki nilai kecaburan atau kesamaran (*fuzzyness*) antara benar dan salah. Dalam teori logika *fuzzy* sebuah nilai bisa bernilai benar dan salah secara bersamaan namun berapa besar kebenaran dan kesalahan suatu nilai tergantung kepada bobot/derajat keanggotaan yang dimilikinya. Logika *fuzzy* juga merupakan suatu proses yang bertujuan untuk pengambilan keputusan dimana terdapat banyak ketidakjelasan sehingga dibutuhkan logika *fuzzy* ini. Pada dasarnya struktur logika *fuzzy* dapat digambarkan seperti berikut :



**Gambar 2.8** Sistematika fuzzy logic controller [17]

Fungsi dari bagian-bagian diatas adalah sebagai berikut :

*Fuzzifikasi* berfungsi untuk mengubah sinyal *input* yang bersifat *crisp* (bilangan *real*) ke himpunan *fuzzy* dengan menggunakan operator fuzzifikasi.

*Rule Base* berisi basis data dan aturan dasar yang mendefinisikan himpunan *fuzzy* atas daerah-daerah *input* dan output dan menyusunnya dalam perangkat aturan kontrol.

Logika pengambilan keputusan merupakan inti dari logika *fuzzy* yang mempunyai kemampuan seperti manusia dalam mengambil keputusan. Keputusan disimpulkan dengan menggunakan implikasi *fuzzy* dan mekanisme inferensi *fuzzy*.

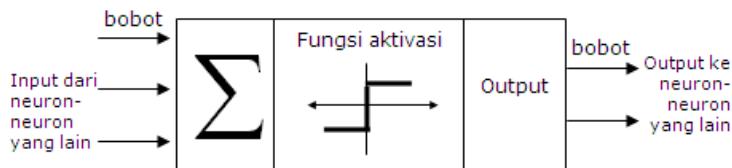
*Defuzzifikasi* berfungsi untuk mengubah kembali sinyal yang bersifat *fuzzy* menjadi sinyal sebenarnya yang bersifat *crisp* dengan menggunakan operator fuzzifikasi.

## 2.7 Jaringan Syaraf Tiruan

Jaringan syaraf tiruan (JST) atau *artificial neural network* (ANN) merupakan suatu sistem pemrosesan informasi yang mempunyai karakteristik menyerupai jaringan syaraf manusia. Terbentuknya jaringan syaraf tiruan ini berasal dari pengamatan terhadap neuron biologis. Cara kerja dan komponen yang digunakan untuk membuat sistem ini adalah dengan mencontoh cara kerja neuron biologis. Neuron terdiri dari soma sebagai pengolah informasi, dendrit sebagai penerima informasi dan akson sebagai pengirim informasi. *Dendrit* dan akson akan terhubung dengan neuron-neuron lain [21].

Pada jaringan syaraf tiruan, komponen soma bertindak sebagai neuron untuk mengolah data, akson sebagai output data sedang dendrit sebagai penerima data. Dengan mengatahui fungsi dari masing-masing komponen tersebut dapat memanfaatkan pola yang terjadi dimasa lampau untuk mengetahui dan mengingat pola yang akan terjadi di masa yang akan datang untuk mendapatkan hasil prediksi. Hal tersebut dapat dilakukan dengan melakukan pelatihan pola dengan data yang ada.

Pada umumnya jaringan syaraf tiruan mempunyai beberapa jenis dan hampir seluruhnya memiliki komponen-komponen yang sama. Jaringan syaraf terdiri dari beberapa neuron yang saling berhubungan. Neuron-neuron tersebut mentransformasikan informasi yang diterima melalui sambungan keluaran menuju neuron-neuron lain. Hubungan ini dikenal dengan istilah bobot. Berikut ini struktur dari jaringan syaraf tiruan secara umum.



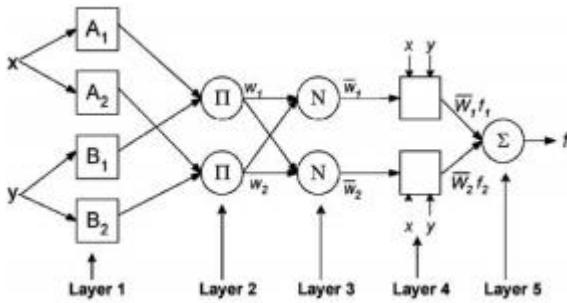
Gambar 2.9 Struktur neuron jaringan syaraf tiruan [17]

Informasi (disebut dengan *input*) akan dikirim ke neuron dengan bobot awal tertentu. *Input* ini akan diproses oleh suatu fungsi perambatan yang akan menjumlahkan nilai-nilai semua bobot yang datang. Hasil penjumlahan ini kemudian akan dibandingkan dengan suatu nilai ambang (*threshold*) tertentu melalui fungsi aktivasi setiap neuron. Apabila input tersebut melewati suatu nilai ambang tertentu, maka neuron tersebut akan diaktifkan, tetapi jika tidak maka neuron tersebut tidak akan diaktifkan. Apabila neuron tersebut diaktifkan, maka neuron tersebut akan mengirimkan *output* melalui bobot-bobot *outputnya* ke semua neuron yang berhubungan dengannya. Hal ini dilakukan secara terus menerus.

Pada jaringan syaraf, neuron-neuron akan dikumpulkan dalam lapisan-lapisan (*layer*) yang disebut dengan lapisan neuron (*neuron layers*). Biasanya neuron-neuron pada satu lapisan akan dihubungkan dengan lapisan-lapisan sebelum dan sesudahnya (kecuali lapisan *input* dan lapisan *output*). Informasi yang diberikan pada jaringan syaraf akan dirambatkan dari lapisan ke lapisan, mulai dari lapisan *input* sampai ke lapisan output melalui lapisan yang lainnya, yang sering dikenal dengan nama lapisan tersembunyi (*hidden layer*) [22].

## 2.8 ANFIS

ANFIS merupakan singkatan dari *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*. ANFIS sendiri bisa dibilang merupakan penggabungan dari metode jaringan syaraf tiruan dengan sistem *fuzzy*. Jaringan adaptif sendiri biasa dipakai dalam berbagai aplikasi pemodelan, pengambilan keputusan, kontrol dan pemrosesan sinyal, lalu kelas jaringan adaptif itu sendiri yang secara fungsional setara dengan sistem *fuzzy*. Arsitektur dari hal tersebut disebut ANFIS. Adapun lapisan dalam arsitektur ANFIS sebagai berikut : [9,13,16]



**Gambar 2.10** Arsitektur ANFIS

Lapisan 1. Lapisan ini terdapat *node adaptif* yang nilai parameternya dapat berubah dengan pembelajaran. Adapun fungsi *node* sebagai berikut:

$$O_i^1 = \mu_{Ai}(x) \quad (2.8)$$

Dimana \$x\$ adalah input untuk *node* \$i\$ dan \$Ai\$ adalah penamaan secara bahasa yang berhubungan dengan fungsi *node* untuk fungsi *Gaussian* (yang biasa digunakan), yang ditentukan sebagai:

$$\mu_{Ai}(x) = \exp\left[-0.5 \left(\frac{x-c_i}{\sigma_i}\right)^2\right] \quad (2.9)$$

Dimana \$\{\sigma\_i, c\_i\}\$ adalah parameter set. Parameter dalam lapisan ini ditunjukkan sebagai parameter premis.

Lapisan 2. Lapisan ini memiliki *node* nonadaptif yang nilai parameternya tetap. Fungsi dari simpul ini adalah sebagai perkalian setiap sinyal *input*. Fungsi *node*nya adalah sebagai berikut :

$$O_i^2 = w_i = \mu_{Ai}(x) \times \mu_{Bi}(x), \quad i = 1, 2 \quad (2.10)$$

Setiap *output node* dari lapisan ini merepresentasikan derajat pengaktifan untuk setiap *rule*.

Lapisan 3. Lapisan ini merupakan *node* nonadaptif yang dapat menampilkan fungsi derajat pengaktifan ternormalisasi (*normalized firing strength*) yaitu rasio keluaran node ke-*i* pada lapisan sebelumnya terhadap seluruh keluaran lapisan sebelumnya. Fungsi nodenya adalah sebagai berikut :

$$O_i^3 = \bar{w} = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2 \quad (2.11)$$

*Output* dari lapisan ini disebut derajat pengaktifan ternormalisasi (*normalized firing strength*)

Lapisan 4. Pada lapisan ini, semua nodenya adalah adaptif dengan derajat pengaktifan ternormalisasi dari lapisan 3. Fungsi nodenya adalah sebagai berikut:

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (a_i^1 x + a_i^2 y + a_i^0) \quad (2.12)$$

Lapisan 5. Lapisan ini hanya terdapat satu *node* nonadaptif dengan fungsi untuk menjumlahkan semua *input*. Fungsi nodenya adalah sebagai berikut:

$$O_i^5 = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (2.13)$$

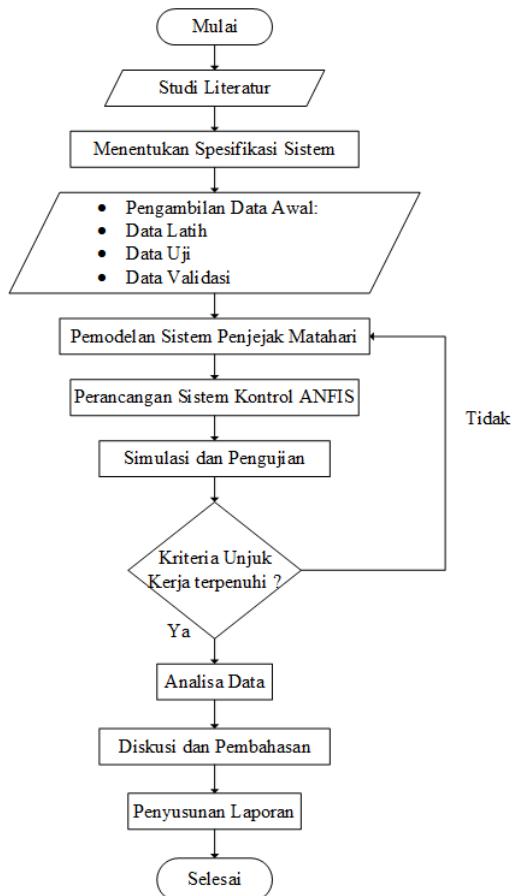
“Halaman ini memang dikosongkan”

### BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir

Dalam pelaksanaan penelitian tugas akhir ini, terdapat beberapa tahapan. Berikut merupakan diagram alir (tahapan) dari penelitian yang akan dilakukan.



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

Berikut merupakan penjelasan gambaran umum dari masing-masing tahapan yang ada dalam diagram alir pada Gambar 3.1.

#### a. Studi Literatur

Mempelajari teori-teori dasar yang berkaitan dengan lingkup pelaksanaan tugas akhir ini, sehingga diperoleh pengetahuan dasar untuk pengolahan data dan pemecahan masalah. Studi literatur ini juga dilakukan untuk menentukan komponen-komponen yang digunakan dan program yang akan dibuat. Pencarian dan jurnal-jurnal nasional maupun internasional mengenai sistem penjejak matahari dengan satu sumbu dan dua sumbu, implementasi ANFIS dalam sistem penjejak matahari dan unjuk kerja pada sistem penjejak matahari. Berikut adalah beberapa referensi utama mengenai permasalahan tugas akhir ini :

- (1) Mohanad Alata, M.A. Al-Nimr, Yousef Qaroush. “*Developing a multipurpose sun tracking system using fuzzy control*”. *Energy Conversion and Management* 46 (2005) 1229–1245.
- (2) Hossein Mousazadeh, Alireza Keyhani, Arzhang Javadi, Hossein Mobli, Karen Abrinia, Ahmad Sharifi. “*A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output*”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 1800–1818.
- (3) Y. Garcia, O. Diaz & C. Agudelo. “*Performance of a solar PV tracking system on tropic regions*”. *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, Vol 195 (2015).
- (4) Imam Abadi, Ali Musyafa’, Adi Soeprijanto. 2015. “*Design and Implementation of Active Two Axes Solar Tracking System Using Particle Swarm Optimization Based Fuzzy Logic Controller*”. *International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.)*, Vol. 8, N. 6.

### b. Menentukan Spesifikasi Sistem

Menentukan spesifikasi sistem dilakukan pada setiap komponen yang akan digunakan, Spesifikasi yang diperlukan adalah spesifikasi dari komponen yang digunakan, diantara lainnya sensor, kontrol, motor dan *photovoltaic*. Setelah spesifikasi komponen-komponen ditentukan, selanjutnya adalah menggabungkan satu sama lainnya komponen tersebut menjadi sebuah sistem.

### c. Pengambilan Data Awal

Pengambilan data awal ada tiga, yaitu:

- Data Latih
- Data Uji
- Data Validasi

Variabel yang digunakan dalam pengambilan data ini adalah nilai *error 1*, *error 2* dan *delta error*. Nilai tersebut bisa didapatkan dengan mencari pasangan nilai tegangan LDR timur-barat dan LDR utara-selatan untuk sistem penjejak matahari dua sumbu, sedangkan untuk sistem penjejak matahari satu sumbu menggunakan pasangan nilai tegangan LDR timur-barat.

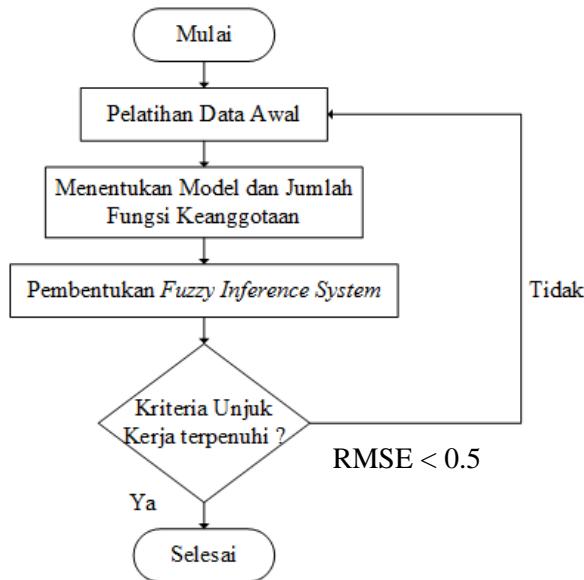
### d. Pemodelan Sistem Penjejak Matahari

Pada tahap ini dilakukan pemodelan penjejak matahari dengan memodelkan LDR, motor DC, *photovoltaic* dan *plant* dari sistem penjejak matahari itu sendiri, setelah masing-masing dari komponen itu telah dimodelkan kemudian dijalankan dengan memasukkan data yang didapat. Teknik pemodelan dilakukan dengan menggunakan *software MATLAB/Simulink*.

### e. Perancangan ANFIS

Perancangan ANFIS dilakukan dengan memberikan kontrol ANFIS pada sistem penjejak matahari agar motor memiliki kecepatan dan akurasi tinggi, selain itu agar motor

tidak terjadi osilasi saat mencapai *setpoint*. Adapun diagram alir dari perancangan ANFIS sebagai berikut:



**Gambar 3.2** Diagram alir perancangan ANFIS

#### f. Simulasi dan Pengujian

Simulasi dan pengujian dilakukan dengan melakukan simulasi pada sistem penjejak matahari yang telah diberikan kontrol ANFIS dengan metode penjejakkan satu sumbu dan dua sumbu, kemudian jika hasil dari simulasi telah mencapai kriteria unjuk kerja yaitu dengan hasil yang lebih baik dari penelitian sebelumnya [19] maka dilanjutkan ke analisa data, jika tidak kembali ke pemodelan sistem penjejak matahari.

#### g. Analisa Data

Pada analisa data ini berisikan tentang penguraian tentang mekanisme pengujian sistem dan hal-hal yang berpengaruh

terhadap kinerja sistem. Dalam hal ini, unjuk kerja dari masing-masing sistem penjejak matahari satu sumbu dan dua sumbu, kemudian dibandingkan mana yang lebih baik antara satu sumbu dan dua sumbu untuk wilayah tropis seperti Indonesia ini.

#### h. Diskusi, Pembahasan dan Penyusunan Laporan

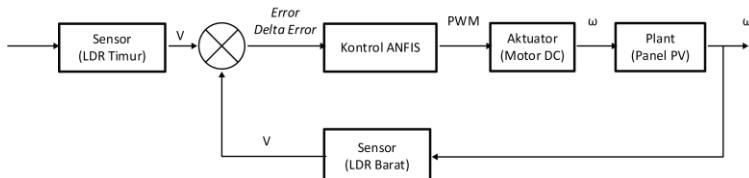
Diskusi dan pembahasan dilakukan dengan membahas analisa data yang telah dilakukan. Pada tahap ini akan dibahas mulai dari awal sampai akhir penelitian. Semua hal yang dilakukan selama penelitian akan tersusun secara sistematis dan rapi dalam bentuk buku laporan tugas akhir.

### 3.2 Diagram Blok Sistem Pengendalian Solar Tracking

Pada penelitian Tugas Akhir kali ini, digunakan dua jenis sistem penjejak matahari. Jenis sistem penjejak matahari yang pertama adalah sistem penjejak matahari dengan satu sumbu dan jenis yang kedua adalah sistem penjejak matahari dengan dua sumbu.

#### 3.2.1 Diagram Blok Sistem Penjejak Matahari Satu Sumbu

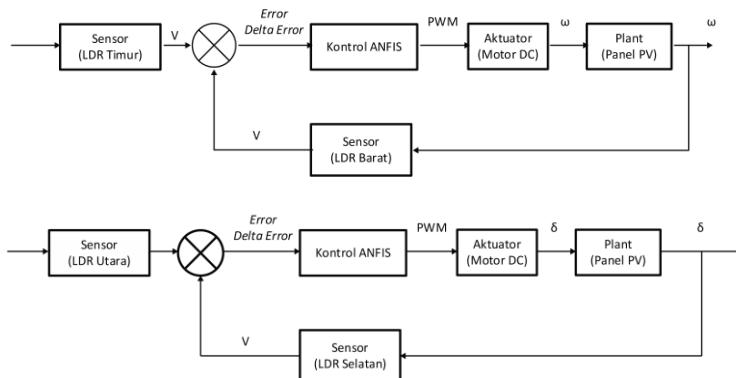
Sistem pengendalian dengan jenis sistem penjejak matahari dengan satu sumbu berarti system ini menggunakan dua LDR, LDR yang digunakan adalah LDR barat dan LDR timur. LDR Barat dan LDR timur digunakan untuk menggerakkan sudut *pitch* dari sistem penjejak matahari. Berikut merupakan diagram blok *mode aktif* berdasarkan sudut yang digerakkan.



**Gambar 3.3** Diagram blok sistem penjejak matahari satu sumbu

### 3.2.2 Diagram Blok Sistem Penjejak Matahari Dua Sumbu

Sistem pengendalian dengan jenis sistem penjejak matahari dengan satu sumbu berarti sistem ini menggunakan empat LDR, LDR yang digunakan adalah LDR utara, LDR selatan, LDR barat dan LDR timur. LDR barat dan LDR timur digunakan untuk menggerakkan sudut *pitch* dari sistem penjejak matahari sedangkan LDR utara dan LDR selatan digunakan untuk menggerakkan sudut *yaw* dari sistem penjejak matahari. Berikut merupakan diagram blok *mode aktif* berdasarkan sudut yang digerakkan.



**Gambar 3.4** Diagram blok sistem penjejak matahari dua sumbu

### 3.3 Pengambilan Data

Pada sistem penjejak matahari ini, parameter-parameter dari setiap komponen diperlukan agar dapat dimodelkan pada *software MATLAB/Simulink*.

#### 3.3.1 Pengambilan Data Motor DC

Pengambilan data motor DC dilakukan untuk mengetahui parameter-parameter dari motor DC itu sendiri dan parameter tersebut digunakan untuk memodelkan motor DC pada sistem penjejak matahari. Adapun parameter-parameter yang digunakan adalah konstanta tegangan ( $K_t$ ), konstanta torsi ( $K_t$ ), inersia motor

(Jm), *viscous friction coefficient* (Bm), resistansi motor (R) dan induktansi motor (L).

Pengambilan data motor DC dilakukan dengan cara memberikan tegangan pada motor DC dan kemudian diukur kecepatan (dalam rpm), arus dan akselerasi dari motor tersebut, dari data tersebut di dapatkan nilai Kt, Ke, Jm dan Bm. Nilai dari L dan R didapatkan dengan menghubungkan motor DC dengan LCR meter. Adapun parameter-parameter dari motor DC didapatkan dengan persamaan berikut :[17]

$$Ke = \frac{\text{tegangan [V]}}{\text{kecepatan} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]} \quad (3.1)$$

$$Kt = \frac{Ke}{0,11827} \left[\frac{\text{Nm}}{\text{A}}\right] \quad (3.2)$$

$$Jm \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) = Tm(t) \quad (3.3)$$

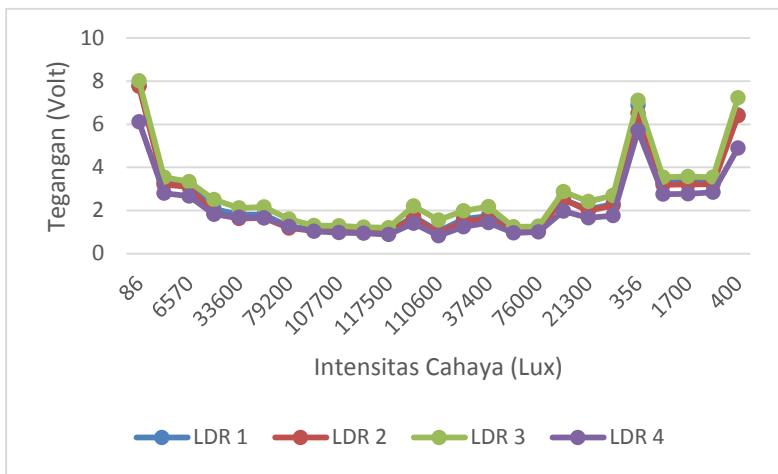
Motor DC ini telah terhubung dengan *gearbox* dengan rasio 1:348,0792. Setelah dilakukan pengambilan data motor DC dan melakukan perhitungan parameter motor DC menurut persamaan (14) sampai (16), maka didapatkan nilai-nilai parameternya sebagai berikut :

**Tabel 3.1** Parameter-parameter motor DC

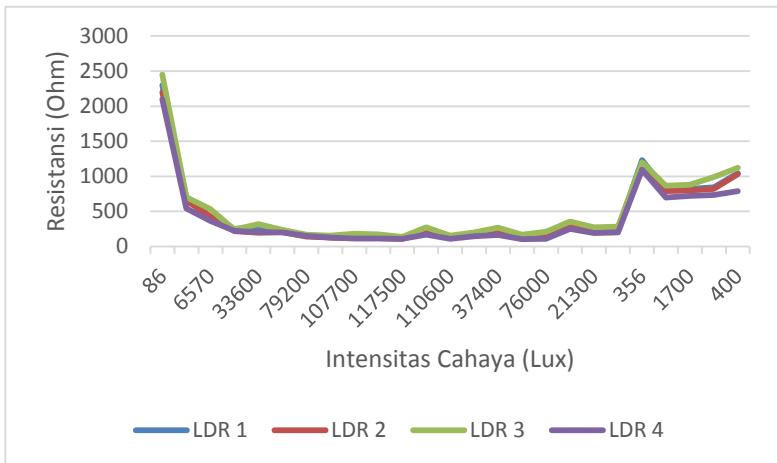
Parameter Motor	Nilai Parameter Motor
Ke	12,84369 Volt.sec/rad
Kt	12,84437 Nm/A
R	22,4245 Ω
L	0,006386 Henry
Jm	0,723779 Nm.s <sup>2</sup>
Bm	3,434949 Nm.sec/rad

### 3.3.2 Pengambilan Data Sensor LDR

Pengambilan data sensor LDR ini dilakukan untuk mengetahui linearitas antara intensitas cahaya yang diterima oleh



**Gambar 3.5** Grafik tegangan dari *voltage divider* dengan intensitas cahaya



**Gambar 3.6** Grafik resistansi dari *voltage divider* dengan intensitas cahaya

sensor LDR berbanding dengan resistansi yang dihasilkan oleh

sensor LDR dan tegangan yang dihasilkan oleh rangkaian *voltage divider*. Pengambilan data LDR ini dilakukan dengan cara mengukur tegangan dan resistansi dari rangkaian *voltage divider* serta intensitas cahaya ketika pengambilan data tersebut. Pengambilan data dimulai pada pukul 05.30 WIB sampai 17.30 WIB pada tanggal 25 maret 2017 [17]. Adapun grafik perbandingan dari tegangan dengan intensitas cahaya dan resistansi dengan intensitas cahaya ditunjukkan pada gambar 3.5 dan 3.6

### 3.4 Penentuan Spesifikasi Sistem

Penentuan spesifikasi sistem dilakukan untuk menetapkan parameter komponen yang akan dipakai untuk sistem penjejak matahari satu sumbu maupun dua sumbu, parameter tersebut bisa didapatkan dengan cara pengambilan data seperti pada subbab 3.3 maupun sudah tersedia dari *datasheet* komponennya. Adapun spesifikasinya sebagai berikut :

**Tabel 3.2** Parameter photovoltaic [19]

No	Parameter	Nilai Parameter
1	<i>Short Circuit Current, <math>I_{SC}</math></i>	1.25 A
2	<i>Open Circuit Current, <math>V_{OC}</math></i>	21.5 V
3	<i>Temperature Coefficient of <math>I_{SC}</math>, <math>\mu</math></i>	0.00005 A/ $^{\circ}$ C
4	<i>Temperature Coefficient of <math>V_{OC}</math>, <math>\Phi</math></i>	-0.0036 V/ $^{\circ}$ C
5	<i>Refrence Voltage, <math>V_n</math></i>	17,2 Volt
6	<i>Refrence Current, <math>I_n</math></i>	1,16 A
7	<i>Maximum Power at STC</i>	20 W
8	<i>PV Internal Resistance, <math>R_{PV}</math></i>	1.11 $\Omega$

### 3.5 Pemodelan Sistem

Pemodelan sistem penjejak matahari satu sumbu dan dua sumbu dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB/Simulink untuk melakukan simulasi, dengan menggunakan parameter-parameter komponen maka dilakukan untuk mendapatkan simulasi sistem penjejak matahari satu sumbu dan dua sumbu ini.

### 3.5.1 Pemodelan Sensor LDR

Sensor LDR adalah sensor yang mengubah energi cahaya menjadi listrik, hal itu didapat dari perubahan hambatan yang terdapat pada sensor LDR ketika terkena cahaya matahari. Pada *photovoltaic* yang dijadikan model, tegangan *output* resistor bernilai tetap  $1000\ \Omega$ . Persamaan hubungan antara *irradiance* dan hambatan pada sensor LDR itu sendiri sebagai berikut :

$$\log R = -\frac{3}{4} \log I + 5 \quad (3.4)$$

Dimana :

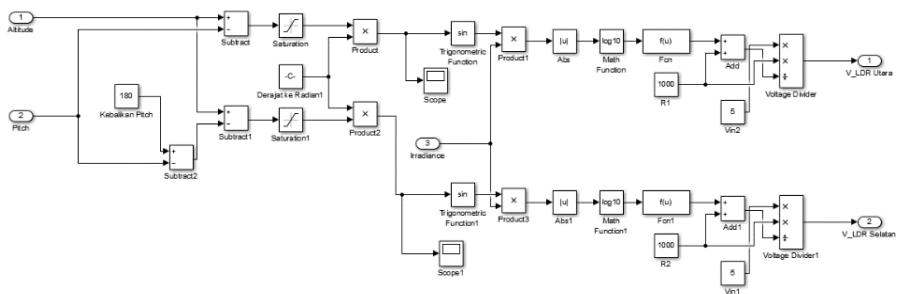
R = Hambatan pada sensor LDR ( $\Omega$ )

$I = Irradiance$  yang masuk ke sensor LDR ( $\text{W/m}^2$ )

Persamaan tegangan dari LDR didapatkan dengan menggunakan persamaan pembagi tegangan sebagai berikut :

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1+R_2} V_{in} \quad (3.5)$$

Pada persamaan tersebut  $R_2$  adalah *resistor* yang bernilai tetap  $1000\ \Omega$  sedangkan  $R_1$  adalah hambatan pada sensor LDR.

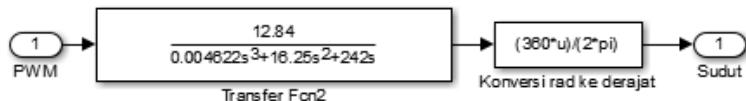


**Gambar 3.7 Model sensor LDR**

### 3.5.2 Pemodelan Motor DC

Motor DC merupakan penggerak dari panel PV agar terus mengikuti matahari. Sistem penjejak matahari satu sumbu

menggunakan satu motor dengan *tracking* sudut *pitch*, sedangkan sistem penjejak matahari dua sumbu menggunakan dua motor dengan *tracking* sudut *pitch* dan *yaw*. Sudut *pitch* bergerak diantara sudut  $0^\circ$  dan  $180^\circ$  dan sudut *yaw* bergerak diantara sudut  $0^\circ$  dan  $360^\circ$  pada kecepatan rendah. Pemodelan motor DC yang telah didapatkan pada bagian 3.2.1 dapat dimodelkan pada *software* MATLAB/Simulink sebagai berikut :



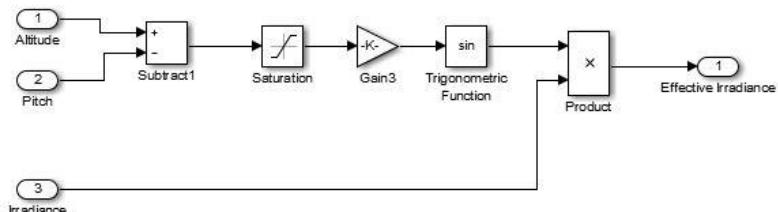
**Gambar 3.8** Model motor DC

### 3.5.3 Pemodelan *Photovoltaic*

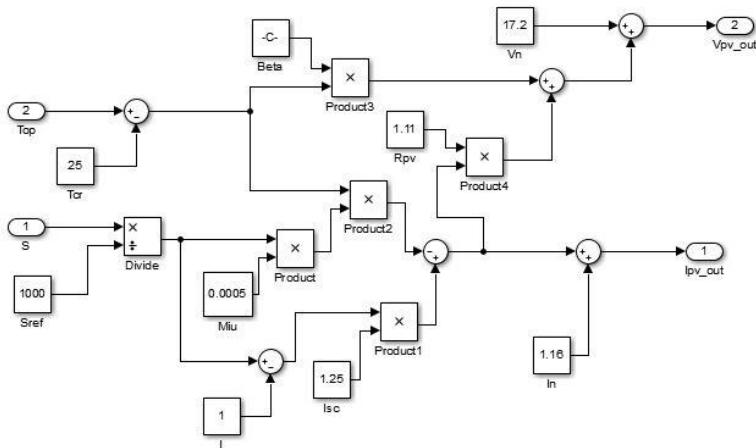
Pemodelan *photovoltaic* dilakukan dengan menggunakan parameter-parameter yang telah disebutkan pada bagian 3.4 dan persamaan keluaran arus dan tegangannya, adapun persamaannya sebagai berikut :[19]

$$I = \left[ \left( \frac{S}{S_{ref}} \right) (\mu(T - T_{ref}) + 1) - I_{sc} \right] + I_n \quad (3.6)$$

$$V = V_n - \Phi(T - T_{ref}) - R_{pv}(I - I_n) \quad (3.7)$$



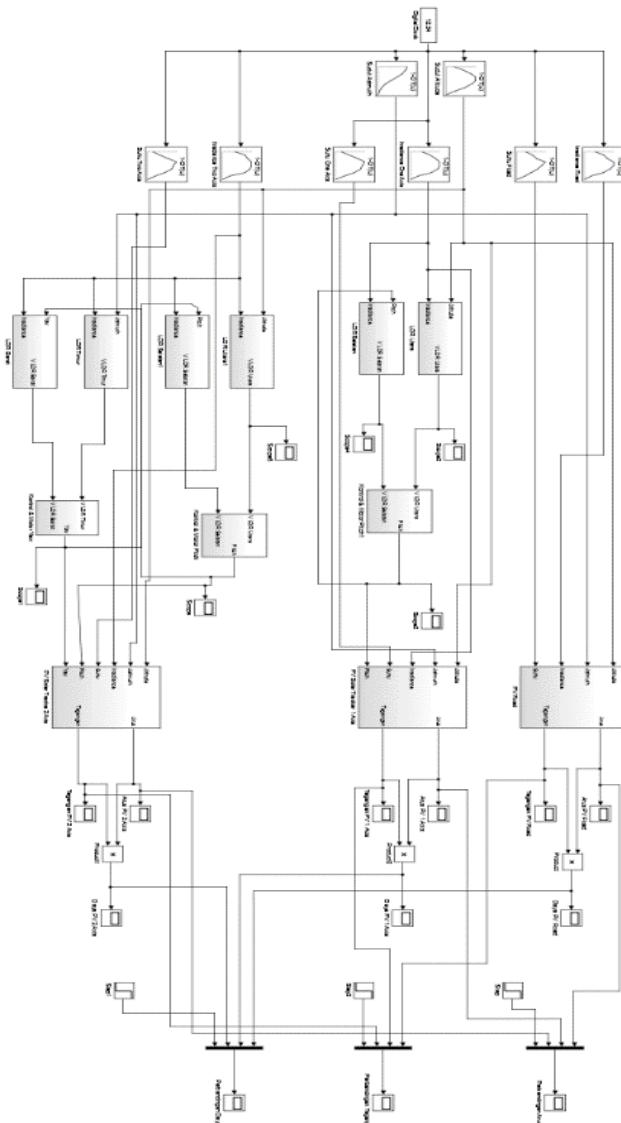
**Gambar 3.9** Model *effective irradiance*



**Gambar 3.10 Model PV cell**

### 3.5.4 Pemodelan Sistem Penjejak Matahari

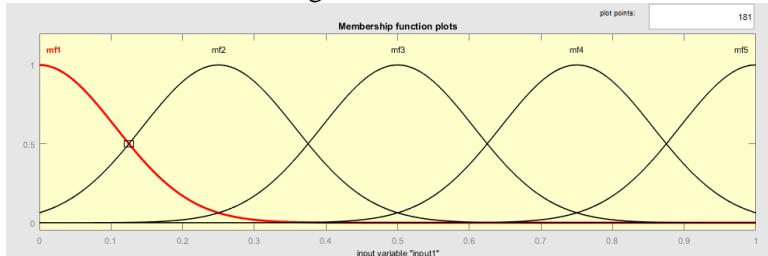
Pemodelan sistem penjejak matahari didapatkan dari pemodelan-pemodelan komponen-komponen yang terdapat pada sistem penjejak matahari dengan cara menggabungkan komponen-komponen yang ada menjadi satu kesatuan, adapun modelnya sebagai berikut :



**Gambar 3.11** Pemodelan sistem penjejak matahari

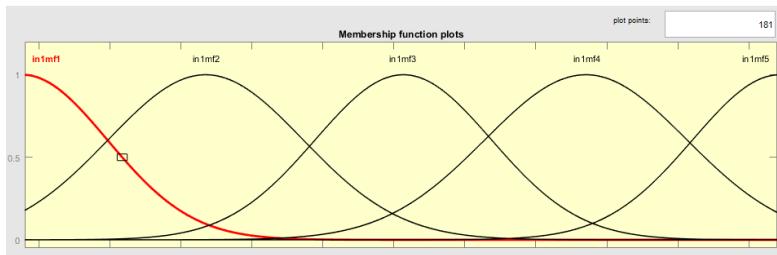
### 3.6 Perancangan Kontrol ANFIS

ANFIS merupakan penggabungan jaringan syaraf tiruan dan logika *fuzzy*. Jaringan syaraf tiruan yang nantinya akan menentukan *membership function* dan *rule base* dari logika fuzzynya. ANFIS sendiri membutuhkan pasangan data latih untuk dilatih pada jaringan syaraf tiruan. *Input* dari data latih ini adalah *error* dan *delta error* sedangkan *output* dari data latih ini adalah PWM. Data latih didapatkan dengan cara mensimulasikan *error* dan *delta error* pada *software* MATLAB/Simulink untuk mendapatkan nilai PWM dengan kontrol PID kemudian data-data tersebut diinterpolasi sehingga mendapatkan 719 pasangan data. Pada kontrol ANFIS ini menggunakan *membership function* dengan jenis *gauss* dan jumlah *membership function* sebanyak lima buah yang mewakili *Clockwise Fast* (CWF), *Clockwise Slow* (CWS), *Stop* (S), *Counter Clockwise Slow* (CCWS) dan *Counter Clockwise Fast* (CCWF). Adapun *membership function* dari *input* sebelum dilatih adalah sebagai berikut :

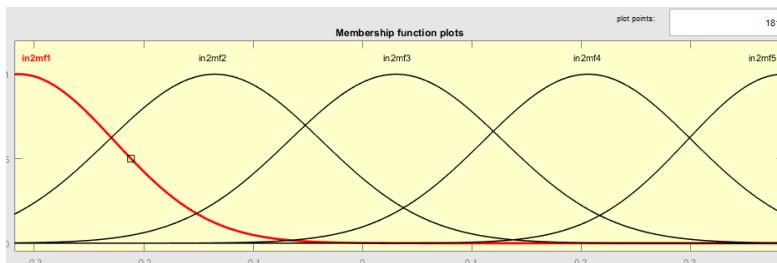


**Gambar 3.12** *Membership function error* dan *delta error* pada sumbu *pitch* dan *yaw*

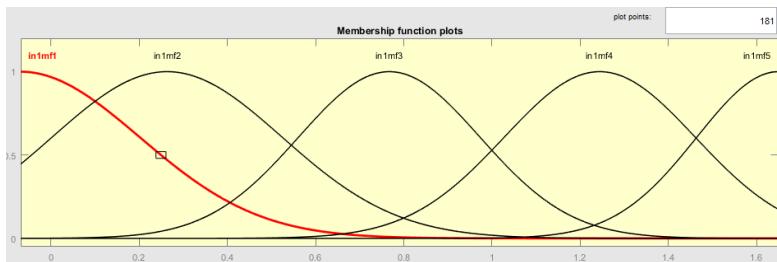
*Membership function* dari *input* dari masing-masing kontrol ANFIS untuk kontrol motor DC pada sumbu *pitch* dan *yaw* setelah dilatih sebagai berikut :



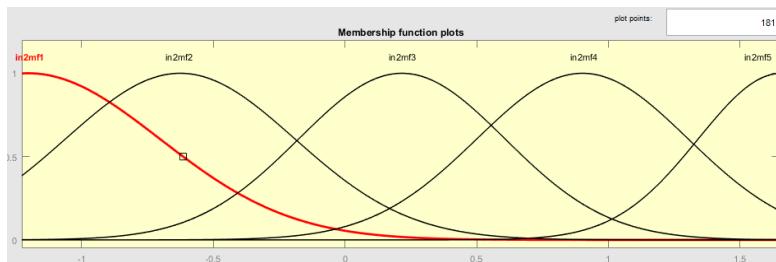
**Gambar 3.13** Membership function dari error pada sumbu pitch



**Gambar 3.14** Membership function dari delta error pada sumbu pitch

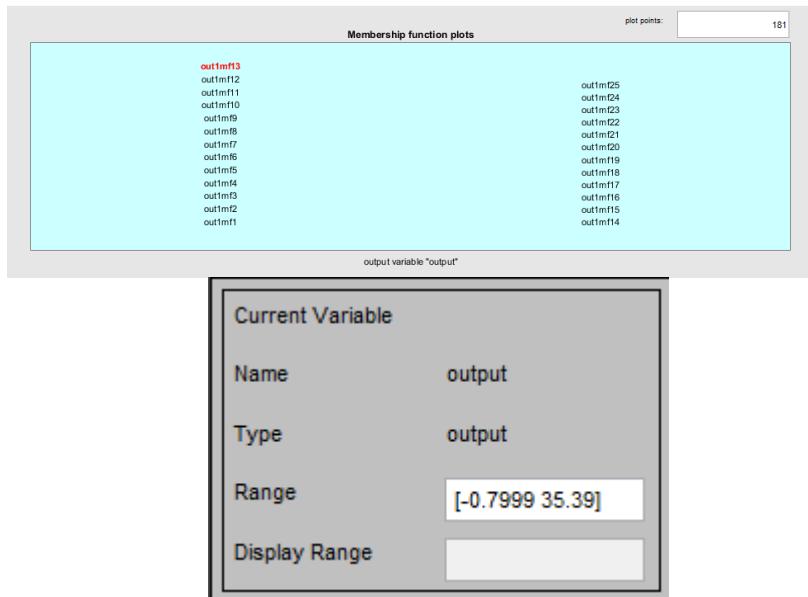


**Gambar 3.15** Membership function dari error pada sumbu yaw

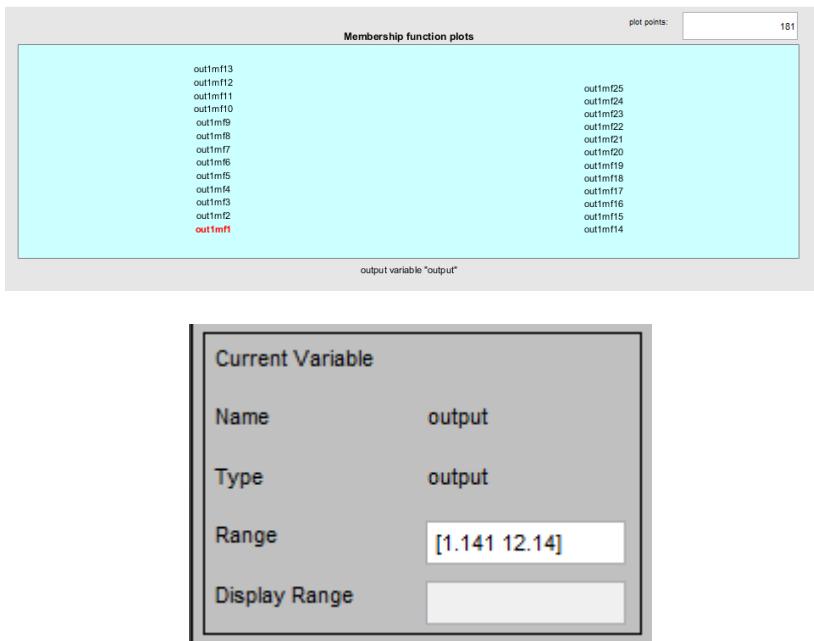


**Gambar 3.16** Membership function dari *delta error* pada sumbu *yaw*

Membership function dari *output* pada sumbu *pitch* dan *yaw* adalah sebagai berikut :



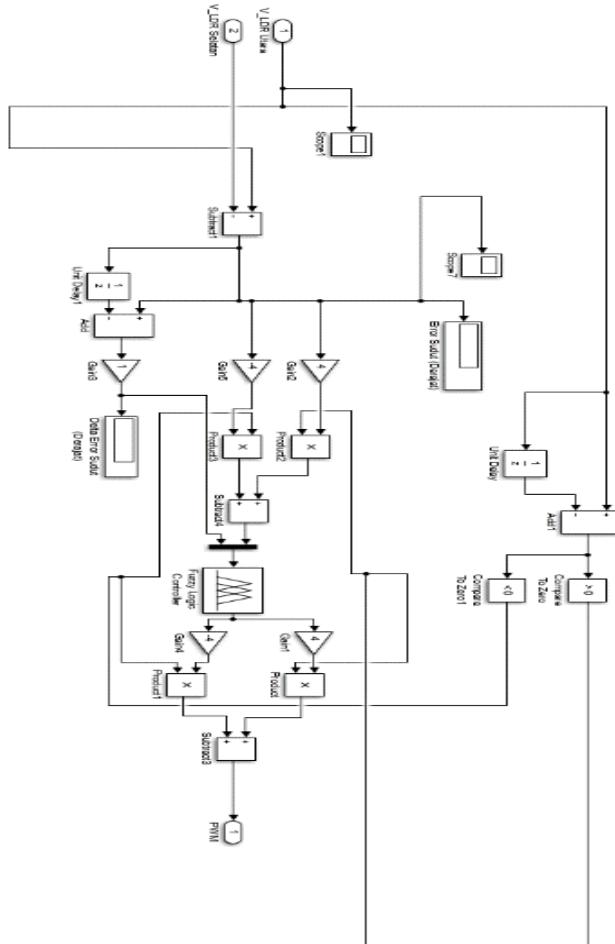
**Gambar 3.17** Membership function dari *output* pada sumbu *yaw*



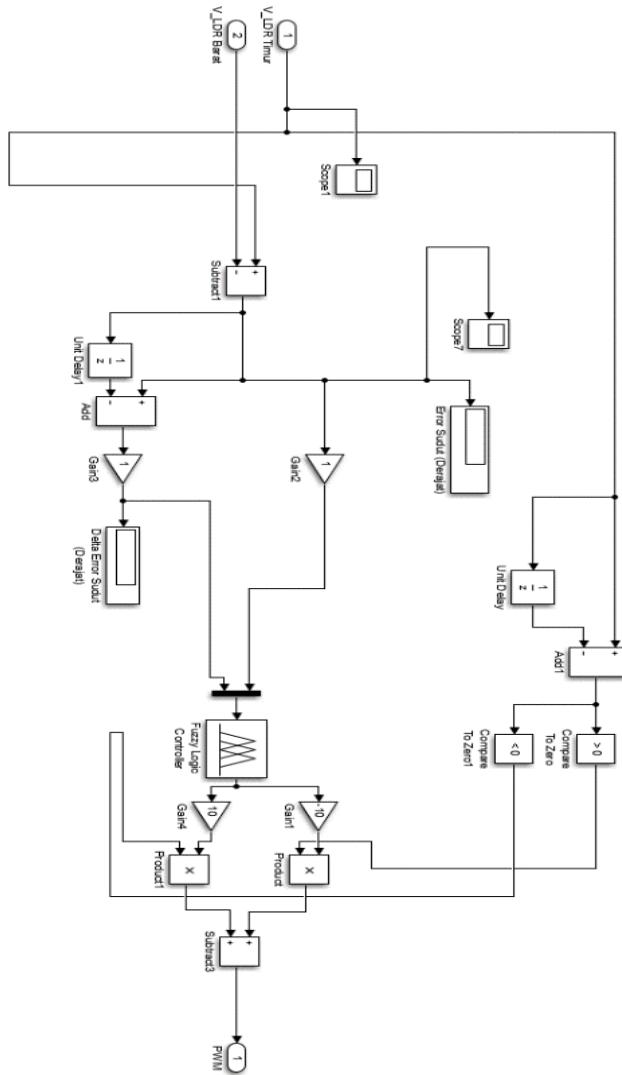
**Gambar 3.18** Membership function dari Output pada sumbu *pitch*

Acuan nilai RMSE dari pelatihan pada ANFIS ini adalah kurang dari 0.5. Pada sumbu *pitch* didapatkan nilai RMSE 0.22368 sedangkan pada sumbu *yaw* didapatkan nilai RMSE 0.31469. Nilai RMSE dari kedua sumbu sudah mencapai batas yang ditentukan.

Setelah itu, kontrol dapat dimodelkan dalam *software* MATLAB/Simulink sebagai berikut :



**Gambar 3.19** Model kontrol ANFIS untuk motor DC pada sudut *pitch*



**Gambar 3.20** Model kontrol ANFIS untuk motor DC pada sudut *yaw*

“Halaman ini memang dibiarkan kosong”

## BAB IV

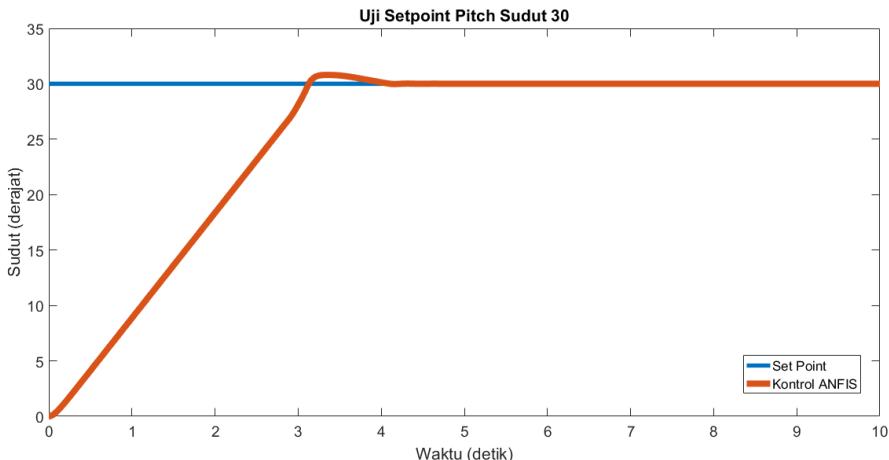
# HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada perancangan sistem panel surya terdapat beberapa variabel yang dikendalikan yaitu sudut *pitch* dan *yaw* motor serta keluaran tegangan pada LDR. Keluaran tegangan pada LDR dipantau karena tegangan keluaran LDR merepresentasikan sudut *altitude* dan *azimuth* matahari yang diterima oleh masing-masing LDR. Dalam tugas akhir kali ini, perancangan sistem penjejak matahari menggunakan ANFIS.

### 4.1 Uji Unjuk Kerja Kontrol

Uji unjuk kerja kontrol dilakukan untuk mengetahui respon kontrol ANFIS dalam sistem penjejak matahari dengan mendapatkan indeks unjuk kerjanya.

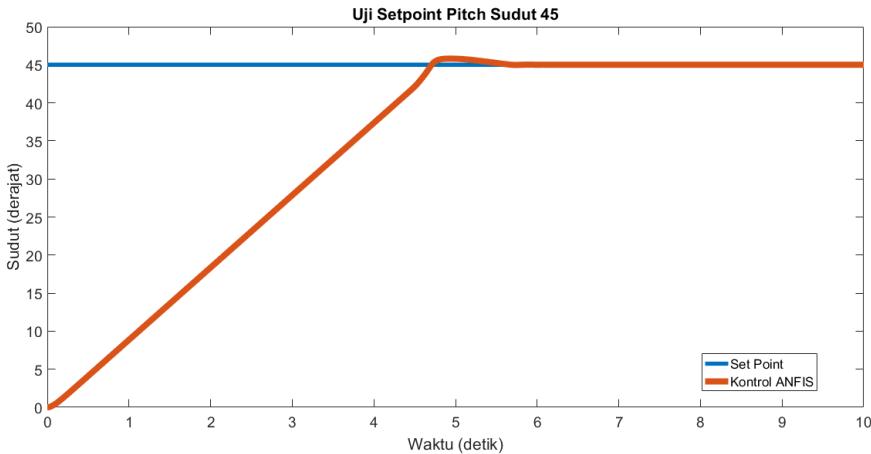
#### 4.1.1 Uji Setpoint



**Gambar 4.1** Respon sudut *pitch* dengan *setpoint*  $30^0$

Pada uji *setpoint*, menggunakan tiga *set point* sudut *altitude* matahari dan tiga *setpoint* sudut *azimuth* matahari. Untuk sudut *altitude* matahari menggunakan *setpoint* sudut  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  sedangkan untuk sudut *azimuth* matahari menggunakan *set point* sudut  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $240^\circ$ .

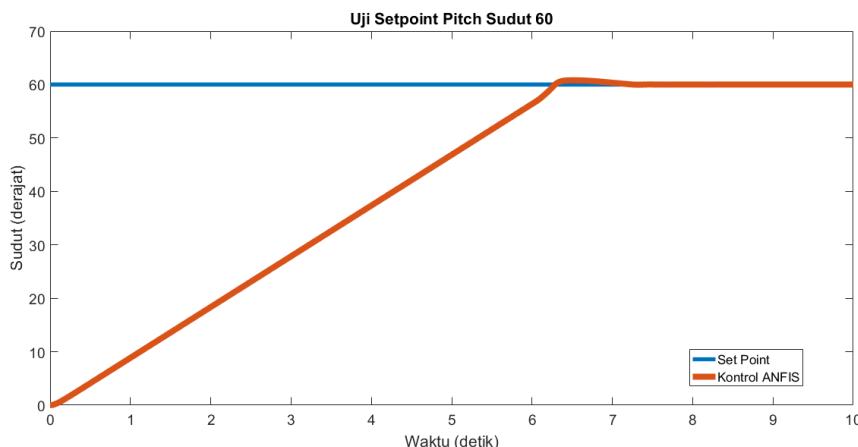
Berdasarkan gambar 4.1 hasil simulasi untuk respon sudut *pitch* dengan nilai *setpoint* sebesar  $30^\circ$  mempunyai *overshoot* senilai 2.667 % dan *rise time* 3.351 detik sedangkan *settling time* sebesar 4.638 detik dan ketika sudah dalam kondisi tunak mempunyai *error* dengan nilai konstan sebesar 0.025 %. Pada penelitian sebelumnya mempunyai *overshoot* yang lebih kecil dengan nilai 0 %, nilai *rise time* senilai 4 detik, *settling time* senilai 5 detik dan *error steady state* sebesar 0.641 % [19].



**Gambar 4.2** Respon sudut *pitch* dengan *setpoint*  $45^\circ$

Hasil simulasi untuk respon sudut *pitch* dengan nilai *setpoint* sebesar  $45^\circ$  mempunyai *overshoot* senilai 1.778 % dan *rise time* 4.923 detik sedangkan *settling time* sebesar 6.22 detik dan ketika sudah dalam kondisi tunak mempunyai *error* dengan nilai konstan sebesar 0.016 %. Pada penelitian sebelumnya mempunyai *overshoot* yang lebih kecil dengan nilai 0 %, nilai *rise time* senilai

4 detik, *settling time* senilai 5 detik dan *error steady state* sebesar 0.466 % [19].



**Gambar 4.3** Respon sudut *pitch* dengan *setpoint*  $60^0$

Hasil simulasi untuk respon sudut *pitch* dengan nilai *setpoint* sebesar  $60^0$  mempunyai *overshoot* senilai 1.333 % dan *rise time* 6.51 detik sedangkan *settling time* sebesar 7.793 detik dan ketika sudah dalam kondisi tunak mempunyai *error* dengan nilai konstan sebesar 0.012 %. Pada penelitian sebelumnya mempunyai *overshoot* yang lebih kecil dengan nilai 0 %, nilai *rise time* senilai 4 detik, *settling time* senilai 5 detik dan *error steady state* sebesar 0.469 % [19].

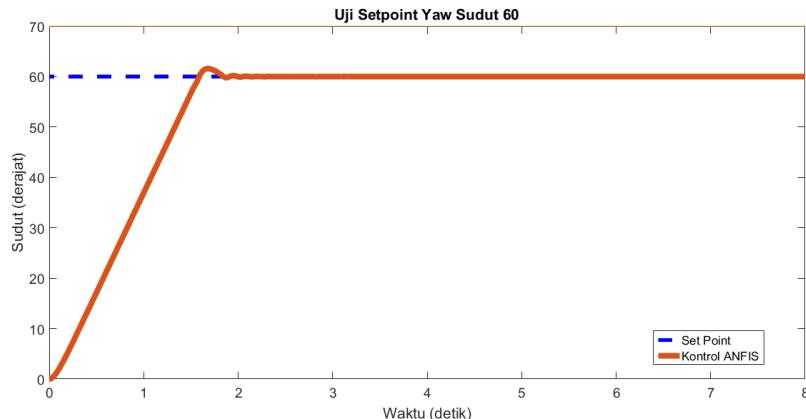
Indeks unjuk kerja dari respon sudut *pitch* disajikan pada tabel sebagai berikut:

**Tabel 4.1** Indeks unjuk kerja pada sudut *pitch*

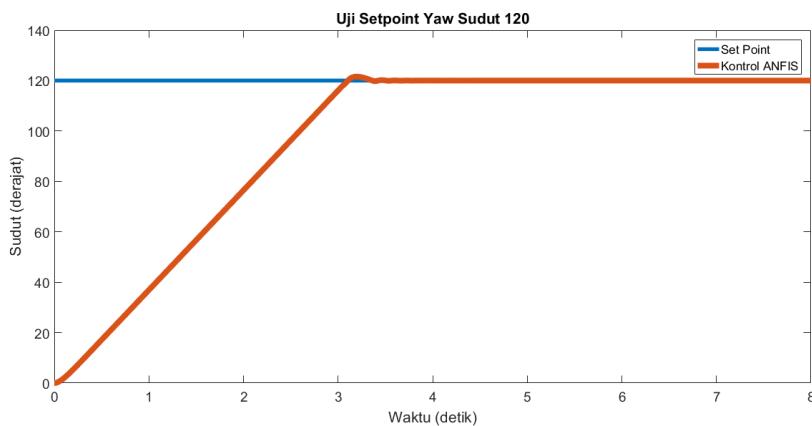
No	Indeks Unjuk Kerja	Nilai pada sudut		
		$30^0$	$45^0$	$60^0$
1	<i>Rise Time</i>	3.351 s	4.923 s	6.51 s

2	%Error Steady State	0.025	0.016	0.012
3	%Maximum Overshoot	2.667	1.778	1.333
4	Settling time	4.638 s	6.22 s	7.793 s

Sedangkan uji *setpoint* pada sudut *yaw* adalah sebagai berikut :



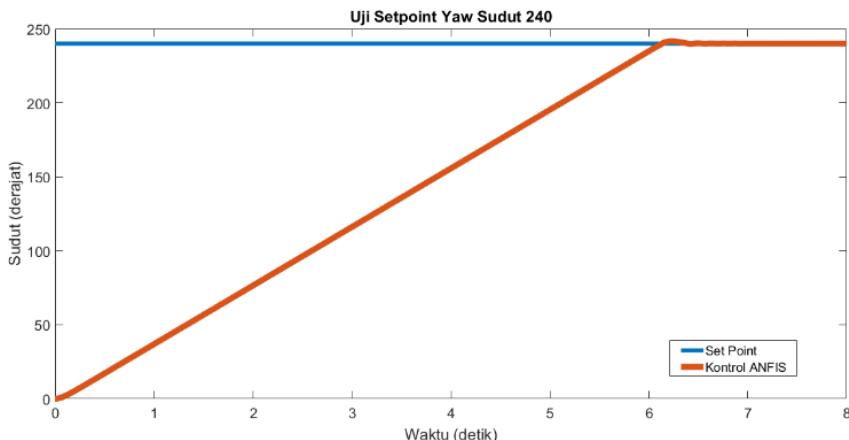
**Gambar 4.4** Respon sudut *yaw* dengan *setpoint*  $60^\circ$



**Gambar 4.5** Respon sudut *yaw* dengan *setpoint*  $120^\circ$

Berdasarkan gambar 4.4 hasil simulasi untuk respon sudut yaw dengan nilai *setpoint* sebesar  $60^0$  mempunyai *overshoot* senilai 2.667 % dan *rise time* 1.681 detik sedangkan *settling time* sebesar 2.588 detik dan ketika sudah dalam kondisi tunak mempunyai *error* dengan nilai konstan sebesar 0.013 %. Pada penelitian sebelumnya mempunyai *overshoot* yang lebih kecil dengan nilai 0 %, nilai *rise time* senilai 3 detik, *settling time* senilai 4 detik dan *error steady state* sebesar 0.451 % [19].

Hasil simulasi untuk respon sudut yaw dengan nilai *setpoint* sebesar  $120^0$  seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5 mempunyai *overshoot* senilai 1.333 % dan *rise time* 3.198 detik sedangkan *settling time* sebesar 4.099 detik dan ketika sudah dalam kondisi tunak mempunyai *error* dengan nilai konstan sebesar 0.007 %. Pada penelitian sebelumnya mempunyai *overshoot* yang lebih kecil dengan nilai 0 %, nilai *rise time* senilai 4 detik, *settling time* senilai 5 detik dan *error steady state* sebesar 0.268 % [19].



Gambar 4.6 Respon sudut yaw dengan *setpoint*  $240^0$

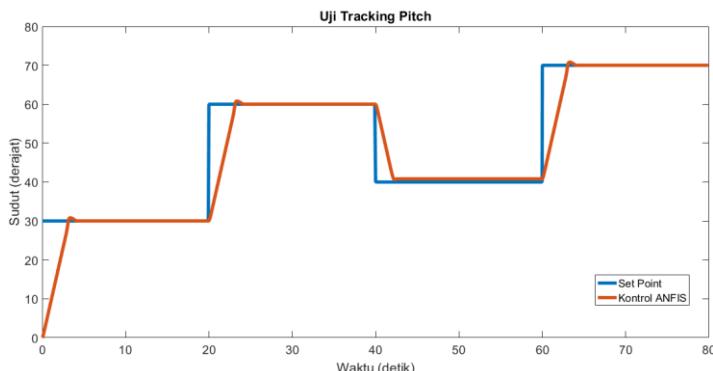
Hasil simulasi yang ditunjukkan pada gambar 4.6 untuk respon sudut *yaw* dengan nilai *setpoint* sebesar  $240^0$  mempunyai *overshoot* senilai 0.667 % dan *rise time* 6.23 detik sedangkan *settling time* sebesar 6.783 detik dan ketika sudah dalam kondisi tunak mempunyai *error* dengan nilai konstan sebesar 0.003 %. Pada penelitian sebelumnya mempunyai *overshoot* yang lebih kecil dengan nilai 0 %, nilai *rise time* senilai 5 detik, *settling time* senilai 6 detik dan *error steady state* sebesar 0.284 % [19].

Indeks unjuk kerja dari respon sudut *yaw* disajikan pada tabel sebagai berikut:

**Tabel 4.2** Indeks unjuk kerja pada sudut *yaw*

No	Indeks Unjuk Kerja	Nilai pada sudut		
		$60^0$	$120^0$	$240^0$
1	<i>Rise Time</i>	1.681 s	3.198 s	6.23 s
2	% <i>Error Steady State</i>	0.013	0.007	0.003
3	% <i>Maximum Overshoot</i>	2.667	1.333	0.667
4	<i>Settling time</i>	2.588 s	4.099 s	6.783 s

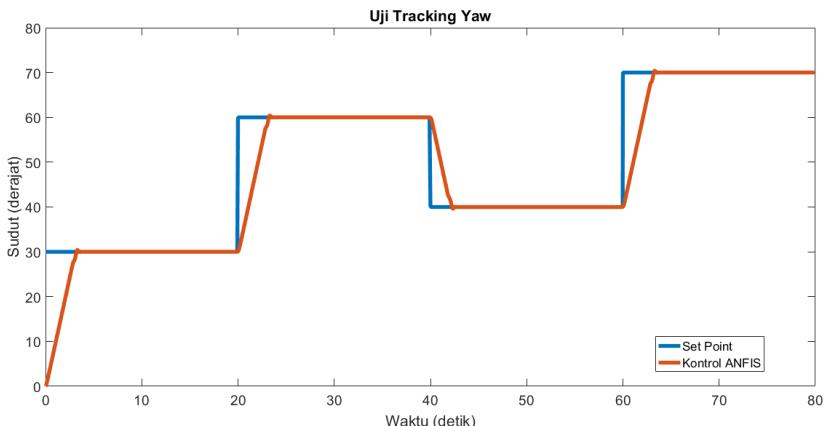
#### 4.1.2 Uji *Tracking*



**Gambar 4.7** Uji *tracking* pada sudut *pitch*

Uji *tracking* pada sistem penjejak matahari berfungsi untuk mengetahui respon dari sistem ketika *setpoint* berubah. Adapun pengujian yang dilakukan dengan mengubah *setpoint* dari  $30^\circ$  dinaikkan menjadi  $60^\circ$  kemudian diturunkan menjadi  $40^\circ$  setelah itu dinaikkan lagi menjadi  $70^\circ$ .

Hasil simulasi pada uji *tracking* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.7 pada sudut *pitch* menunjukkan bahwa respon sudut *pitch* dapat mengikuti *set point* tanpa ada osilasi. Hal tersebut menandakan bahwa sistem penjejak matahari dapat melakukan *tracking* dan mencari posisi terbaik dari sudut *altitude* matahari dengan baik. Ketika *setpoint* ditetapkan pada sudut  $30^\circ$  menghasilkan *overshoot* sebesar 2.667 % dan *settling time* sebesar 4.635 detik, kemudian *setpoint* dinaikkan kembali sebesar  $30^\circ$  menjadi  $60^\circ$  menghasilkan *overshoot* sebesar 1.333 % dan *settling time* sebesar 4.648 detik dari waktu setelah *setpoint* dinaikkan menjadi  $60^\circ$ . Setelah itu, *setpoint* diturunkan sebesar  $20^\circ$  menjadi  $40^\circ$  menghasilkan *overshoot* sebesar 2.075 % dan *settling time* sebesar 3.241 detik dari waktu setelah *setpoint* diturunkan menjadi  $40^\circ$ . Kemudian,



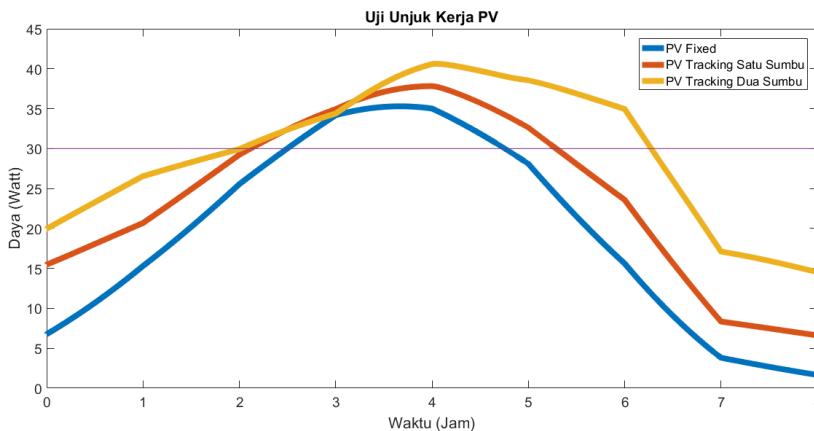
**Gambar 4.8** Uji *tracking* pada sudut *yaw*

*setpoint* kembali dinaikkan sebesar  $30^0$  menjadi  $70^0$  menghasilkan *overshoot* 1.142 % dan *settling time* sebesar 4.56 detik dari waktu setelah *setpoint* dinaikkan menjadi  $70^0$ .

Berdasarkan gambar 4.8, hasil simulasi pada uji *tracking* pada sudut *yaw* menunjukkan bahwa respon sudut *pitch* dapat mengikuti *set point* tanpa ada osilasi. Hal tersebut menandakan bahwa sistem penjejak matahari dapat melakukan *tracking* dan mencari posisi terbaik dari sudut *azimuth* matahari dengan baik. Ketika *setpoint* ditetapkan pada sudut  $30^0$  menghasilkan *overshoot* sebesar 1.433 % dan *settling time* sebesar 3.907 detik, kemudian *setpoint* dinaikkan kembali sebesar  $30^0$  menjadi  $60^0$  menghasilkan *overshoot* sebesar 0.7166 % dan *settling time* sebesar 3.907 detik dari waktu setelah *setpoint* dinaikkan menjadi  $60^0$ . Setelah itu, *setpoint* diturunkan sebesar  $20^0$  menjadi  $40^0$  menghasilkan *undershoot* sebesar 1 %, *overshoot* sebesar 0.125 % dan *settling time* sebesar 3.02 detik dari waktu setelah *setpoint* diturunkan menjadi  $40^0$ . Kemudian, *setpoint* kembali dinaikkan sebesar  $30^0$  menjadi  $70^0$  menghasilkan *overshoot* 0.6142 %, *undershoot* sebesar 0.00085 % dan *settling time* sebesar 3.911 detik dari waktu setelah *setpoint* dinaikkan menjadi  $70^0$ .

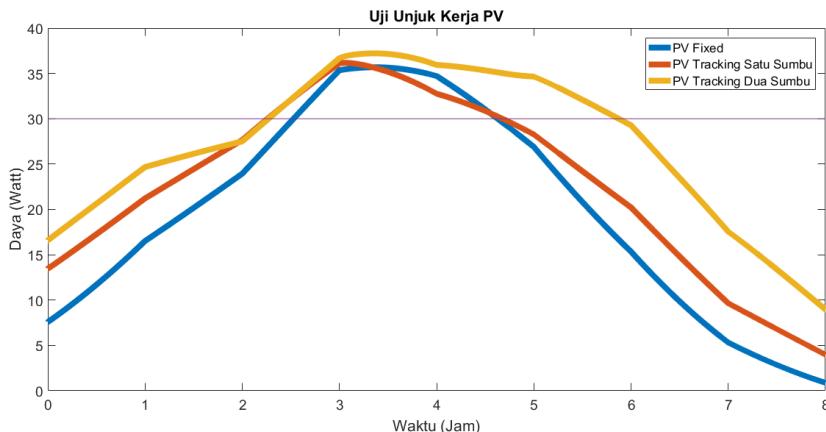
## 4.2 Uji Unjuk Kerja *Photovoltaic*

Salah satu tujuan penting diterapkan sistem penjejak matahari pada *photovoltaic* adalah untuk meningkatkan daya *output*. Pada uji unjuk kerja pada *photovoltaic* dibandingkan daya keluaran *output* antara *photovoltaic* yang tidak menggunakan sistem penjejak matahari (*fixed*), sistem penjejak matahari satu sumbu dan sistem penjejak matahari dua sumbu dalam rentang pengambilan data selama waktu satu hari, tiga hari, lima hari dan tujuh hari, Adapun profil daya *output* dengan pengambilan data selama satu hari (dengan rentang waktu selama 8 jam, dari jam 08.00-16.00) adalah sebagai berikut :



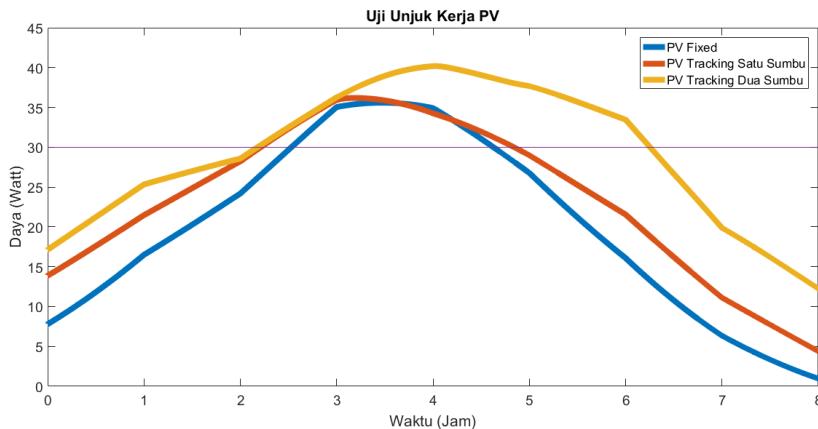
**Gambar 4.9** Profil daya *output* PV selama satu hari

Pada gambar diatas waktu 0 menunjukkan 8.00 WIB, waktu 1 menunjukkan 9.00 WIB dan seterusnya. Berdasarkan gambar 4.9 keluaran daya dari sistem penjejak matahari dan kondisi *fixed*, dapat dilihat bahwa daya yang dihasilkan dari *tracking* lebih besar. Hal ini dikarenakan *photovoltaic* selalu menghadap matahari, dapat dilihat juga bahwa sistem penjejak matahari dengan dua sumbu menghasilkan daya yang lebih besar daripada satu sumbu, hal itu dikarenakan *photovoltaic* mengarah ke matahari pada dua sumbu dan lebih menghadap matahari daripada yang satu sumbu, adapun efisiensi daya dari sistem penjejak matahari satu sumbu terhadap sistem penjejak matahari dengan PV *fixed* adalah sebesar 23.087 %, sedangkan untuk efisiensi sistem penjejak matahari dua sumbu terhadap sistem penjejak matahari dengan PV *fixed* adalah 50.163 %, sementara itu efisiensi sistem penjejak matahari dua sumbu terhadap sistem penjejak matahari satu sumbu adalah 21.998 %. Adapun profil daya *output* dengan pengambilan data selama tiga hari (dengan rentang waktu selama 8 jam, dari jam 08.00-16.00) adalah sebagai berikut :



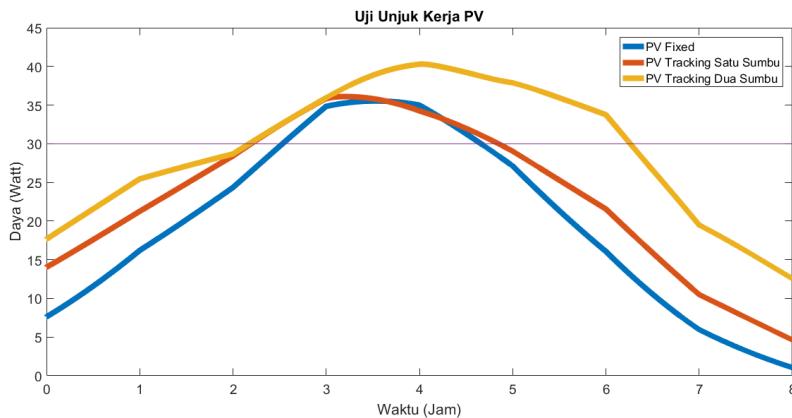
**Gambar 4.10** Profil daya *output* PV selama tiga hari

Pada gambar diatas waktu 0 menunjukkan 8.00 WIB, waktu 1 menunjukkan 9.00 WIB dan seterusnya. Berdasarkan gambar 4.10 keluaran daya dari sistem penjejak matahari dan kondisi *fixed*, dapat dilihat bahwa daya yang dihasilkan dari *tracking* lebih besar. Hal ini dikarenakan *photovoltaic* selalu menghadap matahari, dapat dilihat juga bahwa sistem penjejak matahari dengan dua sumbu menghasilkan daya yang lebih besar daripada satu sumbu, hal itu dikarenakan *photovoltaic* mengarah ke matahari pada dua sumbu dan lebih menghadap matahari daripada yang satu sumbu, adapun efisiensi daya dari sistem penjejak matahari satu sumbu terhadap sistem penjejak matahari dengan PV *fixed* adalah sebesar 13.625 %, sedangkan untuk efisiensi sistem penjejak matahari dua sumbu terhadap sistem penjejak matahari dengan PV *fixed* adalah 36.667 %, sementara itu efisiensi sistem penjejak matahari dua sumbu terhadap sistem penjejak matahari satu sumbu adalah 20.278 %. Adapun profil daya *output* dengan pengambilan data selama lima hari (dengan rentang waktu selama 8 jam, dari jam 08.00-16.00) adalah sebagai berikut :



**Gambar 4.11** Profil daya *output* PV selama lima hari

Pada gambar diatas waktu 0 menunjukkan 8.00 WIB, waktu 1 menunjukkan 9.00 WIB dan seterusnya. Berdasarkan gambar 4.11 keluaran daya dari sistem penjejak matahari dan kondisi *fixed*, dapat dilihat bahwa daya yang dihasilkan dari *tracking* lebih besar. Hal ini dikarenakan *photovoltaic* selalu menghadap matahari, dapat dilihat juga bahwa sistem penjejak matahari dengan dua sumbu menghasilkan daya yang lebih besar daripada satu sumbu, hal itu dikarenakan *photovoltaic* mengarah ke matahari pada dua sumbu dan lebih menghadap matahari daripada yang satu sumbu, adapun efesiensi daya dari sistem penjejak matahari satu sumbu terhadap sistem penjejak matahari dengan PV *fixed* adalah sebesar 16.108 %, sedangkan untuk efesiensi sistem penjejak matahari dua sumbu terhadap sistem penjejak matahari dengan PV *fixed* adalah 46.045 %, sementara itu efesiensi sistem penjejak matahari dua sumbu terhadap sistem penjejak matahari satu sumbu adalah 25.783 %. Adapun profil daya *output* dengan pengambilan data selama tujuh hari (dengan rentang waktu selama 8 jam, dari jam 08.00-16.00) adalah sebagai berikut :



**Gambar 4.12** Profil daya output PV selama tujuh hari

Pada gambar diatas waktu 0 menunjukkan 8.00 WIB, waktu 1 menunjukkan 9.00 WIB dan seterusnya. Berdasarkan gambar 4.12 keluaran daya dari sistem penjejak matahari dan kondisi *fixed*, dapat dilihat bahwa daya yang dihasilkan dari *tracking* lebih besar. Hal ini dikarenakan *photovoltaic* selalu menghadap matahari, dapat dilihat juga bahwa sistem penjejak matahari dengan dua sumbu menghasilkan daya yang lebih besar daripada satu sumbu, hal itu dikarenakan *photovoltaic* mengarah ke matahari pada dua sumbu dan lebih menghadap matahari daripada yang satu sumbu, adapun efisiensi daya dari sistem penjejak matahari satu sumbu terhadap sistem penjejak matahari dengan PV *fixed* adalah sebesar 15.98 %, sedangkan untuk efisiensi sistem penjejak matahari dua sumbu terhadap sistem penjejak matahari dengan PV *fixed* adalah 46.65 %, sementara itu efisiensi sistem penjejak matahari dua sumbu terhadap sistem penjejak matahari satu sumbu adalah 26.442 %. Perbandingan efisiensi daya berdasarkan tiap waktu pengambilan data dapat dilihat dalam tabel berikut ini :

**Tabel 4.3** Perbandingan efisiensi daya

Waktu Pengambilan	Efisiensi (%)		
	1 Axis terhadap <i>fixed</i>	2 Axis terhadap <i>fixed</i>	2 Axis terhadap 1 Axis
Satu Hari	23.09%	50.16%	21.99%
Tiga Hari	13.63%	36.67%	20.28%
Lima Hari	16.11%	46.04%	25.78%
Tujuh Hari	15.98%	46.65%	26.44%

*“Halaman ini memang sengaja dikosongkan”*

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan analisa Tugas Akhir yang telah dilakukan, maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Kontrol ANFIS pada penelitian memiliki indeks peformansi dengan nilai *rise time* sebesar 1.681 detik, *settling time* sebesar 2.588 detik, *maximum overshoot* sebesar 2.667 % dan *error steady state* sebesar 0.013 %.
- Peningkatan efesiensi daya terbaik terjadi pada sistem penjejak matahari dua sumbu terhadap *fixed* dengan nilai efesiensi 50.16 %, 36.67 %, 46.04 % dan 46.65 % pada masing-masing pengambilan data selama satu, tiga, lima dan tujuh hari.

#### 5.2 Saran

Beberapa saran yang diberikan untuk penyempurnaan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

- Data yang digunakan untuk mentraining ANFIS sebaiknya mewakili nilai yang bernilai positif dan nilai yang bernilai negatif dengan jumlah berimbang, agar kontrol ANFIS bisa merespon dengan baik ketika *setpoint* dinaikkan maupun diturunkan, sedangkan dalam penelitian ini data yang mewakili nilai positif dan nilai negatif tidak berimbang.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. E. Díaz-Dorado, A. Suarez-García, C.J. Carrillo, J. Cidrás. **Optimal distribution for photovoltaic solar trackers to minimize power losses caused by shadows.** Renew. Energy 36 (6) (2011) 1826-1835.
- [2]. Republik Indonesia. **Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 30 Tahun 2007 Bab VIII Pasal 29 Ayat 2.** Jakarta: Sekretariat Negara.
- [3]. The International Renewable Energy Agency. “**IRENA | Data and Statistics,**” 2015. [Online]. Available: <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/>.
- [4]. P. O. Carden. **Energy Corradiation using the reversible ammonia reaction.** SolarEnergy 19, 365-378 (1977).
- [5]. Wafa Batayneh, Abdelrahman Owais, Mutasem Nairoukh. **An intelligent fuzzy based tracking controller for a dual-axis solar PV system.** Automation in Construction 29 (2013) 100–106.
- [6]. Ibrahim Sefa, Mehmet Demirtas, İlhami Çolak. **Application of one-axis sun tracking system.** Energy Conversion and Management 50 (2009) 2709–2718.
- [7]. Hossein Mousazadeh, Alireza Keyhani, Arzhang Javadi, Hossein Mobli, Karen Abrinia, Ahmad Sharifi. **A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1800–1818.
- [8]. Tracstar. Should you install a solar tracker?; 2007. <http://www.helmholz.us/smallpowersystems/>.
- [9]. Jang JR, Sun CT, Mizutan E. **Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach.** Prentice Hall; 1996.
- [10]. Y. Garcia, O. Diaz & C. Agudelo. **Performance of a solar PV tracking system on tropic regions.** WIT Transactions on Ecology and The Environment, Vol 195 (2015).
- [11]. Azhar Ghazali & Abdul Malek Abdul Rahman. **The Performance of Three Different Solar Panels for Solar Electricity Applying Solar Tracking Device under the**

- Malaysian Climate Condition.** Energy and Environment Research; Vol. 2, No. 1 (2012).
- [12]. Hariz Elvia Santoso. **Implementasi Kontrol Dual Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) Sistem Penjejak Matahari Dua Posisi Untuk Meningkatkan Peformansi Photovoltaic.** Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember (2016).
  - [13]. Mohanad Alata, M.A. Al-Nimr, Yousef Qaroush. **Developing a multipurpose sun tracking system using fuzzy control.** Energy Conversion and Management 46 (2005) 1229–1245.
  - [14]. Syarif Abdillah Sitorus. **Sistem Keamanan Ruangan Dengan Sensor LDR Dan Handpone.** Medan : Universitas Sumatera Utara (2008).
  - [15]. Trisha Gustiyal, Rouf, Dian Nur Aini dan Hendro. **Sensor Cahaya LDR (Light Dependent Resistor) Berbasis Mikrokontroler At Mega 328 Sebagai Alat Pendekripsi Kekeruhan Air.** Prosiding Seminar Kontribusi Fisika (2015)
  - [16]. JR. ANFIS: **adaptive network based fuzzy inference system.** IEEE Trans Syst Man Cyber 1993;23(3):665–85.
  - [17]. Aryanti, Karina dkk. 2015. **Perancangan Sistem Pengendalian Sudut Pitch Dan Yaw Pada Panel Surya Menggunakan Metode PSO-Fuzzy.** Surabaya : Teknik Fisika ITS.
  - [18]. Manafeddin Namazov . 2010 .**DC Motor Position Control Using Fuzzy Proportional-Derivative Controllers with Different Defuzzification Methods.** Turkish Journal Of Fuzzy Systems (eISSN:1309-1190), Turkey.
  - [19]. Imam Abadi, Ali Musyafa', Adi Soeprijanto. 2015. **Design and Implementation of Active Two Axes Solar Tracking System Using Particle Swarm Optimization Based Fuzzy Logic Controller.** International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.), Vol. 8, N. 6.
  - [20]. Iulia Stamatescu, Ioana Făgărășana, Grigore Stamatescu, Nicoleta Arghiraa, Sergiu Stelian Iliescu. 2014. **Design and**

**Implementation of a Solar-Tracking Algorithm.** Procedia Engineering 69 ( 2014 ) 500 – 507.

- [21]. Siang, J.J.,2005. “**Jaringan Syaraf Tiruan dan Pemrogramannya menggunakan Matlab.** Yogyakarta: Andi.
- [22]. Rachmawati, Alif Tober. 2012. **Tugas Akhir** : “Perancangan *Softsensor Steam Quality* pada *Steam Generator* dengan Optimasi Nilai Spesifik Volume dengan Metode Jaringan Syaraf Tiruan”, Teknik Fisika FTI-ITS Surabaya.

## LAMPIRAN A

Data Motor DC

Data RPM dan Akselerasi waktu dari 0

Volt	1		2		3		4		5		Arus	Rata-Rata RPM	Rata-Rata Waktu
	RPM	Waktu											
1	360	1.88	356	2.67	476	2.82	352	2.18	362	2.03	0.07	381.2	2.316
2	573	2.63	548	2.33	588	2.43	577	2.3	562	2.45	0.08	569.6	2.428
3	816	2.78	806	2.45	823	2.25	802	2.74	831	2.56	0.09	815.6	2.556
4	1015	2.23	1050	1.8	1009	2.45	1035	2.18	1021	2.52	0.1	1026	2.236
5	1259	2.02	1246	2.17	1252	2.65	1286	1.79	1251	1.7	0.1	1258.8	2.066
6	1497	2.23	1497	2.01	1507	2.22	1507	2.78	1474	2.35	0.11	1496.4	2.318
7	1737	2.07	1724	2.46	1723	2.16	1712	2.13	1756	1.79	0.114	1730.4	2.122
8	1980	2.13	1928	2.5	1935	2.21	1957	1.89	1928	2.4	0.12	1945.6	2.226
9	2166	2.61	2175	2.64	2222	1.99	2223	1.91	2213	1.96	0.12	2199.8	2.222
10	2410	2.49	2435	2.33	2401	2	2404	2.48	2409	2.62	0.125	2411.8	2.384
11	2645	2.64	2647	2.44	2675	2.26	2647	2.52	2646	2.83	0.13	2652	2.538
12	2889	2.52	2907	2.32	2886	2.67	2884	2.28	2887	2.62	0.14	2890.6	2.428

Data RPM dan Akselerasi waktu lanjut

Volt	1		2		3		4		5		Arus	Rata-Rata RPM	Rata-Rata Waktu
	RPM	Waktu											
1	360	1.88	356	2.67	476	2.82	352	2.18	362	2.03	0.07	381.2	2.316
2	553	2.27	555	2.18	544	2.15	558	2.31	556	2.28	0.08	553.2	2.238
3	730	2.67	771	1.75	776	2.21	778	2.24	778	2.26	0.09	766.6	2.226
4	1008	2.57	1007	2.13	1011	2.13	1010	2.28	1014	2.31	0.1	1010	2.284
5	1233	1.89	1232	2.38	1236	2.33	1234	2.26	1236	2.33	0.1	1234.2	2.238
6	1470	2.19	1468	2.37	1465	2.52	1466	2.23	1467	2.44	0.11	1467.2	2.35
7	1658	1.77	1703	2.28	1699	2.15	1701	2.26	1704	2.06	0.114	1693	2.104
8	1936	2.04	1941	2.71	1942	2.01	1940	2.01	1938	2.62	0.12	1939.4	2.278
9	2118	1.94	2178	2.61	2179	2.13	2178	2.08	2121	2.42	0.12	2154.8	2.236
10	2337	1.59	2414	2.14	2415	2.3	2419	2.09	2378	2.52	0.125	2392.6	2.128
11	2641	1.87	2657	2.17	2653	2.18	2655	2.3	2656	2.16	0.13	2652.4	2.136
12	2895	1.64	2848	1.78	2900	1.94	2896	1.87	2899	2.04	0.14	2887.6	1.854

## LAMPIRAN B

### Data LDR

Waktu	Resistansi Sensor LDR (Ohm)				Tegangan Sensor LDR (Volt)				Intensitas Matahari		Keterangan
	LDR 1	LDR 2	LDR 3	LDR 4	LDR 1	LDR 2	LDR 3	LDR 4	Lux	W/m <sup>2</sup>	
5:30	2300	2200	2450	2100	7.81	7.76	8.01	6.11	86	0.6794	Sedikit Berawan
6:00	700	650	701	540	3.3	3.2	3.55	2.8	1988	15.7052	Cerah
6:30	419	427	534	362	3.15	3.09	3.33	2.67	6570	51.903	Cerah
7:00	250	218	241	221	2.07	1.85	2.5	1.82	24800	195.92	Cerah
7:30	277	192	316	202	1.81	1.62	2.11	1.68	33600	265.44	Cerah
8:00	215	203	234	197	1.81	1.66	2.16	1.66	40000	316	Cerah
8:30	151	140	165	147	1.25	1.18	1.6	1.25	79200	625.68	Cerah
9:00	130	124	155	127	1.12	1.06	1.3	1.04	89200	704.68	Cerah
9:30	122	118	181	114	1.06	1.04	1.28	0.97	107700	850.83	Cerah
10:00	122	118	171	113	1.04	1.01	1.22	0.95	108200	854.78	Cerah
10:30	111	109	134	107	1.01	0.98	1.19	0.89	117500	928.25	Cerah
11:00	207	198	270	169	1.71	1.67	2.2	1.41	36000	284.4	Berawan
11:30	117	118	153	107	1.03	0.96	1.55	0.83	110600	873.74	Cerah
12:00	196	169	200	142	1.59	1.48	1.98	1.24	46200	364.98	Mendung

12:30	202	194	267	164	1.75	1.64	2.17	1.43	37400	295.46	Mendung
13:00	133	130	166	105	1.14	1.06	1.24	0.96	84000	663.6	Cerah
13:30	136	134	206	108	1.26	1.09	1.25	1.01	76000	600.4	Cerah
14:00	300	306	356	250	2.5	2.52	2.88	1.97	11200	88.48	Berawan
14:30	237	230	270	190	2.06	1.98	2.41	1.65	21300	168.27	Berawan
15:00	250	246	279	198	2.3	2.23	2.7	1.76	16300	128.77	Berawan
15:30	1230	1134	1200	1092	6.89	6.5	7.11	5.71	356	2.8124	Hujan
16:00	800	789	867	698	3.3	3.19	3.54	2.76	1823	14.4017	Gerimis
16:30	821	798	881	719	3.37	3.22	3.57	2.77	1700	13.43	Gerimis
17:00	843	821	988	733	3.41	3.21	3.55	2.85	1659	13.1061	Gerimis
17:30	1043	1032	1120	790	6.43	6.4	7.23	4.89	400	3.16	Cerah

## LAMPIRAN C

Data Sudut Azimuth, Sudut Altitude, Suhu dan Irradiance pada rentang waktu 21 juni 2017 sampai 9 juli 2017 Nopember 2016 (NOAA dan data eksperimen) :

8 Juli 2017

Jam	Radiasi			Suhu			Sudut Altitude	Sudut Azimuth
	Fixed	1-Axis	2-Axis	Fixed	1-Axis	2-Axis		
8:00	398.7	583	726.6	31.5	32	34.5	29.80921	58.87842
9:00	614.5	729.5	936.3	34.5	38.5	39	42.01025	50.73238
10:00	785.1	921.9	994.2	38.5	44.5	45.5	52.42341	37.1754
11:00	880.1	983.4	1010	41	46.5	48	59.15277	15.4514
12:00	889	1010	1061	40	43	45.5	59.6278	-11.9391
13:00	832.7	966.2	1031	38	43	44.5	53.6018	-34.8041
14:00	607.4	785.4	923.1	35	39	40.5	43.54588	-49.3259
15:00	248.5	336.2	469.5	30	31.5	32	31.51531	-58.0454
16:00	202.6	283.6	392	29.5	31	31.5	18.51832	-63.3707

21 Juni 2017

Jam	Radiasi			Suhu			Sudut Altitude	Sudut Azimuth
	Fixed	1-Axis	2-Axis	Fixed	1-Axis	2-Axis		
8:00	427.23	549.42	630.66	41	43	45	30.11796	57.50089
9:00	631.68	712.58	890.97	44	44.5	45.5	42.0871	49.07098
10:00	737.77	866.3	921.34	45.5	50.5	52	52.15322	35.19772
11:00	923.92	1054.63	1131.74	50	55	57	58.41151	13.52632
12:00	910.49	978.43	1079.26	46.5	51	53.5	58.49088	-12.9323
13:00	813.99	899.1	995.5	43.5	48	50.5	52.35211	-34.7866
14:00	609.6	711.35	771.39	41	47.5	48	42.34863	-48.8202
15:00	301.78	428.18	547.47	36.5	40	42	30.41021	-57.3478
16:00	153.26	188.81	290.72	30.5	32.5	33.5	17.50745	-62.5797

22 Juni 2017

Jam	Radiasi			Suhu			Sudut Altitude	Sudut Azimuth
	Fixed	1-Axis	2-Axis	Fixed	1-Axis	2-Axis		
8:00	438.3	485.5	542.17	30.5	31	32.5	30.07358	57.52713
9:00	685.82	725.26	842.14	34.5	38	39	42.04803	49.11272
10:00	703.5	847	919.76	36.5	42.5	44.5	52.12458	35.26425
11:00	937.78	961.97	1038.26	42	48	50.5	58.40213	13.61985
12:00	880.54	926.1	940.54	43	50.5	51	58.50642	-12.8416
13:00	804.3	937.11	966.62	40.5	48	50	52.38588	-34.7264
14:00	590.02	719	809.7	38	43	45	42.39156	-48.7857
15:00	329.43	410.8	519.82	35.5	37.5	39	30.45736	-57.3287
16:00	160.37	226.73	282.03	34	34.5	35.5	17.55653	-62.5698

1 Juli 2017

Jam	Radiasi			Suhu			Sudut Altitude	Sudut Azimuth
	Fixed	1-Axis	2-Axis	Fixed	1-Axis	2-Axis		
8:00	422.35	504.21	669.11	34.5	36.5	37	29.81601	58.0774
9:00	628.34	773.38	871	37	39.5	40.5	41.88676	49.81052
10:00	768.74	890.8	891.36	38.5	45.5	46	52.11546	36.15129
11:00	860.5	994.53	996.69	40	44.5	46.5	58.61624	14.58168
12:00	876.9	948.79	1028.58	39	45	47.5	58.93844	-12.1936
13:00	805.58	904.02	1040.24	38.5	45.5	46.5	52.91996	-34.5171
14:00	607.74	764.4	926.5	37.5	43	44	42.94103	-48.8294
15:00	329.43	360.24	438.45	35	40.5	42	30.99116	-57.4915
16:00	142.99	184.07	234.63	34.5	37	37.5	18.06566	-62.7973

2 Juli 2017

Jam	Radiasi			Suhu			Sudut Altitude	Sudut Azimuth
	Fixed	1-Axis	2-Axis	Fixed	1-Axis	2-Axis		
8:00	466.6	595	721.5	40.5	41	42.5	29.8042	58.17242
9:00	675.4	759.3	925.7	41.5	42	42.5	41.89077	49.92257
10:00	719.2	915.3	979.2	43.5	44.5	46	52.14248	36.28037
11:00	883	1034	1057	50.5	51	53	58.67317	14.70021
12:00	920.8	1111	1158	42.5	45.5	46	59.01838	-12.1426
13:00	802.4	1002	1054	41.5	46	46.5	53.0038	-34.5328
14:00	657	815	997.5	40.5	43	44.5	43.0188	-48.8749
15:00	435	510.9	595.8	38	40.5	41	31.0611	-57.5475
16:00	164.5	237.2	421.7	32	33	35.5	18.12817	-62.858

3 Juli 2017

Jam	Radiasi			Suhu			Sudut Altitude	Sudut Azimuth
	Fixed	1-Axis	2-Axis	Fixed	1-Axis	2-Axis		
8:00	452.5	504.4	599.3	35.5	36.5	37	29.79595	58.27401
9:00	630.6	762	921	39.5	40	41	41.89929	50.04127
10:00	796.1	907.1	1006	40	43	44	52.17516	36.4153
11:00	900.9	958.3	1013	41	45.5	47	58.73671	14.82078
12:00	875.1	979.1	1039	44	49.5	50	59.10457	-12.0962
13:00	794	930.8	978.9	44.5	48.5	50.5	53.09229	-34.5567
14:00	668.5	861.5	921.9	39	42	43.5	43.09961	-48.9287
15:00	440.8	547.2	575.6	38.5	40.5	41	31.13285	-57.6111
16:00	169.1	240.1	465.9	32.5	33.5	35	18.19155	-62.9257

9 Juli 2017

Jam	Radiasi			Suhu			Sudut Altitude	Sudut Azimuth
	Fixed	1-Axis	2-Axis	Fixed	1-Axis	2-Axis		
8:00	438.28	516.921	667.223	36.5833	36.6666	39.0833	29.8230	59.0182
9:00	629.39	735.67	890.852	39.5	41.4167	43.25	42.0462	50.8897
10:00	742.735	906.4	938.977	41.4167	46.0833	45.3333	52.4900	37.3442
11:00	888.7	1014.81	1053.12	46.0833	49.4167	52.3333	59.2555	15.5826
12:00	897.1383	973.2367	1062.063	43.5	46.41667	47.9167	59.7505	-11.924
13:00	828.8283	926.8717	1027.043	40.08333	46.5	49.0833	53.7165	-34.880
14:00	637.3767	782.1083	904.6817	36.5	43.91667	43.25	43.6429	-49.431
15:00	360.49	426.2533	538.44	35.58333	37.41667	39.5	31.5959	-58.156
16:00	155.47	211.7517	335.83	30.16667	34.58333	36.75	18.5850	-63.481

## LAMPIRAN D

Data berikut adalah data yang digunakan dalam pelatihan untuk kontrol ANFIS adapun datanya sebagai berikut :

Sudut Pitch

error	delta error	PWM
-1.650	-1.650	0.000
-1.610	-1.557	-1.239
-1.570	-1.464	-2.375
-1.530	-1.372	-3.506
-1.490	-1.279	-4.638
-1.450	-1.186	-5.771
-1.410	-1.093	-6.904
-1.370	-1.000	-8.038
-1.330	-0.908	-9.172
-1.290	-0.815	-10.306
-1.250	-0.722	-11.441
-1.210	-0.629	-12.577

Sudut Yaw

error	delta error	PWM
0.200	0.200	0.000
0.202	0.195	0.150
0.203	0.190	0.288
0.205	0.186	0.425
0.206	0.181	0.562
0.208	0.176	0.700
0.210	0.171	0.837
0.211	0.166	0.974
0.213	0.162	1.112
0.214	0.157	1.249
0.216	0.152	1.387
0.218	0.147	1.524

-1.170	-0.536	-13.712
-1.130	-0.444	-14.849
-1.090	-0.351	-15.986
-1.050	-0.258	-17.123
-1.010	-0.165	-18.261
-0.970	-0.072	-19.399
-0.930	0.020	-20.538
-0.890	0.113	-21.677
-0.850	0.206	-22.817
-0.810	0.299	-23.957
-0.770	0.392	-25.098
-0.730	0.484	-26.239
-0.690	0.577	-27.381
-0.650	0.670	-28.523
-0.610	0.763	-29.666
-0.570	0.856	-30.809
-0.530	0.948	-31.953
-0.490	1.041	-33.097

0.219	0.142	1.662
0.221	0.138	1.800
0.222	0.133	1.938
0.224	0.128	2.076
0.226	0.123	2.213
0.227	0.118	2.351
0.229	0.114	2.489
0.230	0.109	2.628
0.232	0.104	2.766
0.234	0.099	2.904
0.235	0.094	3.042
0.237	0.090	3.181
0.238	0.085	3.319
0.240	0.080	3.457
0.242	0.075	3.596
0.243	0.070	3.734
0.245	0.066	3.873
0.246	0.061	4.012

-0.450	1.134	-34.241
-0.410	1.227	-35.386
-0.400	1.220	-34.861
-0.401	1.179	-34.002
-0.402	1.138	-33.159
-0.402	1.098	-32.316
-0.403	1.057	-31.473
-0.404	1.016	-30.630
-0.404	0.976	-29.786
-0.405	0.935	-28.942
-0.406	0.894	-28.098
-0.406	0.854	-27.253
-0.407	0.813	-26.408
-0.408	0.772	-25.563
-0.408	0.732	-24.717
-0.409	0.691	-23.871
-0.409	0.651	-23.024
-0.410	0.610	-22.177

0.248	0.056	4.150
0.250	0.051	4.289
0.248	0.047	4.342
0.246	0.043	4.377
0.244	0.039	4.413
0.242	0.036	4.449
0.239	0.032	4.485
0.237	0.028	4.521
0.235	0.024	4.557
0.233	0.020	4.594
0.230	0.016	4.630
0.228	0.013	4.666
0.226	0.009	4.702
0.224	0.005	4.739
0.221	0.001	4.775
0.219	-0.003	4.811
0.217	-0.007	4.847
0.215	-0.010	4.884

-0.411	0.569	-21.330
-0.411	0.529	-20.482
-0.412	0.488	-19.634
-0.413	0.447	-18.786
-0.413	0.407	-17.937
-0.414	0.366	-17.088
-0.415	0.325	-16.238
-0.415	0.285	-15.388
-0.416	0.244	-14.538
-0.416	0.204	-13.688
-0.417	0.163	-12.837
-0.418	0.122	-11.985
-0.418	0.082	-11.134
-0.419	0.041	-10.282
-0.420	0.000	-9.429
-0.414	-0.013	-9.081
-0.401	0.000	-9.115
-0.389	0.013	-9.133

0.212	-0.014	4.920
0.210	-0.018	4.956
0.208	-0.022	4.993
0.206	-0.026	5.029
0.204	-0.030	5.065
0.201	-0.034	5.102
0.199	-0.037	5.138
0.197	-0.041	5.174
0.195	-0.045	5.211
0.192	-0.049	5.247
0.190	-0.053	5.284
0.188	-0.057	5.320
0.186	-0.060	5.357
0.183	-0.064	5.393
0.181	-0.068	5.430
0.184	-0.065	5.419
0.192	-0.055	5.371
0.200	-0.044	5.326

-0.376	0.026	-9.151
-0.364	0.039	-9.168
-0.351	0.052	-9.185
-0.339	0.065	-9.203
-0.326	0.078	-9.220
-0.314	0.092	-9.238
-0.301	0.105	-9.255
-0.289	0.118	-9.272
-0.276	0.131	-9.290
-0.264	0.144	-9.307
-0.252	0.157	-9.325
-0.239	0.170	-9.342
-0.227	0.183	-9.359
-0.214	0.196	-9.377
-0.202	0.210	-9.394
-0.189	0.223	-9.412
-0.177	0.236	-9.429
-0.164	0.249	-9.447

0.208	-0.034	5.280
0.216	-0.024	5.234
0.224	-0.014	5.188
0.232	-0.003	5.142
0.240	0.007	5.097
0.248	0.017	5.051
0.256	0.027	5.005
0.264	0.038	4.959
0.272	0.048	4.913
0.280	0.058	4.867
0.288	0.068	4.821
0.296	0.078	4.775
0.304	0.089	4.729
0.312	0.099	4.683
0.320	0.109	4.637
0.328	0.119	4.591
0.336	0.130	4.545
0.344	0.140	4.499

-0.152	0.262	-9.464
-0.139	0.275	-9.481
-0.127	0.288	-9.499
-0.114	0.301	-9.516
-0.102	0.315	-9.534
-0.089	0.328	-9.551
-0.077	0.341	-9.569
-0.064	0.354	-9.586
-0.052	0.367	-9.604
-0.039	0.380	-9.621
-0.029	0.388	-9.553
-0.026	0.378	-9.278
-0.024	0.368	-9.014
-0.021	0.359	-8.750
-0.018	0.349	-8.486
-0.015	0.340	-8.222
-0.012	0.330	-7.958
-0.009	0.320	-7.694

0.352	0.150	4.453
0.360	0.160	4.407
0.368	0.171	4.361
0.376	0.181	4.314
0.384	0.191	4.268
0.392	0.201	4.222
0.400	0.212	4.176
0.408	0.222	4.129
0.416	0.232	4.083
0.424	0.242	4.037
0.429	0.247	4.057
0.425	0.235	4.240
0.421	0.223	4.413
0.416	0.210	4.586
0.412	0.198	4.760
0.408	0.186	4.933
0.404	0.174	5.106
0.400	0.162	5.280

-0.006	0.311	-7.430
-0.003	0.301	-7.165
0.000	0.292	-6.901
0.002	0.282	-6.636
0.005	0.272	-6.372
0.008	0.263	-6.107
0.011	0.253	-5.842
0.014	0.244	-5.577
0.017	0.234	-5.312
0.020	0.224	-5.046
0.023	0.215	-4.781
0.025	0.205	-4.515
0.028	0.196	-4.250
0.031	0.186	-3.984
0.034	0.176	-3.718
0.037	0.167	-3.452
0.040	0.157	-3.186
0.043	0.148	-2.920

0.396	0.150	5.453
0.392	0.138	5.627
0.387	0.125	5.800
0.383	0.113	5.974
0.379	0.101	6.148
0.375	0.089	6.321
0.371	0.077	6.495
0.367	0.065	6.669
0.362	0.052	6.843
0.358	0.040	7.018
0.354	0.028	7.192
0.350	0.016	7.366
0.346	0.004	7.540
0.342	-0.008	7.715
0.337	-0.021	7.889
0.333	-0.033	8.064
0.329	-0.045	8.238
0.325	-0.057	8.413

0.046	0.138	-2.654
0.048	0.128	-2.387
0.051	0.119	-2.121
0.054	0.109	-1.854
0.057	0.100	-1.587
0.060	0.090	-1.321
0.058	0.085	-1.279
0.056	0.080	-1.218
0.054	0.076	-1.157
0.052	0.071	-1.095
0.050	0.066	-1.034
0.048	0.061	-0.972
0.047	0.056	-0.911
0.045	0.052	-0.849
0.043	0.047	-0.788
0.041	0.042	-0.726
0.039	0.037	-0.664
0.037	0.032	-0.603

0.321	-0.069	8.588
0.317	-0.081	8.763
0.312	-0.094	8.938
0.308	-0.106	9.113
0.304	-0.118	9.288
0.300	-0.130	9.463
0.302	-0.124	9.353
0.303	-0.118	9.267
0.305	-0.113	9.181
0.306	-0.107	9.096
0.308	-0.101	9.011
0.310	-0.095	8.925
0.311	-0.090	8.840
0.313	-0.084	8.754
0.314	-0.078	8.669
0.316	-0.072	8.583
0.318	-0.067	8.498
0.319	-0.061	8.412

0.035	0.028	-0.541
0.033	0.023	-0.479
0.031	0.018	-0.417
0.029	0.013	-0.356
0.027	0.008	-0.294
0.025	0.004	-0.232
0.024	-0.001	-0.170
0.022	-0.006	-0.108
0.020	-0.011	-0.046
0.018	-0.016	0.016
0.016	-0.020	0.078
0.014	-0.025	0.140
0.012	-0.030	0.202
0.010	-0.035	0.264
0.008	-0.040	0.326
0.006	-0.044	0.388
0.004	-0.049	0.450
0.002	-0.054	0.512

0.321	-0.055	8.327
0.322	-0.049	8.241
0.324	-0.044	8.155
0.326	-0.038	8.070
0.327	-0.032	7.984
0.329	-0.026	7.898
0.330	-0.021	7.812
0.332	-0.015	7.726
0.334	-0.009	7.640
0.335	-0.003	7.554
0.337	0.002	7.468
0.338	0.008	7.382
0.340	0.014	7.296
0.342	0.020	7.210
0.343	0.026	7.124
0.345	0.031	7.038
0.346	0.037	6.951
0.348	0.043	6.865

0.000	-0.059	0.574
0.002	-0.057	0.550
0.004	-0.053	0.509
0.006	-0.049	0.468
0.008	-0.044	0.427
0.011	-0.040	0.387
0.013	-0.036	0.346
0.015	-0.032	0.306
0.017	-0.028	0.265
0.020	-0.024	0.224
0.022	-0.019	0.183
0.024	-0.015	0.143
0.026	-0.011	0.102
0.029	-0.007	0.061
0.031	-0.003	0.020
0.033	0.001	-0.020
0.035	0.006	-0.061
0.038	0.010	-0.102

0.350	0.049	6.779
0.350	0.049	6.796
0.350	0.047	6.834
0.350	0.046	6.871
0.350	0.044	6.908
0.350	0.042	6.945
0.350	0.041	6.982
0.350	0.039	7.019
0.350	0.038	7.057
0.350	0.036	7.094
0.350	0.034	7.131
0.350	0.033	7.168
0.350	0.031	7.205
0.350	0.030	7.242
0.350	0.028	7.279
0.350	0.026	7.317
0.350	0.025	7.354
0.350	0.023	7.391

0.040	0.014	-0.143
0.042	0.018	-0.184
0.044	0.022	-0.225
0.046	0.026	-0.266
0.049	0.030	-0.307
0.051	0.035	-0.348
0.053	0.039	-0.389
0.055	0.043	-0.430
0.058	0.047	-0.471
0.060	0.051	-0.512
0.062	0.055	-0.553
0.064	0.060	-0.594
0.067	0.064	-0.635
0.069	0.068	-0.676
0.069	0.067	-0.665
0.066	0.062	-0.616
0.063	0.057	-0.567
0.060	0.052	-0.519

0.350	0.022	7.428
0.350	0.020	7.465
0.350	0.018	7.503
0.350	0.017	7.540
0.350	0.015	7.577
0.350	0.014	7.615
0.350	0.012	7.652
0.350	0.010	7.689
0.350	0.009	7.727
0.350	0.007	7.764
0.350	0.006	7.801
0.350	0.004	7.839
0.350	0.002	7.876
0.350	0.001	7.914
0.347	-0.003	7.931
0.342	-0.008	7.934
0.336	-0.014	7.937
0.331	-0.019	7.940

0.057	0.047	-0.471
0.054	0.042	-0.423
0.051	0.037	-0.375
0.048	0.032	-0.327
0.046	0.026	-0.279
0.043	0.021	-0.231
0.040	0.016	-0.183
0.037	0.011	-0.135
0.034	0.006	-0.086
0.031	0.001	-0.038
0.028	-0.004	0.010
0.025	-0.009	0.058
0.022	-0.014	0.107
0.020	-0.020	0.155
0.017	-0.025	0.203
0.014	-0.030	0.252
0.011	-0.035	0.300
0.008	-0.040	0.348

0.326	-0.024	7.943
0.320	-0.030	7.946
0.315	-0.035	7.949
0.309	-0.041	7.953
0.304	-0.046	7.956
0.298	-0.052	7.959
0.293	-0.057	7.962
0.287	-0.063	7.965
0.282	-0.068	7.969
0.277	-0.073	7.972
0.271	-0.079	7.975
0.266	-0.084	7.978
0.260	-0.090	7.981
0.255	-0.095	7.984
0.249	-0.101	7.988
0.244	-0.106	7.991
0.238	-0.112	7.994
0.233	-0.117	7.997

0.005	-0.045	0.397
0.002	-0.050	0.445
-0.001	-0.055	0.494
-0.003	-0.061	0.542
-0.006	-0.066	0.591
-0.009	-0.071	0.639
-0.012	-0.076	0.688
-0.015	-0.081	0.736
-0.018	-0.086	0.785
-0.020	-0.090	0.800
-0.022	-0.088	0.734
-0.024	-0.087	0.673
-0.025	-0.086	0.612
-0.027	-0.085	0.551
-0.028	-0.083	0.489
-0.030	-0.082	0.428
-0.032	-0.081	0.367
-0.033	-0.079	0.306

0.228	-0.122	8.000
0.222	-0.128	8.003
0.217	-0.133	8.007
0.211	-0.139	8.010
0.206	-0.144	8.013
0.200	-0.150	8.016
0.195	-0.155	8.019
0.190	-0.160	8.023
0.184	-0.166	8.026
0.180	-0.168	7.993
0.182	-0.162	7.875
0.183	-0.155	7.761
0.184	-0.148	7.648
0.185	-0.141	7.535
0.187	-0.135	7.421
0.188	-0.128	7.307
0.189	-0.121	7.194
0.191	-0.115	7.080

-0.035	-0.078	0.245
-0.036	<b>-0.077</b>	0.183
-0.038	-0.076	0.122
-0.040	-0.074	0.061
-0.041	-0.073	-0.001
-0.043	-0.072	-0.062
-0.044	-0.070	-0.123
-0.046	-0.069	-0.185
-0.048	-0.068	-0.246
-0.049	-0.067	-0.308
-0.051	-0.065	-0.369
-0.052	-0.064	-0.431
-0.054	-0.063	-0.492
-0.056	-0.062	-0.554
-0.057	-0.060	-0.616
-0.059	-0.059	-0.677
-0.060	-0.058	-0.739
-0.062	-0.056	-0.801

0.192	-0.108	6.966
0.193	-0.101	6.853
0.194	-0.094	6.739
0.196	-0.088	6.625
0.197	-0.081	6.511
0.198	-0.074	6.397
0.200	-0.068	6.283
0.201	-0.061	6.169
0.202	-0.054	6.055
0.203	-0.047	5.941
0.205	-0.041	5.826
0.206	-0.034	5.712
0.207	-0.027	5.598
0.208	-0.020	5.484
0.210	-0.014	5.369
0.211	-0.007	5.255
0.212	0.000	5.140
0.214	0.006	5.026

-0.064	-0.055	-0.862
-0.065	-0.054	-0.924
-0.067	-0.053	-0.986
-0.068	-0.051	-1.048
-0.070	-0.050	-1.110
-0.070	-0.048	-1.141
-0.069	-0.046	-1.176
-0.069	-0.044	-1.210
-0.069	-0.042	-1.245
-0.068	-0.040	-1.279
-0.068	-0.038	-1.314
-0.068	-0.037	-1.348
-0.067	-0.035	-1.383
-0.067	-0.033	-1.417
-0.067	-0.031	-1.452
-0.066	-0.029	-1.487
-0.066	-0.027	-1.521
-0.066	-0.025	-1.556

0.215	0.013	4.911
0.216	0.020	4.796
0.217	0.027	4.682
0.219	0.033	4.567
0.220	0.040	4.452
0.219	0.037	4.495
0.217	0.035	4.524
0.216	0.032	4.554
0.215	0.030	4.583
0.214	0.027	4.612
0.212	0.025	4.641
0.211	0.022	4.670
0.210	0.020	4.699
0.208	0.017	4.728
0.207	0.014	4.757
0.206	0.012	4.787
0.205	0.009	4.816
0.203	0.007	4.845

-0.066	-0.023	-1.590
-0.065	-0.021	-1.625
-0.065	-0.019	-1.660
-0.065	-0.017	-1.694
-0.064	-0.015	-1.729
-0.064	-0.014	-1.764
-0.064	-0.012	-1.798
-0.063	-0.010	-1.833
-0.063	-0.008	-1.868
-0.063	-0.006	-1.903
-0.062	-0.004	-1.937
-0.062	-0.002	-1.972
-0.062	0.000	-2.007
-0.061	0.002	-2.042
-0.061	0.004	-2.077
-0.061	0.006	-2.112
-0.060	0.008	-2.146
-0.060	0.010	-2.181

0.202	0.004	4.874
0.201	0.002	4.903
0.200	-0.001	4.932
0.198	-0.004	4.962
0.197	-0.006	4.991
0.196	-0.009	5.020
0.194	-0.011	5.049
0.193	-0.014	5.079
0.192	-0.016	5.108
0.191	-0.019	5.137
0.189	-0.021	5.167
0.188	-0.024	5.196
0.187	-0.027	5.225
0.185	-0.029	5.255
0.184	-0.032	5.284
0.183	-0.034	5.313
0.182	-0.037	5.343
0.180	-0.039	5.372

-0.061	0.009	-2.182
-0.062	0.008	-2.175
-0.063	0.006	-2.169
-0.064	0.005	-2.163
-0.065	0.004	-2.156
-0.066	0.003	-2.150
-0.066	0.001	-2.144
-0.067	0.000	-2.138
-0.068	-0.001	-2.131
-0.069	-0.002	-2.125
-0.070	-0.004	-2.119
-0.071	-0.005	-2.113
-0.072	-0.006	-2.106
-0.073	-0.008	-2.100
-0.074	-0.009	-2.094
-0.075	-0.010	-2.088
-0.076	-0.011	-2.081
-0.077	-0.013	-2.075

0.180	-0.039	5.355
0.180	-0.038	5.330
0.180	-0.036	5.304
0.180	-0.035	5.279
0.180	-0.034	5.253
0.180	-0.033	5.228
0.180	-0.031	5.202
0.180	-0.030	5.177
0.180	-0.029	5.151
0.180	-0.028	5.126
0.180	-0.026	5.100
0.180	-0.025	5.075
0.180	-0.024	5.049
0.180	-0.022	5.024
0.180	-0.021	4.998
0.180	-0.020	4.972
0.180	-0.019	4.947
0.180	-0.017	4.921

-0.078	-0.014	-2.069
-0.079	-0.015	-2.063
-0.080	-0.017	-2.056
-0.081	-0.018	-2.050
-0.082	-0.019	-2.044
-0.083	-0.020	-2.038
-0.084	-0.022	-2.031
-0.085	-0.023	-2.025
-0.086	-0.024	-2.019
-0.087	-0.026	-2.012
-0.088	-0.027	-2.006
-0.089	-0.028	-2.000
-0.090	-0.029	-1.993
-0.093	-0.032	-2.003
-0.098	-0.037	-2.025
-0.104	-0.041	-2.046
-0.109	-0.046	-2.067
-0.114	-0.050	-2.088

0.180	-0.016	4.896
0.180	-0.015	4.870
0.180	-0.013	4.844
0.180	-0.012	4.819
0.180	-0.011	4.793
0.180	-0.010	4.767
0.180	-0.008	4.742
0.180	-0.007	4.716
0.180	-0.006	4.690
0.180	-0.004	4.665
0.180	-0.003	4.639
0.180	-0.002	4.613
0.180	-0.001	4.587
0.185	0.005	4.577
0.195	0.015	4.580
0.205	0.025	4.581
0.215	0.035	4.583
0.225	0.045	4.584

-0.120	-0.055	-2.109
-0.125	-0.059	-2.130
-0.131	-0.064	-2.152
-0.136	-0.068	-2.173
-0.142	-0.073	-2.194
-0.147	-0.077	-2.215
-0.153	-0.082	-2.236
-0.158	-0.086	-2.257
-0.163	-0.090	-2.279
-0.169	-0.095	-2.300
-0.174	-0.099	-2.321
-0.180	-0.104	-2.342
-0.185	-0.108	-2.364
-0.191	-0.113	-2.385
-0.196	-0.117	-2.406
-0.202	-0.122	-2.427
-0.207	-0.126	-2.449
-0.212	-0.131	-2.470

0.235	0.055	4.586
0.244	0.064	4.588
0.254	0.074	4.589
0.264	0.084	4.591
0.274	0.094	4.593
0.284	0.104	4.594
0.294	0.114	4.596
0.304	0.124	4.598
0.314	0.134	4.599
0.324	0.144	4.601
0.334	0.154	4.602
0.344	0.164	4.604
0.354	0.174	4.606
0.364	0.184	4.607
0.373	0.193	4.609
0.383	0.203	4.611
0.393	0.213	4.612
0.403	0.223	4.614

-0.218	-0.135	-2.491
-0.223	-0.140	-2.513
-0.229	-0.144	-2.534
-0.234	-0.149	-2.555
-0.240	-0.153	-2.577
-0.245	-0.158	-2.598
-0.250	-0.162	-2.619
-0.256	-0.167	-2.641
-0.259	-0.168	-2.691
-0.255	-0.158	-2.813
-0.251	-0.148	-2.930
-0.246	-0.139	-3.048
-0.242	-0.129	-3.165
-0.238	-0.120	-3.283
-0.234	-0.110	-3.400
-0.230	-0.100	-3.518
-0.226	-0.091	-3.635
-0.222	-0.081	-3.753

0.413	0.233	4.616
0.423	0.243	4.617
0.433	0.253	4.619
0.443	0.263	4.620
0.453	0.273	4.622
0.463	0.283	4.624
0.473	0.293	4.625
0.483	0.303	4.627
0.490	0.308	4.693
0.491	0.299	4.917
0.492	0.290	5.131
0.493	0.281	5.345
0.494	0.272	5.560
0.495	0.263	5.774
0.496	0.254	5.989
0.497	0.245	6.203
0.498	0.236	6.418
0.499	0.227	6.633

-0.217	-0.072	-3.871
-0.213	-0.062	-3.989
-0.209	-0.052	-4.107
-0.205	-0.043	-4.225
-0.201	-0.033	-4.342
-0.197	-0.024	-4.461
-0.192	-0.014	-4.579
-0.188	-0.004	-4.697
-0.184	0.005	-4.815
-0.180	0.015	-4.933
-0.176	0.024	-5.051
-0.172	0.034	-5.170
-0.167	0.044	-5.288
-0.163	0.053	-5.406
-0.159	0.063	-5.525
-0.155	0.072	-5.643
-0.151	0.082	-5.762
-0.147	0.092	-5.881

0.500	0.218	6.848
0.501	0.209	7.063
0.502	0.200	7.278
0.503	0.191	7.493
0.504	0.182	7.708
0.505	0.173	7.924
0.506	0.164	8.139
0.507	0.155	8.355
0.508	0.146	8.570
0.508	0.138	8.786
0.509	0.129	9.002
0.510	0.120	9.218
0.511	0.111	9.434
0.512	0.102	9.650
0.513	0.093	9.866
0.514	0.084	10.082
0.515	0.075	10.298
0.516	0.066	10.515

-0.142	0.101	-5.999
-0.138	0.111	-6.118
-0.134	0.120	-6.237
-0.130	0.130	-6.355
-0.134	0.122	-6.249
-0.137	0.115	-6.161
-0.141	0.107	-6.075
-0.144	0.099	-5.988
-0.148	0.092	-5.901
-0.151	0.084	-5.814
-0.155	0.076	-5.727
-0.158	0.069	-5.640
-0.162	0.061	-5.553
-0.165	0.053	-5.466
-0.169	0.046	-5.379
-0.172	0.038	-5.292
-0.176	0.030	-5.205
-0.179	0.022	-5.117

0.517	0.057	10.731
0.518	0.048	10.948
0.519	0.039	11.165
0.520	0.030	11.381
0.516	0.025	11.388
0.512	0.020	11.412
0.508	0.015	11.437
0.503	0.010	11.462
0.499	0.004	11.487
0.495	-0.001	11.512
0.491	-0.006	11.537
0.487	-0.011	11.563
0.483	-0.016	11.588
0.478	-0.021	11.613
0.474	-0.026	11.638
0.470	-0.031	11.663
0.466	-0.037	11.688
0.462	-0.042	11.713

-0.183	0.015	-5.030
-0.186	0.007	-4.943
-0.190	-0.001	-4.855
-0.193	-0.008	-4.768
-0.197	-0.016	-4.681
-0.200	-0.024	-4.593
-0.204	-0.031	-4.506
-0.207	-0.039	-4.418
-0.211	-0.047	-4.331
-0.214	-0.054	-4.243
-0.218	-0.062	-4.156
-0.222	-0.070	-4.068
-0.225	-0.077	-3.980
-0.229	-0.085	-3.892
-0.232	-0.093	-3.805
-0.236	-0.100	-3.717
-0.239	-0.108	-3.629
-0.239	-0.107	-3.679

0.458	-0.047	11.738
0.453	-0.052	11.763
0.449	-0.057	11.789
0.445	-0.062	11.814
0.441	-0.067	11.839
0.437	-0.072	11.864
0.433	-0.078	11.889
0.428	-0.083	11.914
0.424	-0.088	11.940
0.420	-0.093	11.965
0.416	-0.098	11.990
0.412	-0.103	12.015
0.408	-0.108	12.040
0.404	-0.113	12.066
0.399	-0.118	12.091
0.395	-0.124	12.116
0.391	-0.129	12.141
0.391	-0.126	12.075

-0.238	-0.102	-3.757
-0.237	-0.098	-3.834
-0.236	-0.093	-3.911
-0.235	-0.089	-3.987
-0.234	-0.084	-4.064
-0.234	-0.080	-4.141
-0.233	-0.075	-4.218
-0.232	-0.071	-4.294
-0.231	-0.066	-4.371
-0.230	-0.062	-4.448
-0.229	-0.057	-4.525
-0.228	-0.053	-4.602
-0.227	-0.048	-4.679
-0.226	-0.044	-4.756
-0.225	-0.039	-4.833
-0.224	-0.035	-4.910
-0.223	-0.030	-4.987
-0.222	-0.026	-5.064

0.392	-0.121	11.989
0.393	-0.116	11.905
0.394	-0.111	11.820
0.395	-0.106	11.736
0.396	-0.101	11.651
0.396	-0.095	11.567
0.397	-0.090	11.482
0.398	-0.085	11.397
0.399	-0.080	11.313
0.400	-0.075	11.228
0.401	-0.070	11.143
0.402	-0.065	11.058
0.403	-0.060	10.974
0.404	-0.054	10.889
0.405	-0.049	10.804
0.406	-0.044	10.719
0.407	-0.039	10.634
0.408	-0.034	10.549

-0.221	-0.022	-5.141
-0.220	-0.017	-5.219
-0.219	-0.013	-5.296
-0.218	-0.008	-5.373
-0.217	-0.004	-5.450
-0.216	0.001	-5.528
-0.215	0.005	-5.605
-0.214	0.010	-5.682
-0.213	0.014	-5.760
-0.212	0.019	-5.837
-0.211	0.023	-5.915
-0.210	0.028	-5.992
-0.208	0.031	-6.014
-0.205	0.034	-5.994
-0.201	0.036	-5.975
-0.198	0.039	-5.957
-0.194	0.042	-5.939
-0.191	0.044	-5.920

0.409	-0.029	10.464
0.410	-0.024	10.379
0.411	-0.019	10.293
0.412	-0.014	10.208
0.413	-0.008	10.123
0.414	-0.003	10.038
0.415	0.002	9.952
0.416	0.007	9.867
0.417	0.012	9.782
0.418	0.017	9.696
0.419	0.022	9.611
0.420	0.027	9.525
0.415	0.024	9.503
0.405	0.013	9.530
0.394	0.002	9.554
0.384	-0.009	9.578
0.374	-0.020	9.602
0.364	-0.032	9.626

-0.187	0.047	-5.902
-0.184	0.049	-5.883
-0.180	0.052	-5.865
-0.177	0.054	-5.846
-0.173	0.057	-5.828
-0.170	0.059	-5.809
-0.166	0.062	-5.791
-0.162	0.065	-5.773
-0.159	0.067	-5.754
-0.155	0.070	-5.736
-0.152	0.072	-5.717
-0.148	0.075	-5.698
-0.145	0.077	-5.680
-0.141	0.080	-5.661
-0.138	0.082	-5.643
-0.134	0.085	-5.624
-0.131	0.088	-5.606
-0.127	0.090	-5.587

0.353	-0.043	9.650
0.343	-0.054	9.675
0.333	-0.065	9.699
0.323	-0.076	9.723
0.312	-0.088	9.747
0.302	-0.099	9.771
0.292	-0.110	9.795
0.282	-0.121	9.820
0.272	-0.132	9.844
0.261	-0.144	9.868
0.251	-0.155	9.892
0.241	-0.166	9.917
0.231	-0.177	9.941
0.220	-0.188	9.965
0.210	-0.200	9.989
0.200	-0.211	10.014
0.190	-0.222	10.038
0.179	-0.233	10.062

-0.124	0.093	-5.569
-0.120	0.095	-5.550
-0.117	0.098	-5.531
-0.113	0.100	-5.513
-0.110	0.103	-5.494
-0.106	0.106	-5.476
-0.103	0.108	-5.457
-0.100	0.109	-5.422
-0.099	0.106	-5.346
-0.099	0.104	-5.272
-0.098	0.101	-5.199
-0.097	0.098	-5.125
-0.097	0.095	-5.051
-0.096	0.092	-4.978
-0.095	0.089	-4.904
-0.095	0.086	-4.830
-0.094	0.083	-4.757
-0.093	0.080	-4.683

0.169	-0.244	10.087
0.159	-0.256	10.111
0.149	-0.267	10.135
0.138	-0.278	10.160
0.128	-0.289	10.184
0.118	-0.300	10.208
0.108	-0.312	10.233
0.099	-0.318	10.184
0.096	-0.312	9.958
0.092	-0.305	9.742
0.089	-0.298	9.526
0.085	-0.291	9.310
0.082	-0.285	9.095
0.078	-0.278	8.879
0.074	-0.271	8.663
0.071	-0.265	8.446
0.067	-0.258	8.230
0.064	-0.251	8.014

-0.093	0.078	-4.609
-0.092	0.075	-4.535
-0.092	0.072	-4.461
-0.091	0.069	-4.387
-0.090	0.066	-4.314
-0.090	0.063	-4.240
-0.089	0.060	-4.166
-0.088	0.057	-4.092
-0.088	0.055	-4.018
-0.087	0.052	-3.943
-0.086	0.049	-3.869
-0.086	0.046	-3.795
-0.085	0.043	-3.721
-0.084	0.040	-3.647
-0.084	0.037	-3.573
-0.083	0.034	-3.498
-0.083	0.032	-3.424
-0.082	0.029	-3.350

0.060	-0.244	7.798
0.057	-0.238	7.581
0.053	-0.231	7.364
0.050	-0.224	7.148
0.046	-0.218	6.931
0.043	-0.211	6.714
0.039	-0.204	6.497
0.036	-0.197	6.280
0.032	-0.191	6.063
0.029	-0.184	5.846
0.025	-0.177	5.628
0.022	-0.170	5.411
0.018	-0.164	5.193
0.015	-0.157	4.976
0.011	-0.150	4.758
0.008	-0.144	4.540
0.004	-0.137	4.322
0.001	-0.130	4.104

-0.081	0.026	-3.275
-0.081	0.023	-3.201
-0.080	0.020	-3.126
-0.095	0.004	-3.119
-0.110	-0.011	-3.107
-0.125	-0.027	-3.094
-0.140	-0.043	-3.081
-0.155	-0.058	-3.068
-0.170	-0.074	-3.056
-0.185	-0.090	-3.043
-0.200	-0.105	-3.030
-0.215	-0.121	-3.017
-0.230	-0.137	-3.004
-0.245	-0.152	-2.991
-0.260	-0.168	-2.979
-0.276	-0.184	-2.966
-0.291	-0.200	-2.953
-0.306	-0.215	-2.940

-0.003	-0.123	3.886
-0.006	-0.117	3.668
-0.010	-0.110	3.450
0.002	-0.094	3.389
0.015	-0.078	3.315
0.027	-0.062	3.240
0.040	-0.046	3.166
0.052	-0.030	3.091
0.065	-0.014	3.017
0.077	0.002	2.942
0.090	0.018	2.867
0.102	0.034	2.793
0.115	0.050	2.718
0.127	0.066	2.643
0.140	0.082	2.568
0.152	0.098	2.493
0.165	0.114	2.418
0.177	0.130	2.344

-0.321	-0.231	-2.927
-0.336	-0.247	-2.914
-0.351	-0.262	-2.901
-0.366	-0.278	-2.888
-0.381	-0.294	-2.875
-0.396	-0.309	-2.863
-0.411	-0.325	-2.850
-0.426	-0.341	-2.837
-0.441	-0.356	-2.824
-0.456	-0.372	-2.811
-0.471	-0.388	-2.798
-0.486	-0.403	-2.785
-0.501	-0.419	-2.772
-0.516	-0.435	-2.759
-0.531	-0.450	-2.746
-0.546	-0.466	-2.733
-0.545	-0.453	-3.002
-0.538	-0.431	-3.328

0.190	0.146	2.269
0.202	0.162	2.194
0.215	0.178	2.119
0.227	0.194	2.044
0.240	0.210	1.969
0.252	0.226	1.893
0.265	0.242	1.818
0.277	0.258	1.743
0.290	0.274	1.668
0.302	0.290	1.593
0.314	0.306	1.517
0.327	0.322	1.442
0.339	0.338	1.367
0.352	0.354	1.291
0.364	0.370	1.216
0.377	0.386	1.141
0.379	0.380	1.353
0.378	0.366	1.623

-0.531	-0.409	-3.651
-0.524	-0.387	-3.975
-0.517	-0.365	-4.298
-0.510	-0.343	-4.621
-0.502	-0.321	-4.945
-0.495	-0.299	-5.269
-0.488	-0.277	-5.592
-0.481	-0.255	-5.916
-0.474	-0.233	-6.241
-0.467	-0.211	-6.565
-0.460	-0.188	-6.889
-0.453	-0.166	-7.214
-0.446	-0.144	-7.538
-0.439	-0.122	-7.863
-0.432	-0.100	-8.188
-0.425	-0.078	-8.513
-0.418	-0.056	-8.839
-0.411	-0.034	-9.164

0.377	0.353	1.891
0.376	0.340	2.158
0.375	0.326	2.426
0.374	0.313	2.694
0.374	0.299	2.961
0.373	0.286	3.229
0.372	0.272	3.497
0.371	0.259	3.766
0.370	0.246	4.034
0.369	0.232	4.302
0.368	0.219	4.571
0.367	0.205	4.839
0.366	0.192	5.108
0.365	0.178	5.377
0.364	0.165	5.646
0.363	0.151	5.915
0.362	0.138	6.184
0.361	0.125	6.453

-0.404	-0.012	-9.489
-0.397	0.010	-9.815
-0.390	0.032	-10.141
-0.383	0.054	-10.467
-0.376	0.076	-10.793
-0.369	0.099	-11.119
-0.362	0.121	-11.445
-0.355	0.143	-11.772
-0.348	0.165	-12.098
-0.341	0.187	-12.425
-0.334	0.209	-12.752
-0.332	0.214	-12.805
-0.337	0.203	-12.650
-0.341	0.191	-12.504
-0.346	0.180	-12.358
-0.350	0.168	-12.212
-0.355	0.157	-12.066
-0.359	0.145	-11.919

0.360	0.111	6.723
0.359	0.098	6.992
0.358	0.084	7.262
0.357	0.071	7.531
0.356	0.057	7.801
0.355	0.044	8.071
0.354	0.030	8.341
0.353	0.017	8.612
0.352	0.004	8.882
0.351	-0.010	9.152
0.350	-0.023	9.423
0.351	-0.029	9.527
0.352	-0.026	9.504
0.354	-0.024	9.487
0.356	-0.021	9.469
0.357	-0.018	9.452
0.359	-0.016	9.435
0.360	-0.013	9.418

-0.364	0.134	-11.773
-0.368	0.122	-11.627
-0.373	0.111	-11.481
-0.377	0.099	-11.334
-0.382	0.088	-11.188
-0.386	0.076	-11.041
-0.390	0.064	-10.895
-0.395	0.053	-10.748
-0.399	0.041	-10.602
-0.404	0.030	-10.455
-0.408	0.018	-10.308
-0.413	0.007	-10.161
-0.417	-0.005	-10.014
-0.422	-0.016	-9.867
-0.426	-0.028	-9.720
-0.431	-0.039	-9.573
-0.435	-0.051	-9.426
-0.440	-0.062	-9.278

0.362	-0.011	9.401
0.364	-0.008	9.384
0.365	-0.006	9.366
0.367	-0.003	9.349
0.368	-0.001	9.332
0.370	0.002	9.315
0.372	0.005	9.298
0.373	0.007	9.280
0.375	0.010	9.263
0.376	0.012	9.246
0.378	0.015	9.229
0.380	0.017	9.211
0.381	0.020	9.194
0.383	0.022	9.177
0.384	0.025	9.160
0.386	0.028	9.142
0.388	0.030	9.125
0.389	0.033	9.108

-0.444	-0.074	-9.131
-0.449	-0.085	-8.984
-0.453	-0.097	-8.836
-0.458	-0.108	-8.689
-0.462	-0.120	-8.541
-0.467	-0.131	-8.394
-0.473	-0.141	-8.321
-0.483	-0.147	-8.431
-0.493	-0.153	-8.530
-0.503	-0.159	-8.629
-0.514	-0.164	-8.728
-0.524	-0.170	-8.827
-0.534	-0.176	-8.926
-0.544	-0.182	-9.026
-0.554	-0.188	-9.125
-0.565	-0.193	-9.224
-0.575	-0.199	-9.323
-0.585	-0.205	-9.423

0.391	0.035	9.090
0.392	0.038	9.073
0.394	0.040	9.056
0.396	0.043	9.038
0.397	0.046	9.021
0.399	0.048	9.004
0.399	0.048	9.003
0.393	0.041	9.043
0.387	0.033	9.080
0.381	0.026	9.118
0.376	0.019	9.155
0.370	0.011	9.193
0.364	0.004	9.230
0.358	-0.003	9.268
0.352	-0.011	9.305
0.347	-0.018	9.343
0.341	-0.025	9.381
0.335	-0.033	9.418

-0.595	-0.211	-9.522
-0.606	-0.216	-9.622
-0.616	-0.222	-9.721
-0.626	-0.228	-9.821
-0.636	-0.234	-9.920
-0.647	-0.239	-10.020
-0.657	-0.245	-10.119
-0.667	-0.251	-10.219
-0.677	-0.257	-10.319
-0.688	-0.262	-10.418
-0.698	-0.268	-10.518
-0.708	-0.274	-10.618
-0.718	-0.280	-10.718
-0.729	-0.285	-10.818
-0.739	-0.291	-10.918
-0.749	-0.297	-11.018
-0.759	-0.303	-11.118
-0.770	-0.308	-11.218

0.329	-0.040	9.456
0.324	-0.048	9.493
0.318	-0.055	9.531
0.312	-0.062	9.569
0.306	-0.070	9.606
0.301	-0.077	9.644
0.295	-0.084	9.682
0.289	-0.092	9.719
0.283	-0.099	9.757
0.278	-0.106	9.795
0.272	-0.114	9.833
0.266	-0.121	9.870
0.260	-0.128	9.908
0.255	-0.136	9.946
0.249	-0.143	9.984
0.243	-0.151	10.022
0.237	-0.158	10.059
0.232	-0.165	10.097

-0.780	-0.314	-11.318
-0.790	-0.320	-11.418
-0.778	-0.298	-11.654
-0.767	-0.276	-11.878
-0.755	-0.255	-12.101
-0.744	-0.233	-12.325
-0.732	-0.211	-12.549
-0.721	-0.189	-12.773
-0.709	-0.168	-12.997
-0.698	-0.146	-13.221
-0.686	-0.124	-13.446
-0.675	-0.102	-13.670
-0.663	-0.081	-13.895
-0.652	-0.059	-14.119
-0.640	-0.037	-14.344
-0.629	-0.015	-14.569
-0.617	0.006	-14.793
-0.606	0.028	-15.018

0.226	-0.173	10.135
0.220	-0.180	10.173
0.221	-0.174	10.038
0.221	-0.167	9.918
0.222	-0.161	9.798
0.223	-0.154	9.678
0.223	-0.148	9.558
0.224	-0.142	9.438
0.224	-0.135	9.318
0.225	-0.129	9.198
0.226	-0.122	9.078
0.226	-0.116	8.958
0.227	-0.110	8.837
0.228	-0.103	8.717
0.228	-0.097	8.597
0.229	-0.090	8.476
0.230	-0.084	8.356
0.230	-0.078	8.236

-0.594	0.050	-15.243
-0.583	0.072	-15.469
-0.571	0.093	-15.694
-0.560	0.115	-15.919
-0.548	0.137	-16.145
-0.537	0.159	-16.370
-0.525	0.180	-16.596
-0.514	0.202	-16.821
-0.502	0.224	-17.047
-0.490	0.246	-17.273
-0.479	0.268	-17.499
-0.467	0.289	-17.725
-0.456	0.311	-17.951
-0.444	0.333	-18.177
-0.433	0.355	-18.404
-0.430	0.351	-18.238
-0.431	0.339	-17.995
-0.432	0.327	-17.755

0.231	-0.071	8.115
0.232	-0.065	7.994
0.232	-0.058	7.874
0.233	-0.052	7.753
0.233	-0.046	7.632
0.234	-0.039	7.511
0.235	-0.033	7.391
0.235	-0.026	7.270
0.236	-0.020	7.149
0.237	-0.014	7.028
0.237	-0.007	6.907
0.238	-0.001	6.785
0.239	0.006	6.664
0.239	0.012	6.543
0.240	0.018	6.422
0.239	0.019	6.416
0.238	0.017	6.433
0.236	0.015	6.448

-0.432	0.314	-17.515
-0.433	0.302	-17.275
-0.434	0.290	-17.035
-0.434	0.278	-16.795
-0.435	0.266	-16.555
-0.436	0.254	-16.314
-0.436	0.241	-16.074
-0.437	0.229	-15.833
-0.438	0.217	-15.593
-0.438	0.205	-15.352
-0.439	0.193	-15.111
-0.439	0.181	-14.870
-0.440	0.168	-14.629
-0.441	0.156	-14.388
-0.441	0.144	-14.147
-0.442	0.132	-13.905
-0.443	0.120	-13.664
-0.443	0.108	-13.422

0.235	0.013	6.464
0.234	0.011	6.480
0.233	0.009	6.496
0.231	0.007	6.511
0.230	0.005	6.527
0.229	0.003	6.543
0.228	0.001	6.558
0.226	-0.001	6.574
0.225	-0.003	6.590
0.224	-0.004	6.606
0.222	-0.006	6.622
0.221	-0.008	6.637
0.220	-0.010	6.653
0.219	-0.012	6.669
0.217	-0.014	6.685
0.216	-0.016	6.701
0.215	-0.018	6.716
0.213	-0.020	6.732

-0.444	0.096	-13.181
-0.445	0.083	-12.939
-0.445	0.071	-12.697
-0.446	0.059	-12.455
-0.446	0.047	-12.213
-0.447	0.035	-11.971
-0.448	0.023	-11.728
-0.448	0.010	-11.486
-0.449	-0.002	-11.243
-0.450	-0.014	-11.001
-0.449	-0.018	-10.909
-0.446	-0.015	-10.932
-0.443	-0.011	-10.949
-0.440	-0.008	-10.967
-0.437	-0.004	-10.985
-0.434	-0.001	-11.002
-0.431	0.003	-11.020
-0.428	0.006	-11.038

0.212	-0.022	6.748
0.211	-0.024	6.764
0.210	-0.026	6.780
0.208	-0.028	6.795
0.207	-0.029	6.811
0.206	-0.031	6.827
0.204	-0.033	6.843
0.203	-0.035	6.859
0.202	-0.037	6.875
0.201	-0.039	6.891
0.199	-0.040	6.883
0.197	-0.041	6.857
0.195	-0.042	6.831
0.193	-0.042	6.806
0.191	-0.043	6.781
0.189	-0.044	6.756
0.188	-0.044	6.730
0.186	-0.045	6.705

-0.426	0.010	-11.055
-0.423	0.013	-11.073
-0.420	0.017	-11.091
-0.417	0.020	-11.108
-0.414	0.024	-11.126
-0.411	0.028	-11.144
-0.408	0.031	-11.161
-0.405	0.035	-11.179
-0.402	0.038	-11.197
-0.400	0.042	-11.214
-0.397	0.045	-11.232
-0.394	0.049	-11.250
-0.391	0.052	-11.268
-0.388	0.056	-11.285
-0.385	0.059	-11.303
-0.382	0.063	-11.321
-0.379	0.066	-11.338
-0.377	0.070	-11.356

0.184	-0.045	6.680
0.182	-0.046	6.654
0.180	-0.047	6.629
0.178	-0.047	6.604
0.176	-0.048	6.578
0.174	-0.049	6.553
0.172	-0.049	6.527
0.170	-0.050	6.502
0.168	-0.051	6.477
0.166	-0.051	6.451
0.164	-0.052	6.426
0.163	-0.052	6.400
0.161	-0.053	6.375
0.159	-0.054	6.349
0.157	-0.054	6.324
0.155	-0.055	6.298
0.153	-0.056	6.273
0.151	-0.056	6.247

-0.374	0.073	-11.374
-0.371	0.077	-11.392
-0.368	0.080	-11.410
-0.365	0.084	-11.427
-0.362	0.087	-11.445

0.149	-0.057	6.222
0.147	-0.058	6.196
0.145	-0.058	6.171
0.143	-0.059	6.145
0.141	-0.060	6.120

## **BIODATA PENULIS**



Ilham Amirul Akbar, anak pertama dari dua bersaudara pasangan Bapak Deny Setiawan dan Ibu Dewi Viska. Kedua orangtua berasal dari Kota Bandung Provinsi Jawa Barat. Penulis lahir di Kota Bandung pada tanggal 28 Oktober 1994. Pendidikan penulis berawal dari TK Darul Hikam III Kabupaten Bandung, SDIT Imam Bukhari Kabupaten Sumedang, MTs Husnul Khotimah Kabupaten Kuningan, SMAN 3 Bandung dan melanjutkan kuliah di Jurusan S1 Teknik Fisika, FTI-ITS Surabaya pada tahun 2013-2017. Penulis dapat dihubungi melalui email [amirulhams@gmail.com](mailto:amirulhams@gmail.com) karena penulis sangat terbuka dengan pertanyaan, kritik dan saran untuk menjadi lebih baik lagi dan bermanfaat bagi orang lain.