



**OPTIMALISASI DAYA KELUARAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK  
TENAGA ANGIN DENGAN MENGGUNAKAN ALGORITMA  
*INCREMENTAL CONDUCTANCE* BERBASIS *FUZZY LOGIC***

**SKRIPSI**

Oleh

**Sita Agustina**

**NIM 151910201085**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER**

**2019**

DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>HALAMAN SAMPUL</b> .....	<b>i</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	<b>ii</b>
<b>HALAMAN MOTTO</b> .....	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	<b>v</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	<b>vi</b>
<b>RINGKASAN</b> .....	<b>viii</b>
<b>PRAKATA</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xviii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xix</b>
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3 Batasan Masalah</b> .....	<b>4</b>
<b>1.4 Tujuan Penelitian</b> .....	<b>4</b>
<b>1.5 Manfaat Penelitian</b> .....	<b>5</b>
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSAKA</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1 Sistem Konversi Energi Angin</b> .....	<b>6</b>
2.1.1 Turbin Angin .....	<b>6</b>
2.1.2 Sudut <i>Pitch</i> pada Bilah Turbin Angin.....	<b>10</b>
2.1.3 Sistem <i>Variable-speed</i> SKEA.....	<b>10</b>
<b>2.2 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)</b> .....	<b>12</b>
<b>2.3 DC-DC Converter</b> .....	<b>14</b>
<b>2.4 Maximum Power Point Tracking (MPPT)</b> .....	<b>17</b>
<b>2.5 Algoritma Incremental Conductance</b> .....	<b>19</b>
<b>2.6 Pulse Width Modulation (PWM)</b> .....	<b>20</b>
<b>2.7 Logika Fuzzy</b> .....	<b>21</b>

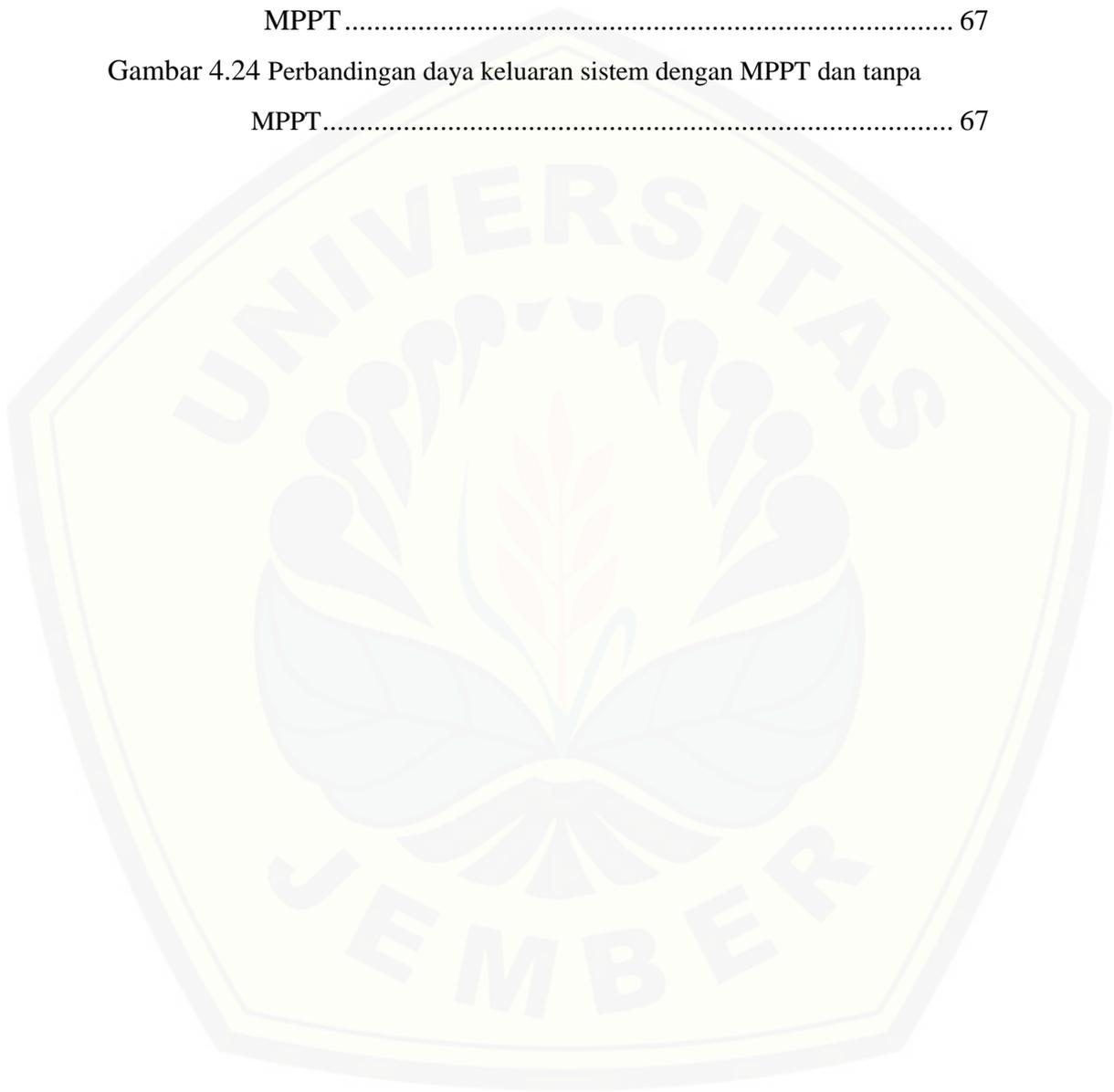
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 Tempat dan Waktu Penelitian .....</b>	<b>24</b>
3.1.1 Tempat Penelitian .....	24
3.1.2 Waktu Penelitian .....	24
<b>3.2 Prosedur Penelitian .....</b>	<b>24</b>
<b>3.3 Diagram Alir Penelitian .....</b>	<b>26</b>
<b>3.4 Blok Diagram Sistem .....</b>	<b>27</b>
<b>3.5 Pemodelan Turbin Angin .....</b>	<b>28</b>
<b>3.6 Pemodelan PMSG .....</b>	<b>31</b>
<b>3.7 Perancangan <i>Buck-boost Converter</i> .....</b>	<b>32</b>
<b>3.8 Perancangan <i>Fuzzy Logic Control (FLC)</i> .....</b>	<b>34</b>
<b>3.9 Algoritma MPPT .....</b>	<b>38</b>
<b>BAB 4. ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1 Tegangan yang dihasilkan generator .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2 Daya yang dihasilkan generator .....</b>	<b>44</b>
<b>4.3 Pengujian <i>Buck-boost Converter</i> .....</b>	<b>45</b>
<b>4.4 Perancangan Sistem Kontrol <i>Fuzzy Logic</i> .....</b>	<b>51</b>
4.4.1 Desain <i>Fuzzy</i> MPPT Algoritma <i>Incremental</i> <i>Conductance</i> .....	52
<b>4.5 Pengujian Implementasi MPPT <i>Incremental Conductance</i> .....</b>	<b>56</b>
<b>4.6 Pengaruh Kecepatan Angin terhadap Daya MPPT .....</b>	<b>58</b>
<b>4.7 Pengaruh Resistansi Beban terhadap Daya MPPT .....</b>	<b>60</b>
<b>4.8 Efisiensi Daya pada beban Baterai .....</b>	<b>64</b>
<b>4.9 Perbandingan Hasil Simulasi .....</b>	<b>65</b>
4.9.1 Perbandingan Efisiensi Daya MPPT Dengan Daya Tanpa MPPT .....	68
<b>BAB 5. PENUTUP .....</b>	<b>69</b>
<b>5.1 Kesimpulan .....</b>	<b>69</b>
<b>5.2 Saran .....</b>	<b>69</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>70</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>73</b>

**DAFTAR GAMBAR**

Gambar 2.1 Sistem Konversi Energi Angin secara umum .....	6
Gambar 2.2 Karakteristik Daya Mekanik Turbin Angin .....	9
Gambar 2.3 Baling-baling Turbin Angin Tipe Horizontal-Axis .....	10
Gambar 2.4 Sistem <i>Variable Speed</i> dengan Generator Sinkron Magnet Permanen .....	11
Gambar 2.5 Kumparan 3-fasa dan tegangan yang dibangkitkan .....	14
Gambar 2.6 Rangkaian <i>Buck-Boost Converter</i> .....	15
Gambar 2.7 Siklus Kerja <i>Buck – Boost Converter</i> pada saat <i>switch ON</i> . 16	
Gambar 2.8 Siklus Kerja <i>Buck – Boost Converter</i> pada saat <i>switch OFF</i> 16	
Gambar 2.9 Grafik <i>Incremental conductance</i> .....	20
Gambar 2.10 Kerja PWM .....	21
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	26
Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem MPPT pada Turbin Angin .....	27
Gambar 3.3 (a) Blok Turbin Angin (b) Blok Subsistem Turbin Angin ...	29
Gambar 3.4 Kurva Karakteristik Daya Pada <i>Wind Turbine</i> .....	30
Gambar 3.5 Blok PMSG .....	31
Gambar 3.6 Preset Model <i>Permanent Magnet Synchronous Machine</i> ....	31
Gambar 3.7 Nilai Parameter <i>Permanent Magnet Synchronous Machine</i> 32	
Gambar 3.8 Blok Diagram <i>Fuzzy Logic Controller</i> .....	35
Gambar 3.9 (a) <i>Membership Function</i> untuk E; (b) <i>Membership Function</i> untuk CE; (c) <i>Membership Function</i> untuk <i>Duty Ratio</i> .....	36
Gambar 3.10 Blok diagram <i>Fuzzy Logic Control (FLC)</i> pada kontrol MPPT .....	37
Gambar 3.11 Kurva Region Arus dan Tegangan .....	39
Gambar 3.12 Diagram Alir Algoritma <i>Incremental Conductance</i> .....	39
Gambar 4.1 Grafik tegangan generator saat kecepatan angin sebesar 2.51 m/s .....	42
Gambar 4.2 Grafik tegangan generator saat kecepatan angin sebesar 3.77 m/s .....	43

Gambar 4.3 Grafik tegangan generator saat kecepatan angin sebesar 6.28 m/s .....	43
Gambar 4.4 Grafik tegangan generator saat kecepatan angin sebesar 8.79 m/s .....	44
Gambar 4.5 Grafik tegangan generator saat kecepatan angin sebesar 10.05 m/s .....	44
Gambar 4.6 Grafik daya generator saat kecepatan angin sebesar 10.05 m/s .....	44
Gambar 4.7 Pengaruh <i>Duty cycle</i> terhadap <i>Vout Converter</i> .....	50
Gambar 4.8 Pengaruh <i>Duty cycle</i> terhadap <i>Iout Converter</i> .....	51
Gambar 4.9 Pengaruh <i>Duty cycle</i> terhadap <i>Pout Converter</i> .....	51
Gambar 4.10 Blok <i>Fuzzy Logic Controller</i> pada <i>Simulink Matlab</i> .....	52
Gambar 4.11 Blok <i>Input Fuzzy Algoritma Incremental Conductance</i> ...	53
Gambar 4.12 Plot <i>Membership Function Variable Input</i> ; (a) <i>Input</i> <i>Variable Error</i> ; (b) <i>Input Variable Delta Error</i> .....	54
Gambar 4.13 Plot <i>Membership Function Variable Duty ratio</i> .....	55
Gambar 4.14 Hubungan antara Tegangan, Arus, dan Daya terhadap masukan kecepatan angin, tanpa menggunakan Algoritma <i>Incremental Conductance</i> .....	59
Gambar 4.15 Hubungan antara Tegangan, Arus, dan Daya terhadap masukan kecepatan angin, dengan menggunakan Algoritma <i>Incremental Conductance</i> .....	60
Gambar 4.16 Pengaruh Beban Resistansi terhadap arus, tegangan, daya keluaran.....	61
Gambar 4.17 Grafik pengaruh kecepatan angin dan besar beban yang digunakan terhadap tegangan yang dihasilkan .....	61
Gambar 4.18 Grafik pengaruh kecepatan angin dan besar beban yang digunakan terhadap arus yang dihasilkan .....	61
Gambar 4.19 Grafik pengaruh kecepatan angin dan besar beban yang digunakan terhadap daya yang dihasilkan .....	61
Gambar 4.20 Gelombang tegangan <i>Battery Lead Acid 48 V 100 Ah</i> .....	65

Gambar 4.21 Gelombang arus <i>Battery Lead Acid</i> 48 V 100 Ah.....	65
Gambar 4.22 Perbandingan tegangan keluaran sistem dengan MPPT dan tanpa MPPT .....	66
Gambar 4.23 Perbandingan arus keluaran sistem dengan MPPT dan tanpa MPPT .....	67
Gambar 4.24 Perbandingan daya keluaran sistem dengan MPPT dan tanpa MPPT.....	67



**DAFTAR TABEL**

Tabel 3.1 Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	24
Tabel 3.2 Data Parameter Turbin Angin .....	30
Tabel 3.3 Spesifikasi <i>Buck-boost converter</i> .....	33
Tabel 3.4 <i>Rule Base Fuzzy Logic Controller</i> .....	37
Tabel 4.1 Data Pengujian <i>Buck-boost Converter</i> pada beban 25 $\Omega$ .....	45
Tabel 4.2 Data Pengujian <i>Buck-boost Converter</i> pada beban 50 $\Omega$ .....	47
Tabel 4.3 Data Pengujian <i>Buck-boost Converter</i> pada beban 75 $\Omega$ .....	47
Tabel 4.2 Data Pengujian <i>Buck-boost Converter</i> pada beban 100 $\Omega$ ....	47
Tabel 4.5 <i>Rule base Algoritma Incremental conductance</i> .....	56
Tabel 4.6 Daya beban saat Kecepatan Angin 2.51 m/s.....	56
Tabel 4.7 Daya beban saat Kecepatan Angin 3.77 m/s.....	57
Tabel 4.8 Daya beban saat Kecepatan Angin 6.28 m/s.....	57
Tabel 4.9 Daya beban saat Kecepatan Angin 8.79 m/s.....	57
Tabel 4.10 Daya beban saat Kecepatan Angin 10.05 m/s.....	57
Tabel 4.11 Data Pengujian pengaruh kecepatan angin dengan MPPT <i>Algoritma Incremental Conductance</i> .....	58
Tabel 4.12 Data Pengujian pengaruh kecepatan angin tanpa menggunakan MPPT.....	58
Tabel 4.13 Data Pengujian Pengaruh Resistansi beban terhadap arus, tegangan, dan daya keluaran .....	60
Tabel 4.14 Efisiensi Daya MPPT menggunakan beban Baterai .....	64
Tabel 4.15 Efisiensi Daya MPPT menggunakan beban resistif .....	68

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam era globalisasi seperti sekarang ini, tentu manusia tidak dapat terlepas dari kebutuhannya akan sumber energi listrik. Kebutuhan yang semakin meningkat seiring berjalannya waktu ini menyebabkan ketidakseimbangan antara kebutuhan dan ketersediaan energi itu sendiri. Selama ini, sumber energi listrik yang digunakan merupakan pengkonversian dari sumber energi fosil menjadi energi listrik. Ketersediaan bahan bakar fosil yang ada di bumi pun semakin lama akan semakin menipis seiring dengan meningkatnya kebutuhan manusia akan bahan bakar tersebut. Oleh karena itu, keberadaan sumber energi terbarukan sangat dibutuhkan guna menjadi energi alternatif pengganti bahan bakar fosil yang ketersediaannya sudah mulai menipis. Pemanfaatan sumber daya energi terbarukan diharapkan dapat memenuhi kebutuhan manusia akan energi listrik, salah satu sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan serta ramah lingkungan yaitu Energi Angin. Energi Angin merupakan salah satu sumber energi yang ketersediannya tidak terbatas di muka bumi.

Energi angin mempunyai potensi yang cukup besar untuk dimanfaatkan menjadi energi listrik di Indonesia. Dalam memenuhi kebutuhan tersebut maka diperlukan instalasi turbin angin sebagai piranti untuk mengkonversi energi angin menjadi energi listrik. Pemanfaatan energi angin di Indonesia seringkali mengalami beberapa kendala yang disebabkan oleh Indonesia menghadapi beberapa kendala, terutama disebabkan oleh rendahnya kecepatan angin rata-rata yang hanya berkisar antara 2,5 – 6 m/s. Di sisi lain turbin angin yang tersedia di pasaran sejauh ini disesuaikan dengan kondisi asal negara pembuatnya, dimana kecepatan angin rata-ratanya cukup tinggi (diatas 8 m/s). Oleh karena itu guna pemanfaatan energi angin di Indonesia yang lebih maksimal perlu dilakukan pengembangan perancangan turbin angin yang mampu beroperasi pada kecepatan angin rendah (Ismoyo, 2009).

Hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) pada 120 lokasi menunjukkan, beberapa wilayah memiliki kecepatan angin di atas

5 m/s, diantaranya adalah Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan Pantai Selatan Jawa (LAPAN. 2005).

Seiring dengan berkembangnya teknologi elektronika daya, sistem konversi energi angin dilakukan semaksimal mungkin untuk setiap kecepatan angin yang berubah-ubah, sistem turbin angin seperti ini dikenal dengan istilah sistem turbin angin *variable speed*. *Variable-speed* sistem konversi energi angin dapat diaplikasikan pada *Wound Rotor Induction Generator* (WRIG atau tipe 2 generator) yang memiliki resistansi rotor variabel, yang dapat diubah untuk mengontrol slip, *Doubly-Fed Induction Generator* (DFIG atau tipe 3 generator) dan generator sinkron konverter skala penuh atau disebut sebagai tipe 4 generator (Inderpreet, 2011).

Pemanfaatan energi angin di Indonesia dapat dikatakan belum diberdayakan secara optimal, hal itu salah satunya disebabkan karena kecepatan angin yang relatif berubah dengan cepat sehingga daya yang dihasilkan kurang maksimal. Untuk mengekstraksi daya maksimum dari angin yang berfluktuasi, diperlukan *variable-speed* turbin angin dalam pengoperasian generatornya, sehingga membutuhkan suatu pengontrolan yang canggih. Dalam mengatasi hal tersebut, berdasarkan penelitian sebelumnya, Pembangkit Listrik Tenaga Angin yang dilengkapi dengan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) dikatakan dapat mengoptimalkan daya keluaran dari turbin angin sehingga dapat menghasilkan daya maksimum. Dalam implementasi *Maximum Power Point Tracking* ini sendiri, sering kali menggunakan jenis algoritma. Secara umum, yang paling sering digunakan antara lain *Perturb Observe*, *Incremental Conductance*, Algoritma MPPT yang digunakan secara umum antara lain *Perturb and Observe* (P&O), *Incremental Conductance*, dan lain sebagainya.

Algoritma MPPT ini diimplementasikan pada suatu rangkaian DC-DC *converter* yang berfungsi sebagai rangkaian pengendali titik kerja *wind turbine*. Ada beberapa jenis rangkaian DC-DC *converter*, seperti *Boost Converter*, *Buck Converter*, *Buck-Boost Converter*, dan *Cuk Converter*. Tiap jenis *converter* memiliki fungsi dan karakteristik masing-masing. (Hamami A. Zaini, 2016)

Pada penelitian sebelumnya oleh “**Muhammad Otong dan Rifai Mardanie Bajuri**” 2016 dengan judul penelitian *Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin menggunakan Buck-Boost Converter*. Pada penelitian ini, *Tracking* daya maksimum pada pembangkit listrik tenaga angin dilakukan untuk pengisian (*charging*) ke baterai dengan MPPT yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *Perturb and Observe*. Penelitian ini mampu menunjukkan bahwa daya yang mampu ditransfer dari pembangkit ke baterai dengan menggunakan MPPT lebih besar dibandingkan tanpa MPPT. Namun, hal ini hanya berlaku pada kecepatan angin dibawah 6 m/s. Sedangkan pada kecepatan angin diatas 6 m/s pembangkit listrik tenaga angin yang dilengkapi MPPT tidak mampu menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan dengan sistem yang tidak dilengkapi dengan MPPT.

Pada penelitian sebelumnya, pembangkit listrik tenaga angin hanya dikendalikan dengan menggunakan Algoritma MPPT *Perturb and Observe*, sehingga pada penelitian yang akan saya kembangkan yaitu dengan pengoptimalisasian daya keluaran dengan menggunakan algoritma *Incremental Conductance* (keluarga *Hill Climbing*) berbasis kontrol *Fuzzy Logic* dalam menjejak daya maksimum. Diharapkan dengan menggunakan *Fuzzy Logic Controller* dengan Algoritma MPPT *Incremental Conductance* daya yang dihasilkan maksimal. Implementasi kontrol diterapkan untuk mengoptimasi daya keluaran dari turbin angin menggunakan *buck-boost converter*.

Penelitian ini memfokuskan pada desain dari algoritma MPPT turbin angin dengan menggunakan algoritma *Incremental Conductance* untuk nantinya dapat diketahui apakah Algoritma *Incremental Conductance* dengan kontrol *Fuzzy Logic* dapat mencapai MPPT secara efektif dan diharapkan dapat menghasilkan efisiensi daya yang lebih baik dibandingkan dengan tanpa menggunakan Algoritma MPPT. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software* Matlab yang disusun untuk menguji algoritma MPPT berbasis kontrol *Fuzzy Logic*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah diuraikan diatas dapat ditarik beberapa permasalahan yaitu :

1. Bagaimana perancangan simulasi kontrol pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin menggunakan Algoritma *Incremental Conductance* berbasis *Fuzzy Logic* dalam mengendalikan daya maksimum?
2. Bagaimana kestabilan kerja dari Algoritma *Incremental Conductance* dalam mencapai titik daya maksimum?
3. Bagaimana perbandingan efisiensi daya yang didapatkan dengan menggunakan MPPT dan tanpa menggunakan MPPT?

## 1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah penelitian diatas, supaya pembahasan tidak terlalu luas maka diperlukan suatu pembatasan masalah yaitu :

1. Tidak membahas konstruksi dari sudut pitch bilah turbin angin.
2. Tidak membahas detail tentang turbin angin dan generator
3. Algoritma MPPT yang digunakan yaitu *Incremental Conductance*.
4. Membahas *Fuzzy Logic* sebagai pengendali daya *output* maksimum.
5. Tidak melakukan rancang bangun.
6. Model sistem disimulasikan dengan MATLAB/SIMULINK.

## 1.4 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah, tujuan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Merancang *simulink* kontrol pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin MPPT menggunakan Algoritma *Incremental Conductance* berbasis *Fuzzy Logic*.
2. Mengetahui kestabilan kerja dari Algoritma *Incremental Conductance* dalam mencapai titik daya maksimum?
3. Mengetahui perbandingan efisiensi daya yang didapatkan dengan menggunakan MPPT dan tanpa menggunakan MPPT.

### 1.5 Manfaat Penelitian

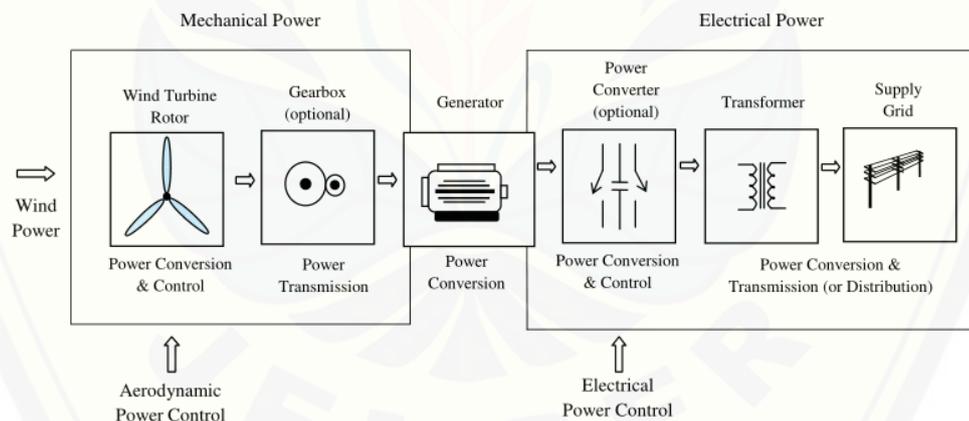
Adapun manfaat yang diharapkan dapat tercapai, dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Memanfaatkan sumber energi angin yang melimpah, sebagai energi terbarukan yang ramah lingkungan
2. Untuk mengetahui keandalan algoritma *Incremental Conductance* dalam melakukan tracking daya yang lebih baik dibandingkan dengan tanpa menggunakan algoritma.
3. Dapat digunakan sebagai literatur pada saat melakukan implementasi / perancangan sebuah pembangkit listrik tenaga angin agar daya yang diperoleh maksimal.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Sistem Konversi Energi Angin (SKEA)

SKEA menghasilkan listrik dengan menggunakan kekuatan angin untuk menggerakkan sebuah generator listrik. Konversi energi kinetik dari aliran udara yang masuk ke dalam energi listrik berlangsung dalam dua langkah: perangkat ekstraksi, yaitu rotor turbin angin menangkap gerakan tenaga angin dengan *blades* yang berputar dan mengubahnya menjadi energi mekanik, yang akan menggerakkan rotor generator. Generator ini kemudian mengubah tenaga mekanik menjadi tenaga listrik. Sebuah *gear box* dapat digunakan untuk menyesuaikan kecepatan rotasi dari rotor turbin angin yang sesuai untuk generator. Daya listrik ini kemudian ditransfer ke jaringan melalui sebuah transformator. Sambungan dari turbin angin ke grid diperbolehkan di berbagai tingkat tegangan, dengan tingkat umum adalah 600-700 V. Daya konverter elektronika juga dapat digunakan untuk ekstraksi daya ditingkatkan dan variabel kecepatan operasi dari turbin angin.



Gambar 2.1 Sistem konversi energi angin secara umum (Sumber: Inderpreet, 2011)

#### 2.1.1 Turbin Angin

Angin adalah udara bergerak yang terjadi karena pemanasan tidak merata oleh matahari terhadap permukaan bumi. Gerakan udara adalah energi kinetik angin yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, seperti penggerak generator pembangkit listrik melalui sistem konversi dengan turbin angin.

Turbin angin atau kincir angin merupakan alat pengubah sumber energi alternatif berupa angin yang ramah lingkungan. Prinsip kerjanya mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik (rotasi) selanjutnya digunakan sebagai penggerak generator listrik. Pada turbin angin, jumlah daya angin yang ditangkap turbin tergantung kepada ukuran baling-baling turbin dan kecepatan angin. Daya angin yang dirumuskan dengan persamaan:

$$P_w = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho v^3 \dots\dots\dots (2.1)$$

Pada rumus tersebut R adalah jari-jari turbin angin,  $\rho$  densitas udara dan v kecepatan angin. Daya mekanik yang dihasilkan turbin dirumuskan dengan persamaan :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \pi \rho R^2 v^3 \dots\dots\dots (2.2)$$

Berdasarkan Bezt limit, efisiensi turbin angin maksimum adalah 0.57. Nilai efisiensi ini ditentukan oleh koefisien daya dan *Tip Speed Ratio* (TSR). Koefisien daya adalah rasio daya mekanik pada turbin dengan daya angin yang ditangkap oleh baling-baling turbin dan TSR merupakan rasio kecepatan baling-baling turbin dengan kecepatan angin, yang dijabarkan dalam persamaan :

$$C_p = \frac{P_m}{P_{wt}} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\lambda = \frac{\omega_w R}{v} \dots\dots\dots (2.4)$$

Berdasarkan rumus  $C_p$  adalah Koefisien daya,  $\lambda$  *Tip Speed Ratio* (TSR) dan  $\omega_w$  merupakan kecepatan angular turbin. Koefisien daya turbin angin adalah pengukuran efisien turbin angin mengubah daya mekanik menjadi daya listrik:

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{P_{mekanik}}{P_{elektrik}} \\ &= \frac{P_{mekanik}}{\frac{1}{2} \rho AV^3} \\ &= \frac{P_{mekanik}}{\frac{1}{2} \rho \pi r^2 V^3} \dots\dots\dots (2.5) \end{aligned}$$

Keterangan:

$C_p$  = Koefisien turbin angin

$\rho$  = Massa jenis udara atau kerapatan udara ( $Kg/m^3$ )

A = Diameter *blade* atau daerah *swept* dari rotor ( $m^2$ )

V = Kecepatan angin (m/s)

Hubungan antara daya mekanik dengan koefisien daya dan TSR dijabarkan dalam persamaan:

$$P_m = \frac{1}{2} \pi \rho C_p(\lambda, \beta) R^2 V^3 \dots\dots\dots (2.6)$$

Berdasarkan rumus  $\rho$ ,  $\lambda$  dan R adalah kepadatan udara, *Tip Speed Ratio* (TSR) dan jari-jari pisau turbin angin, masing-masing.  $\beta$  merupakan sudut baling-baling turbin terhadap arah angin. Daya mekanik merupakan daya yang akan ditransfer ke generator. Nilai koefisien daya ditentukan oleh TSR dan sudut baling-baling turbin. Hubungan antara TSR, koefisien daya dan sudut baling-baling turbin dinyatakan dengan persamaan:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \dots\dots\dots (2.8)$$

Berdasarkan rumus c sampai 6 c merupakan konstanta. Nilai TSR ditentukan oleh kecepatan putaran turbin dan kecepatan angin. Nilai koefisien daya dan TSR bervariasi pada satu kecepatan angin, tergantung kepada putaran turbin. Torka mekanik yang digunakan untuk memutar generator ditentukan oleh kecepatan putaran turbin dan daya mekanik turbin, yang dijabarkan dengan persamaan :

$$T_m = \frac{1}{2} C_T \cdot \pi \cdot \rho \cdot R^3 v^2 \dots\dots\dots (2.9)$$

Persamaan daya dan torka mekanik pada turbin angin yang menggunakan *gearbox* adalah sebagai berikut:

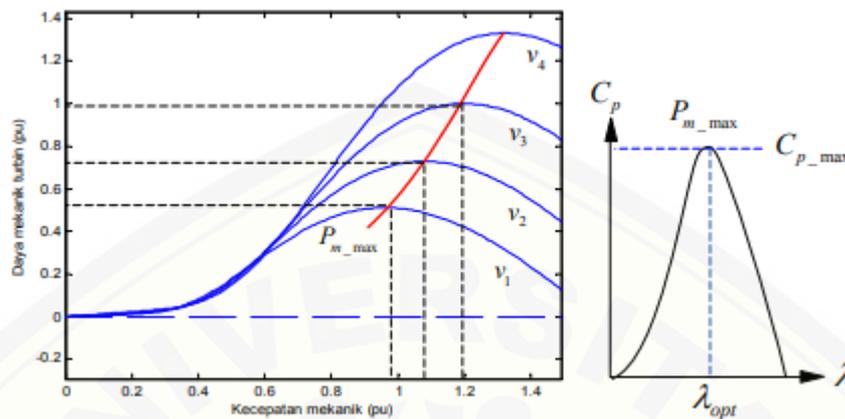
$$P_m = \omega_m \frac{T_{shaft}}{\eta_{gear}} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$T_m = \frac{T_{shaft}}{\eta_{gear}} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$\omega_m = \omega_w \eta_{gear} \dots\dots\dots (2.12)$$

Berdasarkan rumus Tshaft adalah torka mekanik pada poros kecepatan rendah, Tm adalah torka mekanik pada poros generator,  $\omega_w$  kecepatan angular turbin,  $\omega_m$  kecepatan mekanik poros generator dan  $\eta_{gear}$  efisiensi *gearbox*. Tenaga mekanik dari turbin angin bervariasi pada setiap perubahan kecepatan angin dan memiliki titik maksimum pada kecepatan tertentu generator.

Maksimum  $P_{m\_max}$  tenaga mesin diperoleh pada titik daya maksimum koefisien  $C_{p\_max}$ , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Karakteristik daya mekanik turbin angin (Sumber: Muldi, 2009)

Pada pembangkit listrik tenaga angin, daya maksimum dapat diperoleh dengan mengatur kecepatan putaran turbin pada titik daya mekanik maksimum dan mengurangi rugi-rugi daya. Daya mekanik turbin angin bervariasi pada satu kecepatan angin, yang tergantung pada kecepatan putaran turbin.

Daya mekanik turbin angin akan maksimum saat nilai koefisien daya maksimum dan nilai TSR optimum. Gambar 2.2 menunjukkan karakteristik daya mekanik turbin angin. Dari gambar ini dapat kita lihat bahwa pada setiap variasi kecepatan angin terdapat satu titik daya mekanik maksimum. Titik daya maksimum atau disebut *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) berada pada kecepatan turbin yang bervariasi. MPPT adalah suatu metode yang digunakan untuk mengoptimalkan daya keluaran sebagai pembangkit listrik (Armaditya, 2012).

Metode MPPT ini menentukan perbedaan torsi turbin ( $T_m$ ) dan torsi generator ( $T_g$ ). Jika kecepatan generator kurang dari kecepatan yang optimal, maka torsi turbin akan lebih besar dari torsi generator, dan kecepatan generator akan dipercepat. Kecepatan generator akan melambat jika kecepatan generator lebih tinggi daripada kecepatan optimalnya (Armaditya, 2012). Pada sistem pembangkit listrik tenaga angin ini, MPPT digunakan untuk mengoptimalkan

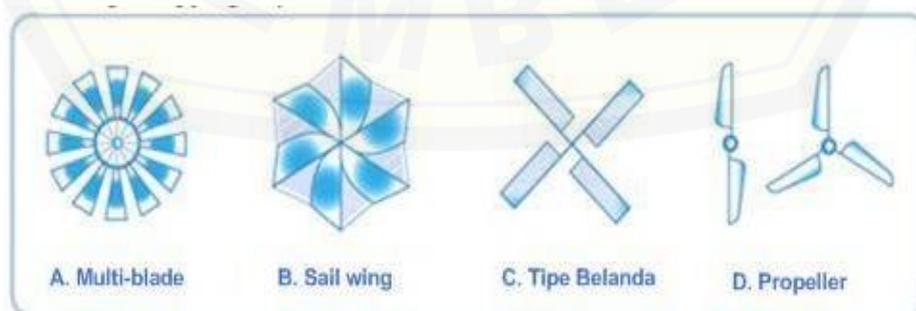
daya keluaran dari generator dengan menggunakan konverter daya elektronik yang terletak pada DC-DC *buck-boost converter*.

### 2.1.2 Sudut *Pitch* pada Bilah Turbin Angin

Pada turbin angin, desain bilah merupakan hal yang paling penting karena bila merupakan komponen utama yang menangkap angin untuk kemudian dikonversikan menjadi gerakan mekanik. Perkembangan teknologi telah menciptakan bilah turbin angin dengan berbagai variasi bahan, ukuran, jenis airfoil, jumlah bilah, dan lain sebagainya. Pada turbin angin *horizontal axis*, hal yang penting untuk diperhatikan adalah jari-jari bilah, jumlah bilah, sudut pitch, panjang chord, jenis *airfoil*, dan bahan bilah. Sudut pada bilah kipas bisa diatur sesuai kecepatan rotor yang dikehendaki, hal ini juga bisa dipengaruhi oleh kondisi kecepatan angin yang terlalu rendah atau terlalu kencang.

Dimensi rotor turbin berpengaruh terhadap kemampuan turbin untuk menangkap angin yang melewati turbin. Semakin besar diameter rotor, maka semakin besar pula area sapuan angin yang dapat dimanfaatkan. Namun hal ini akan berpengaruh terhadap kecepatan rotor turbin tersebut, semakin besar rotor, maka koefisien daya akan makin besar dan kecepatan putaran turbin akan makin rendah.

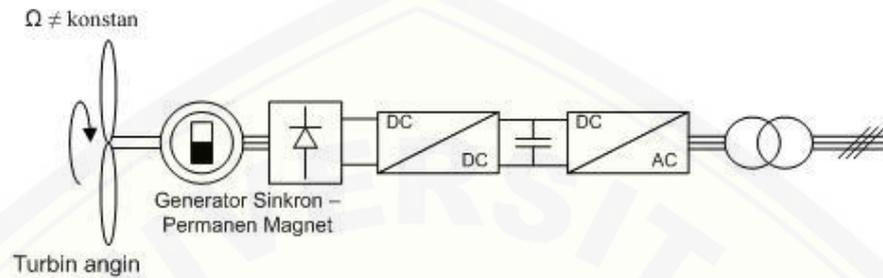
Jumlah bilah pada turbin angin tidak memiliki batasan khusus. Pada umumnya turbin angin *horizontal axis* memiliki tiga bilah atau banyak bilah. Pemilihan jumlah bilah pada turbin berdasarkan pada rancangan kecepatan turbin, adanya *noise*, dan estetika turbin angin (Rand, 2010).



Gambar 2.3 Baling-baling turbin angin tipe horisontal-axis (Sumber: Kadek, 2011)

### 2.1.3 Sistem *Variable-speed* SKEA

Pada tugas akhir ini, sistem *variable speed* menggunakan generator sinkron magnet permanen (*direct drive*), yang dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.4 Sistem *Variable Speed* SKEA (Sumber: Kadek, 2011)

Fitur utama dari variabel kecepatan SKEA adalah kekuatan terkendali aktif dan reaktif (frekuensi dan kontrol tegangan), respon cepat di bawah situasi sistem daya transien dan dinamis, pengaruh pada stabilitas jaringan dan peningkatan kualitas daya. Berikut adalah keuntungan dan kerugian menggunakan sistem ini.

1. Keuntungan yang diperoleh dengan menggunakan sistem ini antara lain:
  - a. Jangkauan kecepatan kerja sistem tidak terbatas. Sistem *variable speed direct-drive* ini dapat mengekstrak daya pada kecepatan putar turbin berapapun.
  - b. Menghindarkan penggunaan roda gigi dengan menggunakan generator yang dapat beroperasi pada putaran rendah (*multi-pole generator*).
  - c. Sistem ini tidak menggunakan *brush*, sehingga rugi-rugi daya rotor dapat diminimalisir serta biaya perawatan komponen generatornya juga lebih terjangkau.
  - d. Tidak menggunakan konverter untuk medan eksitasinya.
  - e. Menggunakan magnet permanen untuk membangkitkan tegangan, sehingga rugi-rugi daya pada rotor yang biasanya timbul pada generator rotor belitan dapat dihilangkan.
2. Kekurangan yang diperoleh dengan menggunakan sistem ini antara lain:

- a. Ukuran generator dapat menjadi besar dan berat.
- b. Membutuhkan magnet permanen yang mahal dan sulit diperoleh di Indonesia.

Biaya investasi awal sistem turbin angin ini memang lebih mahal daripada sistem turbin angin *fixed speed*, namun energi angin yang diekstrasikannya lebih tinggi, maka harga jual listrik rata-rata per kWh nya masih bisa ditekan menjadi lebih murah. Variabel kecepatan SKEA dirancang untuk mencapai efisiensi aerodinamis maksimum atas berbagai kecepatan angin. Hal ini dimungkinkan untuk terus beradaptasi (menambah atau mengurangi) kecepatan putar SKEA sesuai dengan kecepatan angin.

Turbin angin beroperasi pada kecepatan rotasi yang berubah-ubah, frekuensi listrik dari generator bervariasi dan karena itu harus dipisahkan dari frekuensi *grid*. Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan sistem konverter daya elektronik, antara generator induksi atau generator sinkron dan *grid*. Dalam hal ini, konverter daya berfungsi untuk memisahkan frekuensi jaringan listrik dari frekuensi rotor mekanis sehingga menghasilkan kecepatan variabel turbin angin. *Variable-speed* dapat dicapai dengan menggunakan kombinasi yang cocok antara generator (sinkron atau asinkron) dan peralatan elektronika daya.

## 2.2 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

Generator magnet permanen adalah jenis pembangkit listrik yang menggunakan magnet permanen sehingga tidak memerlukan tambahan eksitasi dari luar untuk membuat medan magnetnya. Desainnya yang cukup sederhana memudahkan kita dalam menentukan jumlah kutub yang diinginkan sehingga generator ini bisa digunakan untuk frekuensi tinggi maupun rendah, tergantung kita merancang banyaknya kutub yang akan dipakai (Sofyan, 2014).

Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada mesin dengan frekuensi elektrik pada stator adalah sebagai berikut:

$$f = \frac{n.p}{120} \dots\dots\dots (2.13)$$

Keterangan:

f = frekuensi listrik yang dihasilkan (Hz)

$P$  = jumlah kutub generator

$N$  = putaran generator (rpm)

Oleh karena rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnet, persamaan diatas juga menunjukkan hubungan antara kecepatan putar rotor dengan frekuensi listrik yang dihasilkan. Agar daya listrik dibangkitkan tetap pada frekuensi 50Hz atau 60 Hz, maka generator harus berputar pada kecepatan tetap dengan jumlah kutub mesin yang telah ditentukan. Sebagai contoh untuk membangkitkan 60 Hz pada mesin dua kutub, rotor arus berputar dengan kecepatan 3600 rpm. Untuk membangkitkan daya 50 Hz pada mesin empat kutub, rotor harus berputar pada 1500 rpm.

Kebanyakan generator yang digunakan dalam pembangkit *renewable energy* seperti PLT berjenis mesin induksi yang memiliki karakteristik putaran tinggi. Sedangkan kecepatan angin di Indonesia tergolong rendah. Keberadaan *gearbox* yang selama ini membantu untuk mendapatkan putaran tinggi untuk memutar mesin, tidak selalu efektif, selain karena menimbulkan rugi-rugi daya yang lebih besar, juga membutuhkan biaya perawatan lebih.

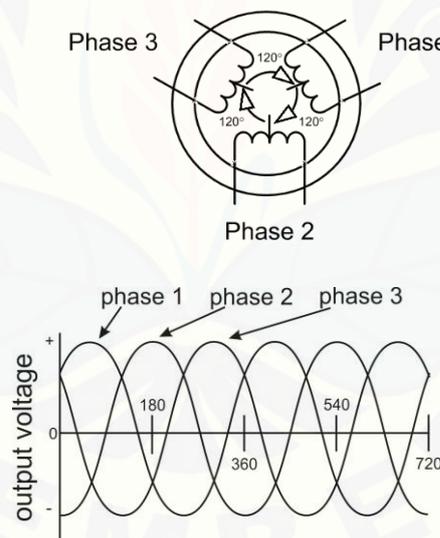
Selain itu mesin yang biasa dipakai biasanya memerlukan tambahan energi listrik awal (*excitation voltage*) untuk membuat medan magnetnya. Adanya magnet permanen dalam mesin ini memungkinkannya untuk tidak memerlukan eksitasi awal. Desain rotor dengan jumlah kutub yang banyak memungkinkan generator ini beroperasi pada putaran rendah. Dibandingkan dengan mesin konvensional, generator magnet permanen memiliki beberapa kelebihan:

- a. Mampu bekerja di putaran rendah tanpa *gearbox*.
- b. Biaya perawatan cenderung lebih rendah.
- c. Tidak memerlukan tegangan eksitasi dari luar.

Prinsip kerja PMSG adalah sama dengan generator sinkron. Jika sebuah kumparan diputar pada kecepatan konstan pada medan magnet homogen, maka akan terinduksi tegangan sinusoidal pada kumparan tersebut. Medan magnet bisa dihasilkan oleh kumparan yang dialiri arus DC atau oleh magnet tetap. Pada mesin tipe ini medan magnet diletakkan pada stator (disebut generator kutub

eksternal / *external pole generator*) yang mana energi listrik dibangkitkan pada kumparan rotor.

Hal ini dapat menimbulkan kerusakan pada *slip ring* dan karbon sikat, sehingga menimbulkan permasalahan pada pembangkitan daya tinggi. Untuk mengatasi permasalahan ini, digunakan tipe generator dengan kutub internal (*internal pole generator*), yang mana medan magnet dibangkitkan oleh kutub rotor dan tegangan AC dibangkitkan pada rangkaian stator. Tegangan yang dihasilkan akan sinusoidal jika rapat fluks magnet pada celah udara terdistribusi sinusoidal dan rotor diputar pada kecepatan konstan. Tegangan AC tiga fasa dibangkitkan pada mesin sinkron kutub internal pada tiga kumparan stator yang diset sedemikian rupa sehingga membentuk beda fasa dengan sudut  $120^\circ$ . Bentuk gambaran sederhana hubungan kumparan 3-fasa dengan tegangan yang dibangkitkan diperlihatkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.5 Kumparan 3-fasa dan tegangan yang dibangkitkan (Sumber: Priandika, 2013)

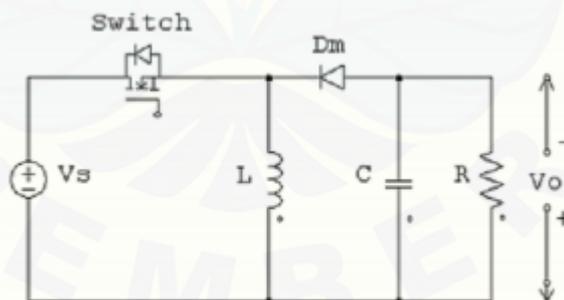
Pada rotor kutub sepatu, fluks terdistribusi sinusoidal didapatkan dengan mendesain bentuk sepatu kutub. Sedangkan pada rotor silinder, kumparan rotor disusun secara khusus untuk mendapatkan fluks terdistribusi secara sinusoidal. Pada tipe generator dengan kutub internal (*internal pole generator*), suplai DC

yang dihubungkan ke kumparan rotor melalui slip ring dan sikat untuk menghasilkan medan magnet merupakan eksitasi daya rendah. Jika rotor menggunakan magnet permanen, maka tidak *slip ring* dan sikat karbon tidak begitu diperlukan.

### 2.3 DC – DC Converter

*DC-DC converter* merupakan *device* elektronik yang merubah tegangan DC ke tegangan DC lain yang berbeda level dan biasanya mengeluarkan *output* teregulasi. Model *switch DC-DC converter* beroperasi dengan menyimpan energi *input* sementara kemudian melepaskannya dalam bentuk tegangan atau arus di dalam level yang tidak sama. Konverter ini dapat dibandingkan dengan *transformer* karena keduanya memiliki karakteristik yang mirip dalam merubah energi *input* dan menjadikannya berbeda dalam level impedansinya.

Konverter ini biasanya ditemukan dalam peralatan elektronik seperti *handphone* atau *notebook*. Dalam penelitian ini konverter ini bertindak sebagai *load* elektrik yang dapat memvariasikan keluarannya. Variasi beban ini dapat menyebabkan perubahan titik operasi sel surya (karakteristik arus tegangannya) sehingga dapat menghasilkan nilai keluaran maksimum (Utami, 2017).



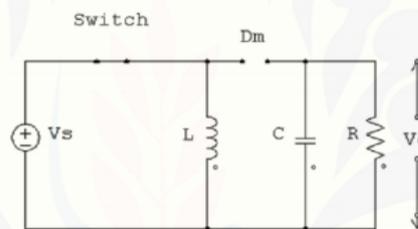
Gambar 2.6 Rangkaian *Buck-Boost Converter*

(Sumber : Muhamad Rifa'i, 2016)

Induktor digunakan sebagai *filter* untuk mengurangi *ripple* arus. Sedangkan kapasitor digunakan sebagai *filter* untuk mengurangi *ripple* tegangan. Dioda digunakan sebagai komponen *switching* yang bekerja pada keadaan *switch open*, sehingga arus tetap mengalir ke induktor. *Buck-boost converter* dapat

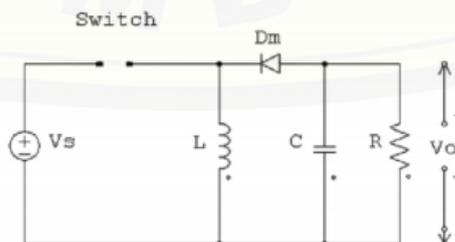
dioperasikan dengan dua mode yaitu *continuous current mode* (CCM) dan *discontinuous current mode* (DCM). *Continuous current mode* ditandai oleh arus yang mengalir secara terus – menerus pada induktor selama *switching cycle*-nya pada keadaan *steady state*. Sehingga pada CCM, tegangan *output* dapat diatur dengan mengubah *duty cycle* pada range 0 – 0,65.

Selain itu, mode CCM tidak tergantung dari nilai induktor dan kapasitor. Sedangkan *discontinuous current mode* ditandai dengan arus induktor menjadi nol pada setiap *switching cycle*-nya. Pada mode DCM, tegangan *output* tergantung pada nilai induktor dan besarnya *duty cycle*. Prinsip kerja *buck – boost converter* dibagi menjadi 2 mode yaitu mode 1 saat *switch* di-ON-kan dan mode 2 saat *switch* di-OFF-kan. Siklus kerja *buck – boost converter* terlihat seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2.7 Siklus Kerja *Buck – Boost Converter* pada saat *switch ON* (Sumber: Beauty, 2016)

Pada Gambar 2.7 menunjukkan rangkaian *buckboost* dalam keadaan *switch ON*. Hal ini menyebabkan diode bekerja *reverse* sehingga arus akan mengalir ke induktor L. Dengan adanya arus yang mengalir ke induktor maka terjadi pengisian arus pada induktor sehingga arus induktor ( $I_L$ ) naik.



Gambar 2.8 Siklus Kerja *Buck – Boost Converter* pada saat *switch OFF* (Sumber: Beauty, 2016)

Pada Gambar 2.8 menunjukkan rangkaian *buckboost* dalam keadaan *switch* OFF. Hal ini menyebabkan dioda bekerja *forward* sehingga arus mengalir L, C, Dm dan beban. Energi yang tersimpan di induktor mengalami *discharging*. Regulator *Buck-boost* menghasilkan tegangan keluaran yang terbalik tanpa memerlukan trafo, mampu menghasilkan tegangan keluaran lebih rendah ataupun lebih tinggi dari tegangan masukan dan memiliki efisiensi yang tinggi. Besar tegangan keluaran tergantung pada *duty cycle*.

Besar dan kecilnya nilai tegangan *output* diatur berdasarkan *duty cycle* (D) PWM pada *switch*. Bila  $D > 0,5$  maka *output* akan lebih besar dari *input*. Sedangkan bila  $D < 0,5$  maka *output* akan lebih kecil dari *input* dan  $V_{in} = V_{out}$  saat  $D = 0,5$ . (Hidayat, 2010) Untuk menentukan nilai *duty cycle* dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini :

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{(1-D)} \dots\dots\dots (2.14)$$

Keterangan:

$V_o$  = Tegangan *Output*

$V_{in}$  = Tegangan *Input*

$D$  = *Duty Cycle*

Selanjutnya untuk penentuan nilai komponen (Resistor, Induktor dan Kapasitor) didapatkan dari persamaan dibawah:

a. Menentukan nilai Resistansi

$$R = \frac{V_o}{I_o} \dots\dots\dots (2.15)$$

b. Menentukan nilai induktansi induktor L

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2}{2xf} \times R \dots\dots\dots (2.16)$$

c. Menentukan nilai Kapasitor

$$\Delta V_o = \frac{V_o \times D}{R \times C \times f} \dots\dots\dots (2.17)$$

$$C = \frac{V_o \times D}{R \times \Delta V_o \times f} \dots\dots\dots (2.18)$$

Keterangan:

R = Resistansi ( $\Omega$ )

$L$  = Induktansi (H)

$f$  = Frekuensi *switching* (Hz)

$C$  = Kapasitor (L)

#### 2.4 *Maximum Power Point Tracking* (MPPT)

*Maximum Power Point Tracking* (MPPT) merupakan suatu sistem elektronik yang digunakan untuk menelusuri titik daya maksimum. Prinsip kerja dari MPPT ini sendiri yaitu dengan menaikkan dan menurunkan tegangan kerja, dengan mengatur *duty cycle* pada konverter. Daya yang diperoleh nantinya ini berasal dari nilai tegangan dan arus yang dihasilkan. Pada panel surya, MPPT mengontrol sistem panel surya tersebut agar dapat beroperasi dan menghasilkan daya maksimum.

MPPT bukan merupakan sistem *tracking* mekanis yang secara fisik menggerakkan modul agar mengarah langsung ke matahari. MPPT merupakan sistem elektronis yang secara keseluruhan mengubah-ubah titik operasi elektronis modul sel surya sehingga dapat mengirim daya maksimal yang tersedia. Dari daya tambahan yang terkumpul yang berasal dari modul sel surya, sehingga arus pengisian baterai dapat ditingkatkan. MPPT dapat juga dihubungkan dengan sistem *tracking* mekanis, tetapi kedua sistem ini benar-benar sangat berbeda.

Titik daya maksimum yang dihasilkan solar cell akan berubah-ubah tiap waktu. Yaitu tergantung pada cuaca pada keadaan sekitar. Besar tegangan dan arus juga akan berubah menyesuaikan besar perbedaan cuaca pada solar cell yang digunakan. Sehingga algoritma MPPT akan menyesuaikan dan mencari titik daya maksimum dari perubahan cuaca.

Penelitian mengenai penggunaan MPPT seringkali pada sel surya, dan secara luas bisa diaplikasikan pada PV. Ada 3 jenis metode yang sering digunakan, yaitu *Perturb and Observe* (P&O), *Incremental Conductance* (InC), dan *Fractional open/short-circuit voltage/current*. P&O dan InC merupakan metode *Hill Climbing*. Metode *hill climbing* memiliki arti bahwa algoritma akan mencari titik daya maksimum dengan cara menjejaki daya pada daerah operasi titik ke titik lainnya dan mengukur daya pada titik tersebut. Kemudian apabila daya

mencapai titik yang paling besar, maka algoritma akan menjaga pada titik operasi tersebut. Perbedaan keduanya terletak pada capaian menuju maksimum *power point*. Yang mana akan berubah ubah disekitar titik tersebut (Ian Laird, 2013).

Lain halnya pada turbin angin, sistem MPPT ini bekerja agar mendapatkan daya maksimum yaitu dengan mengoptimalkan keluaran daya yang berasal dari generator. Generator sendiri nantinya akan menghasilkan daya listrik yang berasal dari putaran baling-baling pada turbin angin yang nantinya diubah menjadi energi listrik. Generator yang terhubung pada turbin ini nantinya akan menghasilkan daya maksimum apabila metode yang digunakan pada MPPT bekerja dengan baik sesuai dengan karakteristik angin, karena setiap kecepatan angin memiliki daya maksimum yang berbeda-beda.

**2.5 Algoritma Incremental Conductance**

Algoritma *Incremental conductance* merupakan salah satu metode MPP tracking. Algoritma ini menggunakan pengukuran *incremental* pada perubahan konduktansi pada generator, baik termoelektrik maupun sel surya. Dengan membandingkan pengukuran *incremental*, dapat diketahui perubahan perubahan daya tegangan maupun arus yang disebabkan (Kok, Mekhilef, & Safari, 2013).

*Incremental conductance* didefinisikan sebagai ( $dI_{tg} / dV_{tg}$ ). Dengan mendapatkan nilai konduktansi nyata dari modul PV, maka dapat diketahui MPP (titik maksimum) titik operasi berada. InC dapat mencari lebih cepat terhadap peningkatan dan penurunan tingkat kecerahan sehingga memiliki akurasi yang lebih baik dari pada P&O. Namun kelemahannya yaitu peningkatan yang kompleks ketika dibandingkan dengan P&O.

$$\Delta I / \Delta V = I / V \dots\dots\dots(2.19)$$

$$\Delta I / \Delta V > -I / V \dots\dots\dots(2.20)$$

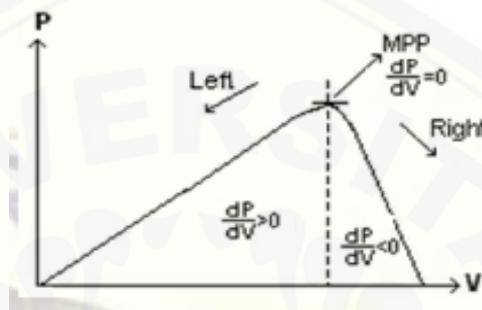
$$\Delta I / \Delta V = I / V \dots\dots\dots(2.21)$$

Persamaan 2.19 merupakan proses membandingkan nilai perubahan arus dan perubahan tegangan terhadap nilai arus dan tegangan yang ditentukan. Sedangkan persamaan 2.20 dan 2.21 merupakan perbandingan ketika nilai tidak

sama, sehingga dapat bernilai positif maupun negatif sesuai dengan besar nilai arus dan tegangan.

$$dPdV=1+(dIdV)\dots\dots\dots(2.22)$$

Sehingga didapatkan persamaan (2.22) yang merupakan nilai dari perubahan daya terhadap tegangan. Nilai tersebut akan digunakan untuk mencari titik maksimum dari PV (Kok, Mekhilef, & Safari, 2013).



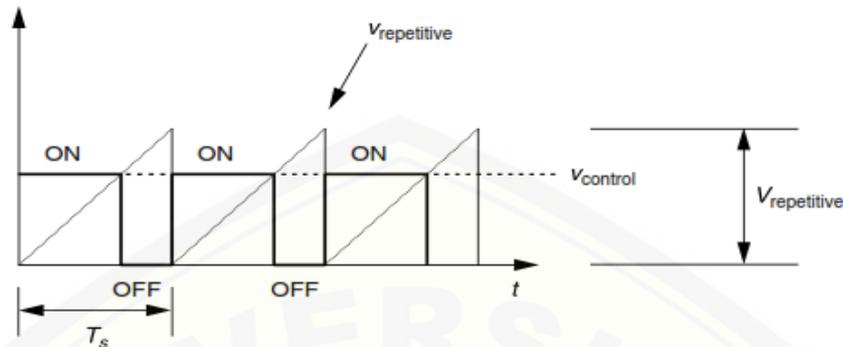
Gambar 2.9 Grafik *Incremental conductance* (Sumber: Lokanadham & Bhaskar, 2012)

Gambar 2.9 menunjukkan kondisi kerja algoritma MPPT untuk mencari nilai titik MPP pada tiap kondisi. Ketika nilai *conductance* bernilai nol, maka algoritma akan mempertahankan posisi pada titik MPP. Namun ketika bernilai lebih dari nol, maka algoritma akan mendeteksi nilai menjauhi ke kiri MPP, begitu juga ketika nilai *conductance* bernilai kurang dari nol maka algoritma akan mendeteksi nilai menjauhi ke kanan MPP. Sehingga sistem akan mengontrol tegangan referensi agar dapat menjaga daya pada titik maksimum. Yaitu dengan cara mengatur besar PWM.

## 2.6 *Pulse Width Modulation (PWM)*

*Pulse Width Modulation (PWM)* adalah suatu jalan atau cara yang efisien dalam menyediakan sejumlah tegangan listrik antara kondisi “*high*” dan “*low*”. Saklar tegangan sederhana dengan sumber tegangan tipikal hanya menyediakan tegangan penuh, ketika saklar dihidupkan. PWM adalah teknik mendapatkan sinyal kotak diantara *on* dan *off*. Teknik ini digunakan untuk mengontrol saklat otomatis seperti MOSFET. Hal yang berpengaruh adalah besar *duty cycle*. *Duty cycle* merupakan perbandingan waktu *on* dan waktu *off*. Besar *duty cycle*

berpengaruh terhadap pensaklaran dari MOSFET. Gambar 6.20 merupakan kerja dari sinyal PWM.



Gambar 2.10 Kerja PWM (Sumber : Irwin, 2002)

Pada penelitian ini sinyal PWM digunakan sebagai kontrol MOSFET pada konverter tipe *buck-boost*. Besar *duty cycle* yang digunakan untuk mengontrol konverter tergantung dari kontrol algoritma MPPT yang digunakan.

## 2.7 Logika Fuzzy

Berbeda dengan logika kuno / logika digital yang hanya memiliki nilai 0 dan 1 yang berarti atau logika benar dan salah maka dengan logika *fuzzy* sesuatu dapat memiliki nilai diantara *range* 0 dan 1. Secara bahasa, *Fuzzy* berarti kabur atau samar. Logika *fuzzy* adalah logika *multivalued* yang memungkinkan untuk mendefinisikan nilai menengah diantara dua logika atau evaluasi konvensional yang berbeda, seperti benar atau salah, iya atau tidak, tinggi atau rendah, dan panas atau dingin dll. Oleh karena itulah logika ini disebut logika samar. Sehingga dalam teori *fuzzy* sesuatu dapat bernilai salah atau benar secara bersamaan.

Dengan istilah lain, Logika fuzzy adalah suatu cara untuk memetakan suatu ruang *input* kedalam suatu ruang *output*, mempunyai nilai *continue*. *Fuzzy* dinyatakan dalam derajat dari suatu keanggotaan dan derajat dari kebenaran. Oleh sebab itu sesuatu dapat dikatakan sebagian benar dan sebagian salah pada waktu yang sama. (Kusumadewi. 2004). Prof. Lofti Zadeh mengembangkan teori himpunan logika samar atau *fuzzy* pada tahun 1965. Beliau berpendapat bahwa logika benar dan salah dalam logika konvensional tidak dapat mengatasi masalah

gradiasi di dunia nyata. Sebagai solusi dalam mengatasi masalah gradiasi yang tidak terhingga tersebut, Prof. Lotfi Zadeh mengembangkan sebuah himpunan *fuzzy*.

Logika *fuzzy* memiliki nilai yang kontinyu tidak seperti logika boolean. *Fuzzy* dinyatakan dalam derajat dari suatu keanggotaan dan derajat kebenaran. Oleh karena itu, sesuatu dapat dikatakan sebagian benar dan sebagian salah dalam waktu yang sama (Fauzi, 2014).

### 2.7.1 Himpunan *Fuzzy*

Sekumpulan objek  $x$  dimana masing-masing objek memiliki nilai keanggotaan atau *membership function* " $\mu$ " atau nilai kebenaran disebut sebagai himpunan *fuzzy*. Menurut Kusumadewi (2002), logika *fuzzy* adalah suatu cara yang tepat untuk memetakan suatu ruang *input* ke dalam suatu ruang *output*. Titik-titik data *input* dipetakan ke dalam sebuah kurva yang disebut sebagai fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan (*membership function*) adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik *input data* ke dalam nilai keanggotaannya (sering juga disebut dengan derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara nol sampai satu.

### 2.7.2 Struktur Dasar Logika *Fuzzy*

Struktur logika *fuzzy*, pada dasarnya memiliki 4 bagian diantaranya sebagai berikut.

#### 1. Basis Pengetahuan

Basis pengetahuan terdiri atas basis data dan aturan dasar yang mendefinisikan himpunan *fuzzy* atau daerah-daerah masukan dan keluaran dan menyusunnya dalam perangkat aturan. Basis pengetahuan terdiri atas fakta (*database*), dan kaidah atur (*rule base*). *Database* atau fakta merupakan bagian pengetahuan yang memuat informasi tentang objek, peristiwa, atau situasi. Pada umumnya, fakta menyatakan kondisi statik dari objek. Disamping itu, kaidah atur atau *rule base* berisi informasi tentang tata cara membangkitkan fakta baru atau hipotesa fakta yang sudah ada.

Basis data memiliki fungsi untuk mendefinisikan himpunan-himpunan *fuzzy* dari sinyal masukan dan keluaran agar dapat digunakan oleh variabel linguistik dalam batas aturan. Dalam pendefinisian tersebut, biasanya dilakukan secara subjektif menggunakan pendekatan heuristik dan berdasar pada pengalaman serta pertimbangan yang menyangkut kerekayasaan, sehingga bergantung penuh pada perancang basis data.

## 2. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi berfungsi untuk mentransformasikan sinyal masukan yang bersifat bukan *fuzzy* (*crisp*) ke himpunan *fuzzy* menggunakan operator fuzzifikasi.

## 3. Logika Pengambilan Keputusan (*Rule Base*)

Logika pengambilan keputusan merupakan inti dari logika *fuzzy* yang memiliki kemampuan seperti manusia dalam pengambilan keputusan. Aksi *fuzzy rule* disimpulkan menggunakan implikasi *fuzzy* dan mekanisme inferensi *fuzzy*.

## 4. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi digunakan untuk mentransformasikan kesimpulan tentang aksi *rule* yang bersifat *fuzzy* menjadi sinyal sebenarnya yang bersifat *crisp* dengan menggunakan operator defuzzifikasi (Fauzi, 2014).

**BAB 3. METODE PENELITIAN**

**3.1 Tempat dan Waktu Penelitian**

3.1.1 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jl. Slamet Riyadi No.62 Patrang, Jember 68111.

3.1.2 Waktu Penelitian

Waktu penelitian ini dimulai pada bulan Desember 2018 – Maret 2019, dengan rincian sebagai berikut :

Tabel 3.1 Jadwal Pelaksanaan Penelitian

No	Kegiatan	Bulan Ke-/Minggu															
		Bulan 1				Bulan 2				Bulan 3				Bulan 4			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.	Studi Literatur	■	■	■	■												
2.	Perancangan Sistem					■	■	■	■								
3.	Pengolahan Data									■	■	■	■				
4.	Analisa Data													■	■	■	■
5.	Pembuatan Laporan													■	■	■	■

Keterangan :

■ : Kegiatan dilaksanakan

### 3.2 Prosedur Penelitian

Dalam metodologi penelitian ini, dilakukan langkah-langkah dalam melaksanakan penelitian sebagai berikut :

#### 1. Studi Literatur

Tahap awal pelaksanaan penelitian ini adalah dengan mencari literatur dari hasil penelitian sebelumnya melalui buku atau internet untuk mengetahui karakteristik komponen sistem, prinsip kerja serta teori yang menunjang lainnya. Diharapkan dengan literatur yang telah didapat dapat memberikan arahan untuk mengurangi kesalahan dalam penelitian.

#### 2. Perancangan Sistem

Tahapan kedua adalah perancangan sistem konversi energi angin dengan menggunakan PMSG dimana pada ditahap ini dilakukan pemodelan untuk sistem konversi energi angin dengan beberapa komponen pengendali seperti *buck - boost converter* dan plan secara keseluruhan dengan metode kontrol yang diusulkan dalam bentuk simulasi menggunakan *software* Matlab.

#### 3. Pengolahan Data

Tahap ketiga adalah melakukan analisa pada data yang diperoleh dan membuatnya menjadi sebuah bentuk laporan hasil dari penelitian yang telah dilakukan.

#### 4. Analisa Hasil

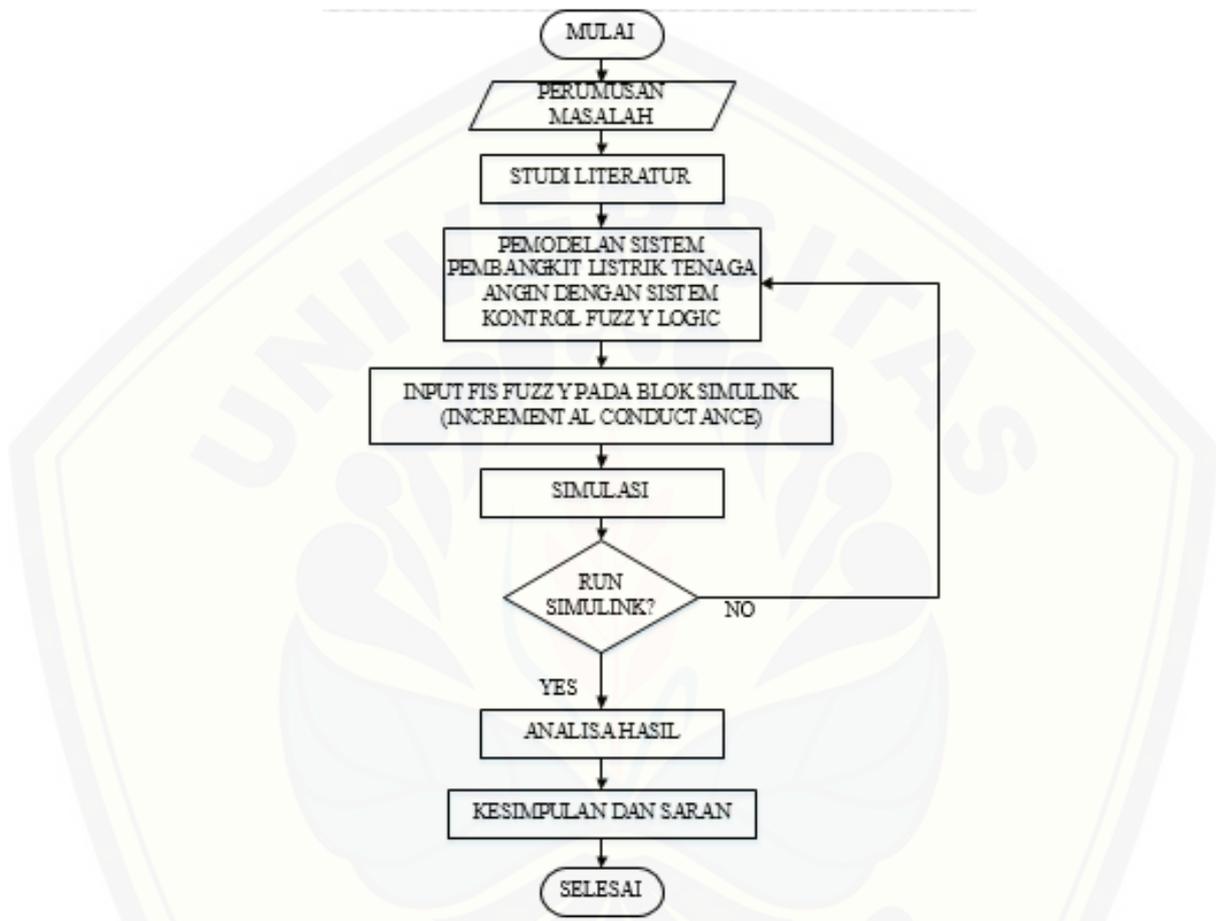
Data –data yang sudah didapat, selanjutnya akan dianalis dan dibandingkan. Sehingga akan diketahui perbandingan dari Algoritma *Incremental conductance* (MPPT) dan ketika tidak menggunakan MPPT. Dan akan diketahui apakah algoritma *Incremental conductance* memiliki kinerja lebih baik dalam memaksimalkan daya keluaran dari Turbin Angin.

#### 5. Kesimpulan

Pada tahap ini dilakukan pengambilan kesimpulan berdasarkan hasil perhitungan dan perbandingan serta analisis. Dan juga pemberian saran yang dimaksud untuk pertimbangan atas pengembangan selanjutnya. Pengambilan kesimpulan dan saran dilakukan setelah menganalisa data yang telah didapat.

### 3.3 Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan diagram alir pada penelitian Optimalisasi Daya Keluaran Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan menggunakan *Algoritma Incremental Conductance Berbasis Fuzzy Logic*:



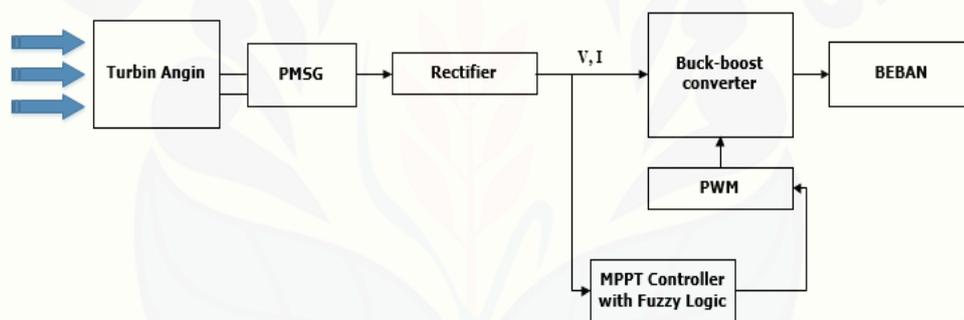
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penjelasan dari diagram alir penelitian diatas ialah sebagai berikut, dimulai dengan perumusan masalah, kemudian melakukan studi literatur terhadap topik penelitian, yakni mengenai algoritma MPPT *Incremental Conductance* yang diterapkan pada Sistem Turbin Angin. Kemudian tahap selanjutnya, merancang sistem kontrol berbasis *fuzzy logic*, yang mana disini menggunakan algoritma *incremental conductance*. Setelah itu tahap selanjutnya ialah menyusun simulasi pada *Simulink* Matlab. Adapun data yang diambil diantaranya ialah nilai karakteristik turbin angin dan nilai komponen pada sistem *buck – boost converter*.

Setelah itu, menjalankan simulink dengan mengklik *run*, untuk melihat apakah simulasi dapat berjalan atau tidak. Jika simulasi tidak berjalan maka *flowchart* kembali ke tahap penyusunan simulasi, namun jika simulasi berhasil, *flowchart* langsung menuju tahap selanjutnya. Yakni menganalisa data yang telah diperoleh dan membandingkan hasil *tracking* pada algoritma *incremental conductance*. Kemudian tahap yang terakhir membuat kesimpulan dan memberi saran untuk penelitian selanjutnya.

### 3.4 Blok Diagram Sistem

Berikut merupakan blok diagram sistem Optimalisasi Daya Keluaran Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan menggunakan *Algoritma Incremental Conductance Berbasis Fuzzy Logic*:



Gambar 3.2 Blok Diagram Pemodelan Sistem MPPT pada Turbin Angin

Seperti ditunjukkan dalam gambar 3.2 Pemodelan sistem MPPT pada turbin angin diatas terdiri dari generator sinkron (PMSG), *rectifier*, *buck-boost converter*, dan PWM sebagai pengatur *duty cycle*. Sumbu turbin angin secara langsung digabungkan ke rotor generator PMSG, karena tenaga angin berfluktuasi dengan kecepatan angin, tegangan *output* PMSG dan frekuensi terus bervariasi. Tegangan yang dihasilkan oleh generator berupa tegangan AC, kemudian tegangan AC ini disearahkan oleh *rectifier* untuk menjadi tegangan DC.

Kemudian keluaran dari generator ini berupa tegangan dan arus untuk selanjutnya di kontrol melalui *MPPT Controller* dengan menggunakan algoritma *Incremental Conductance*, kemudian *output* dari *MPPT Controller* yang berupa

perubahan nilai *duty ratio* tidak langsung menjadi masukan untuk *converter*, namun masih mengalami proses penjumlahan dengan hasil sebelumnya, hal ini berlangsung terus menerus hingga sistem mencapai titik maksimumnya.

Selanjutnya, *buck-boost converter* digunakan untuk menstabilkan tegangan DC dan mengontrol tegangan *output* generator supaya sesuai dengan yang diharapkan beban. Tegangan DC dinaikkan dan diturunkan tegangannya oleh DC / DC *buck-boost converter* dengan mengendalikan *duty ratio*. Resistansi internal dari komponen diabaikan sesuai dengan persamaan 3.1 pada hubungan antara tegangan *input* dan tegangan *output* konverter pada keadaan *steady state* :

$$V_{out} = \frac{D}{1-D} V_{generator} \dots \dots \dots (3.1)$$

Dengan mengansumsikan bahwa konverter beroperasi pada tingkat efisiensi 100% dan beban resistif  $R_L$ , daya dikirim dari generator sistem adalah

$$P_g = \left(\frac{D}{1-D}\right)^2 \frac{V_g^2}{R_L} \dots \dots \dots (3.2)$$

Pada penelitian ini menggunakan kontrol *fuzzy logic* untuk mendesain suatu kontrol MPPT. *Fuzzy* MPPT kontroler akan membangkitkan *variable input fuzzy input fuzzy* yang diperlukan untuk membaca sinyal tegangan dan arus dari sebuah generator. Variabel *input fuzzy* akan dapat digunakan untuk menghitung *duty ratio* untuk mengatur titik operasi dari sistem tersebut dengan tujuan didapatkan daya keluaran yang maksimal.

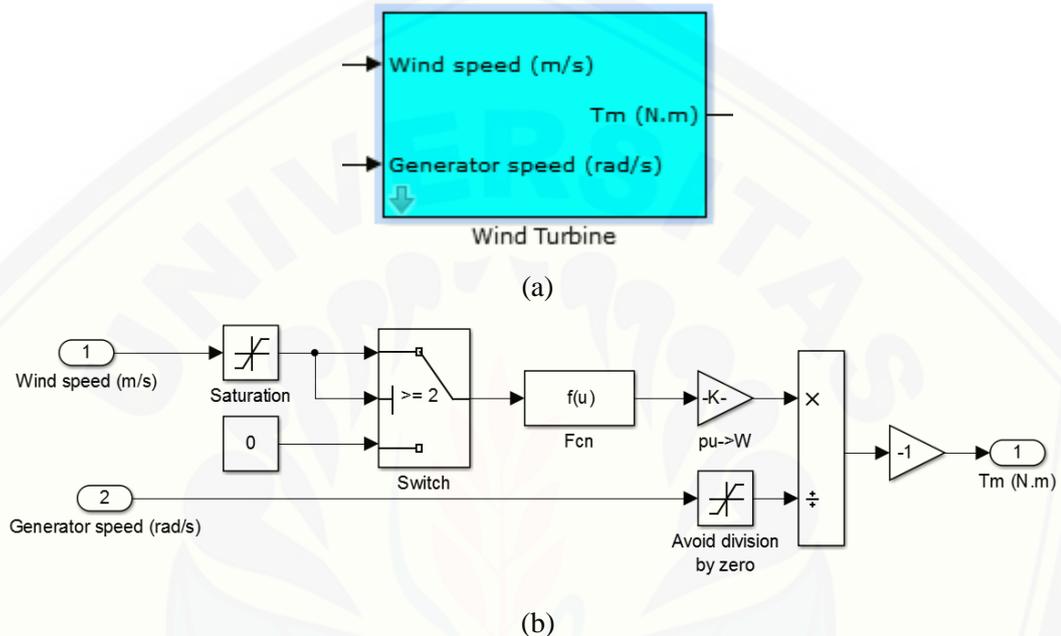
### 3.5 Pemodelan Turbin Angin

Turbin angin mengekstrak sebagian dari tenaga angin ( $P_{wind}$ ) dari luas seluruh piringan rotor dan mengubahnya menjadi tenaga mekanik ( $P_m$ ) seperti persamaan di bawah ini:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p \omega_{wind}^3 \dots \dots \dots (3.3)$$

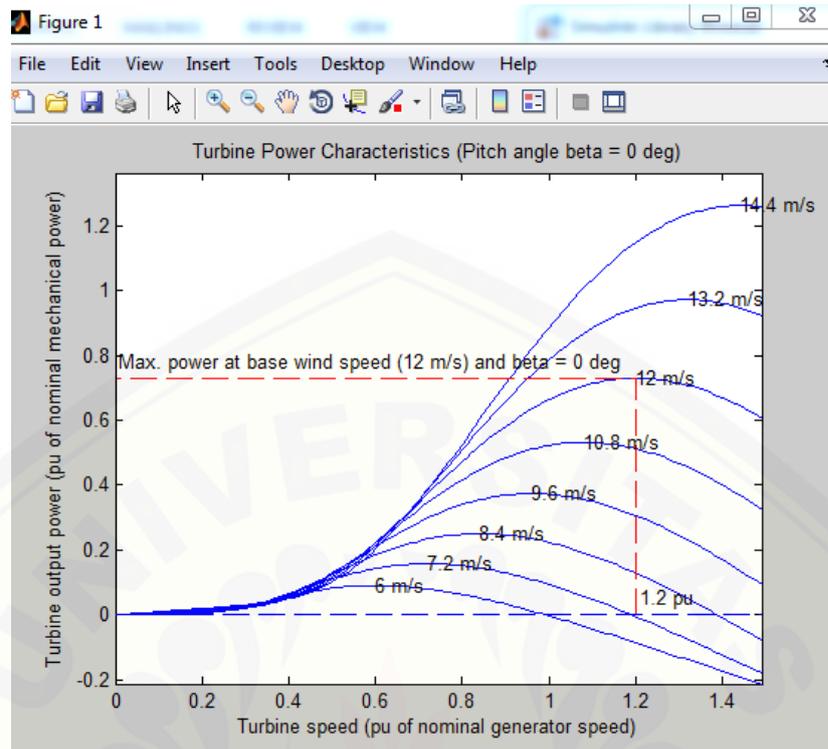
di mana  $\rho$  adalah kerapatan udara (sekitar  $1,225 \text{ kg/m}^3$ ),  $A$  adalah luas seluruh piringan rotor ( $\text{m}^2$ ), dan  $\omega_{wind}$  adalah kecepatan angin ( $\text{m/s}$ ). Koefisien daya ( $C_p < 0,593$ ) dapat dimaksimalkan dengan mengatur nilai *Tip Speed Ratio* (TSR) dan sudut *pitch blade*, menggunakan data yang diberikan oleh pabrik pembuat turbin angin. Dalam skripsi ini, melalui pilihan optimal  $C_p$  untuk kecepatan angin

tertentu,  $P_m$  dan  $\omega_m$  (kecepatan mekanik rotor) diasumsikan diketahui dan digunakan sebagai masukan untuk generator sinkron (PMSG). Dalam pemodelan simulasi ini, turbin angin dibuat sesuai dengan persamaan matematis untuk mencari nilai daya mekanik dan torka mekanik. Berikut merupakan blok dari turbin angin dalam matlab:



Gambar 3.3 (a) Blok Turbin Angin (b) Blok Subsistem Model Turbin Angin

Pada blok model turbin angin, *input* nya berupa *generator speed*, *pitch angle*, dan *wind speed*. Sedangkan *output* dari blok tersebut berupa torka mekanik pada poros generator ( $T_m$ ). *Generator speed* ( $\omega_m$ ) merupakan kecepatan putaran rotor pada generator, *pitch angle* ( $\beta$ ) merupakan sudut baling-baling turbin terhadap arah angin, sedangkan *wind speed* ( $v$ ) merupakan kecepatan angin. Pada penelitian ini tidak menggunakan kontrol *pitch angle* ( $\beta$ ) karena fokus penelitian ini untuk menghasilkan daya yang maksimal dengan menggunakan MPPT. Sehingga diharapkan nantinya akan menghasilkan daya maksimal berdasarkan perubahan kecepatan angin. Berikut merupakan kurva karakteristik daya pada pemodelan *wind turbine* adalah seperti gambar dibawah ini :



Gambar 3.4 Kurva Karakteristik Daya Pada *Wind Turbine*

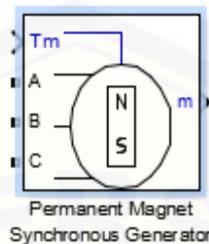
Kemudian data parameter yang dimasukkan dalam blok model turbin angin ditunjukkan sebagai berikut :

Tabel 3.2 Data Parameter Turbin Angin

No	Variabel	Keterangan
1.	Daya <i>output</i> nominal mekanik	900 W
2.	Daya dasar	900/0.9 VA
3.	Kecepatan angin dasar	12 m/s
4.	Daya nominal mekanik	0.73 pu
5.	Kecepatan dasar rotor	1.2 pu
6.	<i>Pitch angle</i>	0 deg

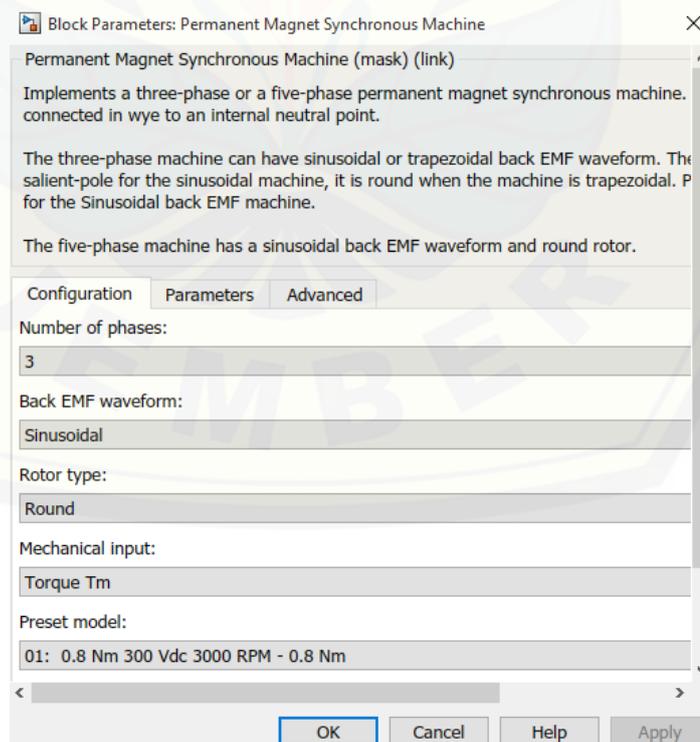
### 3.6 Pemodelan *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*

Generator yang terhubung dengan turbin angin adalah generator magnet permanen dengan masukan generator yaitu torsi mekanik yang akan disuplai oleh turbin angin. Berikut merupakan blok subsistem dari PMSG:

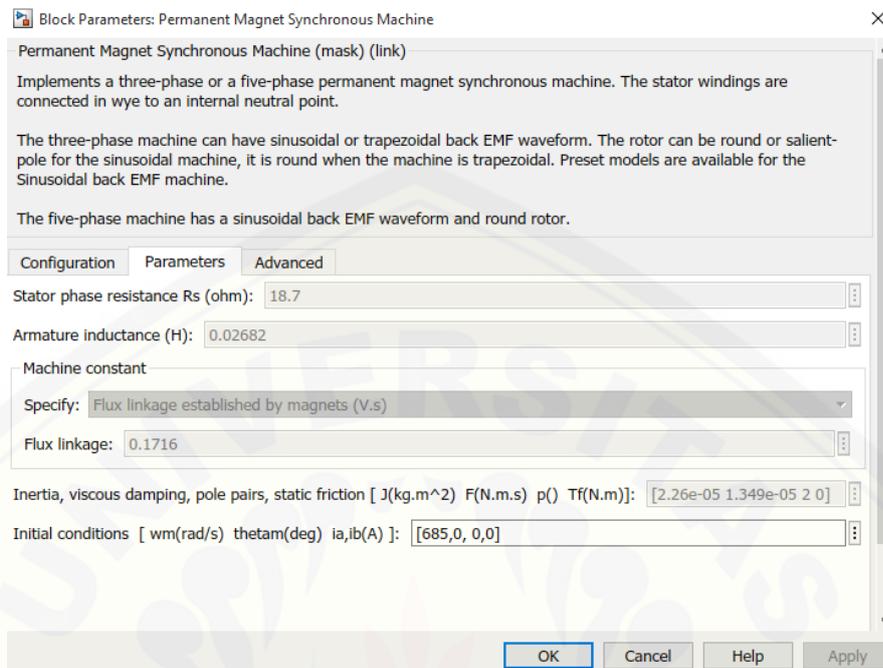


Gambar 3.5 Blok PMSG

Keluaran dari turbin angin dihubungkan dengan *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)* untuk menghasilkan listrik tiga fasa. Sedangkan pada *software matlab*, pemodelan (PMSG) yang digunakan menggunakan *preset model matlab*. Berdasarkan perhitungan pada Turbin Angin maka ditentukan parameter pemodelan *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*:



Gambar 3.6 Preset Model *Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSG)*



Gambar 3.7 Nilai Parameter *Permanent Magnet Synchronous Machine* (PMSG)

### 3.7 Perancangan *Buck-boost Converter*

Pada penelitian ini DC-DC Converter yang digunakan yaitu jenis *buck-boost converter*. Dimana *buck-boost converter* ini sendiri berfungsi untuk mengubah level tegangan DC, dari level rendah ke level tegangan tinggi ataupun sebaliknya, atau dengan kata lain digunakan untuk menurunkan atau menaikkan tegangan DC dengan konsep *switching* PWM yang nantinya akan mengatur *duty cycle*. Tegangan keluaran dari turbin angin perlu disearahkan terlebih dahulu oleh *rectifier*, sehingga tegangan keluaran yang awalnya berupa tegangan AC akan disearahkan menjadi tegangan DC, kemudian baru level tegangan DC ini diatur melalui *buck-boost converter*. Besar kecilnya tegangan *output* diatur berdasarkan *duty cycle* (D) PWM pada *switch* sebagai berikut :

$$V_o = -V_s \left( \frac{D}{1-D} \right) \dots \dots \dots (3.4)$$

Pengendalian *buck-boost converter* digunakan untuk mendapatkan nilai daya optimal melalui metode MPPT sehingga didapatkan nilai daya maksimal dari suatu turbin angin. Untuk mengetahui parameter tiap-tiap komponen yang

digunakan pada *buck-boost converter* maka perlu dilakukan perhitungan agar sistem dapat berjalan dengan baik. Adapun spesifikasi dan parameter perancangan *buck-boost converter* yang digunakan yaitu sebagai berikut :

Tabel 3.3 Spesifikasi *Buck-boost converter*

No.	Variabel	Nilai
1.	Tegangan <i>Input</i> Maksimum ( $V_{Smaks}$ )	400 V
2.	Tegangan <i>Input</i> Minimum ( $V_{Smin}$ )	12 V
3.	Tegangan <i>Output</i> ( $V_o$ )	50 V
4.	Arus Keluaran ( $I_o$ )	10 A
5.	Frekuensi <i>Switching</i>	5kHz
6.	<i>Ripple</i> Tegangan $\Delta V_o$	1 %

Setelah diketahui Spesifikasi *Buck-boost converter*, maka dilakukan perhitungan *duty cycle*. Berikut merupakan persamaan untuk menentukan nilai *duty cycle*:

- *Duty Cycle minimum*

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{(1-D)} \dots\dots\dots(3.5)$$

$$\frac{50}{12} = \frac{D}{(1-D)}$$

$$4.16 = \frac{D}{(1-D)}$$

$$4.16 - 4.16 D = D$$

$$4.16 = 5.16 D$$

$$D = 0.806$$

- *Duty Cycle maksimum*

$$\frac{V_o \max}{V_{in \max}} = \frac{D}{(1-D)} \dots\dots\dots(3.6)$$

$$\frac{50}{400} = \frac{D}{(1-D)}$$

$$0.125 = \frac{D}{(1-D)}$$

$$0.125 - 0.125 D = D$$

$$D = 0.11$$

- Penentuan nilai resistor

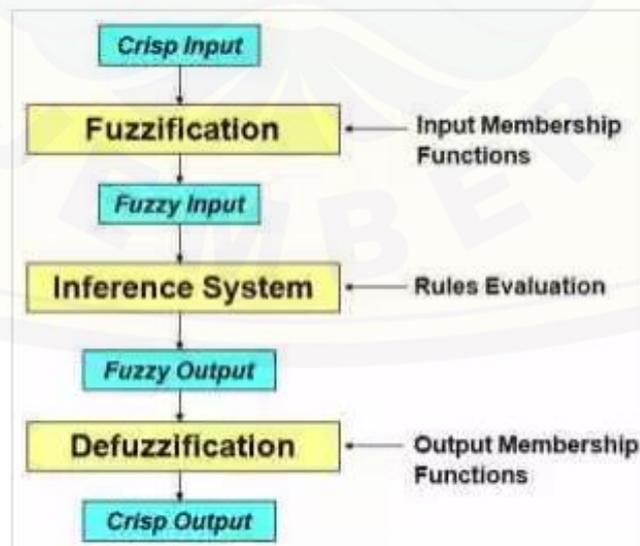
$$R = \frac{V_o}{I_o} \dots \dots \dots (3.7)$$

$$R = \frac{50}{10} = 5 \Omega$$

### 3.8 Perancangan *Fuzzy Logic Control* (FLC)

Logika *fuzzy* adalah cabang dari sistem kecerdasan buatan (*Artificial Intelligent*) yang mengemulasi kemampuan manusia dalam berfikir ke dalam bentuk algoritma yang kemudian dijalankan oleh mesin. *Fuzzy Logic Control* (FLC) diimplementasikan untuk membantu teknik MPPT konvensional untuk mendapatkan titik tegangan operasi *Maximum Power Point* (MPP) lebih cepat dan juga dapat diminimalkan fluktuasi tegangan setelah MPP.

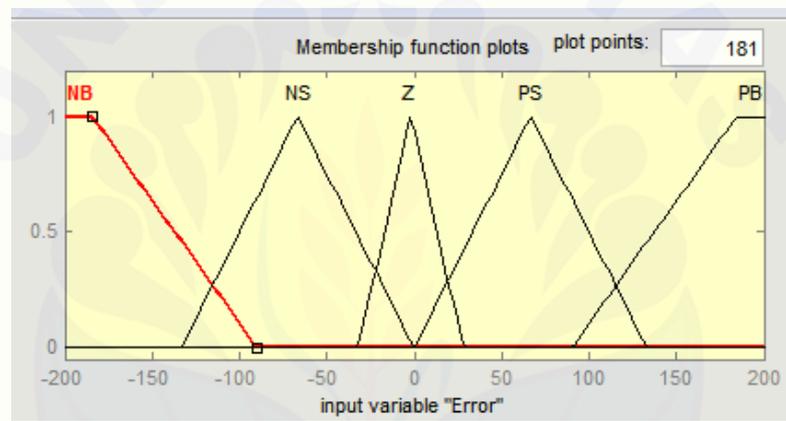
Langkah pertama dalam merancang suatu logika *fuzzy* adalah menentukan masukan dan keluaran *fuzzy*. Dalam penelitian ini, masukan-masukan sistem berupa nilai *error* dan selisih (*delta error*) yang diperoleh dari hasil pembacaan tegangan dan arus pada keluaran dari generator. Keluaran dari logika *fuzzy* berupa *dutycycle* yang akan diberikan kepada *converter*. Masukan dan keluaran logika *fuzzy* dinyatakan dalam fungsi keanggotaan (*membership function*) untuk mengelompokkan variabel-variabel yang ada.



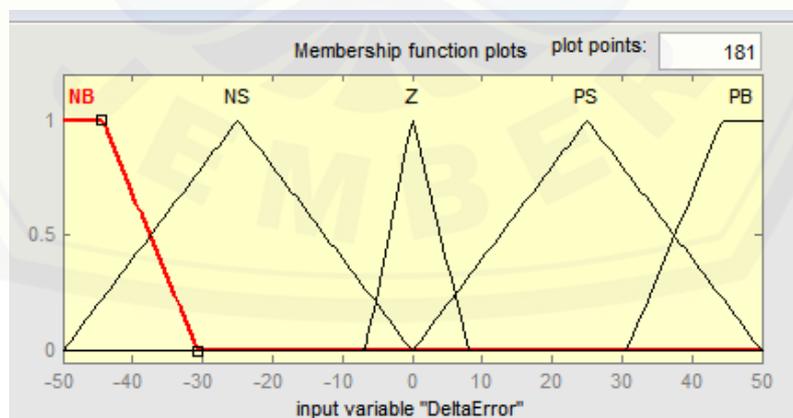
Gambar 3.8 Diagram Alir *Fuzzy Logic Controller*

### 1. Fuzzification

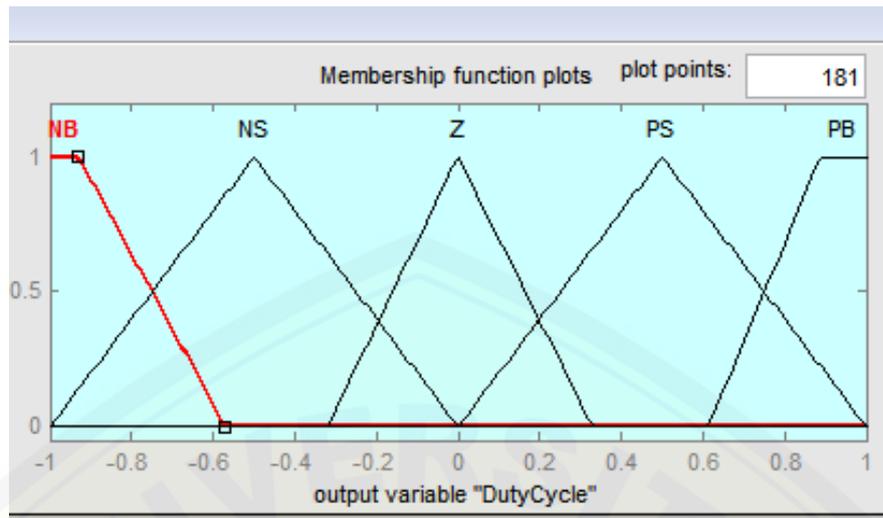
Proses fuzzyfikasi merupakan proses untuk mengubah variabel non fuzzy (variabel numerik) menjadi variabel fuzzy (variabel linguistik). Variabel input dalam controller ini adalah *error* dan *delta error* (*change of error*). Hasil dari kontrol logika fuzzy adalah *delta duty cycle*. Tahap awal pembuatan kontrol *fuzzy* adalah *fuzzyfikasi*, yang mana di tahap ini akan dilakukan membuat himpunan keanggotaan untuk *error* dan *delta error*. Setelah itu menghitung derajat keanggotaan masing – masing nilai *error* dan *delta error*. Keanggotaan pada *membership function error* pada penelitian ini dibagi menjadi 5, yaitu NB, NS, Z, PS dan PB.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.9 *Membership Function* dari *Algoritma Incremental Conductance* : (a) *Membership Function* untuk *E*; (b) *Membership Function* untuk *CE*; (c) *Membership Function* untuk *Duty Ratio*.

Sistem pengendalian ini bertujuan untuk mengendalikan daya, maka kendali tersebut dilakukan berdasarkan *error* ( $e$ ) daya dan perubahan *error* daya atau *delta error* ( $ce$ ). *Kontroller* akan membaca sinyal dari sensor tegangan dan arus yang dipasang pada jalur *output* dari *DC/DC Converter* dan menerima *input* berupa tegangan dan arus referensi. Dari arus dan tegangan tersebut kemudian akan menghitungnya sehingga menjadi sebuah daya. *Kontrol fuzzy* akan memproses selisih daya terukur dari sensor tegangan dan arus dengan daya referensi dan hasilnya menjadi  $e(t)$ . Setelah itu *kontrol fuzzy* akan memproses selisih antara nilai *error* tersebut dengan nilai *error* sebelumnya  $error(t-1)$  dan menjadikannya *delta error* ( $ce$ ). Hasil dari kedua perhitungan tersebut akan diproses ke tahapan selanjutnya.

## 2. Tahap *Rule Evaluation*

Tahap *rule evaluation* merupakan tahap pemetaan nilai derajat keanggotaan dari masing – masing *error* dan *delta error* ke dalam tabel yang berisi basis aturan

yang dipilih (*rule base*) dan menggunakan sebuah metode untuk pemilihan nilai dari derajat keanggotaan. Tabel *rule base* dilihat pada tabel 5 dibawah ini

Tabel 3.4 *Rule Base Fuzzy Logic Controller*

<i>Fuzzy Rules</i>	<i>Delta Error</i>				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	PB	PB	Z	PB	PB
NS	PB	PB	NS	PB	PB
<i>Error</i> Z	PS	PS	Z	PS	PS
PS	NB	NB	PS	NB	NB
PB	NB	NB	Z	PB	NB

### 3. Defuzzifikasi

Pada Tahap *defuzzifikasi* ini dilakukan berdasarkan derajat keanggotaan yang didapatkan pada proses inferensi, yang kemudian pada tahap ini dilakukan dengan menggunakan metode centroid yaitu diperoleh dengan menghitung momen dan luas daerah implikasi seperti yang terdapat dibawah ini :

$$Z^* = \frac{\int \mu D. (z). z dz}{\int \mu D. (z). z dz}$$

Kemudian menghitung luas daerah pada setiap daerah implikasi, semisal daerah implikasi berbentuk segitiga maka menggunakan rumus sebagai berikut :

$$A = \frac{1}{2} x (\alpha . t)$$

### 3.9 Algoritma MPPT

*Maximum Power Point Tracking* merupakan suatu metode yang digunakan untuk mengoptimalkan daya keluaran dari suatu pembangkit. Pada pembangkit listrik tenaga angin, MPPT mengoptimalkan daya keluaran dari sebuah generator dengan konverter daya. Pada penelitian ini, pengujian MPPT dilakukan terhadap variabel *input fuzzy logic* berdasarkan algoritma MPPT yang digunakan yaitu dengan meninjau karakteristik dari sistem turbin angin serta berdasarkan literatur

terdahulu mengenai desain kontrol *fuzzy* MPPT. Algoritma MPPT yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Algoritma *Incremental Conductance*.

### 3.9.1 Algoritma (i) Penjumlahan dari konduktansi dan kenaikan konduktansi sebagai *input* (*Incremental Conductance*)

Berdasarkan pada kurva karakteristik P – V , turunan dari daya dan tegangan akan bernilai nol pada saat kondisi MPP (*Maximum Power Point*):

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow I + V \frac{dI}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} = 0 \dots\dots\dots(3.8)$$

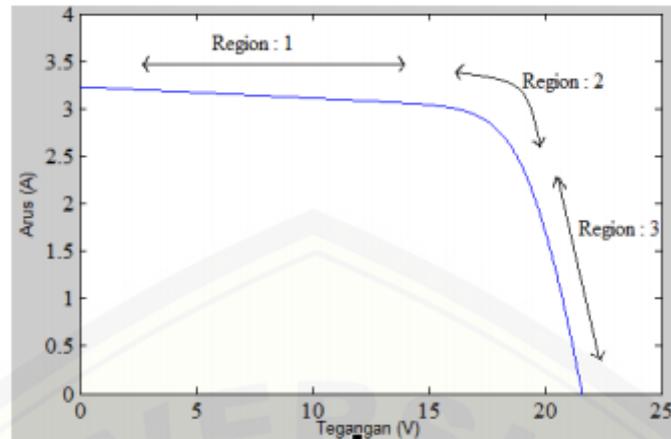
Ciri dari algoritma ini ialah ketika  $I/V + dI/dV > 0$ , titik operasi akan berada pada sisi kiri MPP. Dengan kata lain, tegangan *output* terlalu rendah, maka sistem harus mengurangi *duty ratio* dengan tujuan untuk meningkatkan tegangan *output* dari konverter. Pada algoritma ini, menggunakan 2 buah variable input *fuzzy* , yakni E dan CE, dimana :

$$E = \frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} \dots\dots\dots (3.9)$$

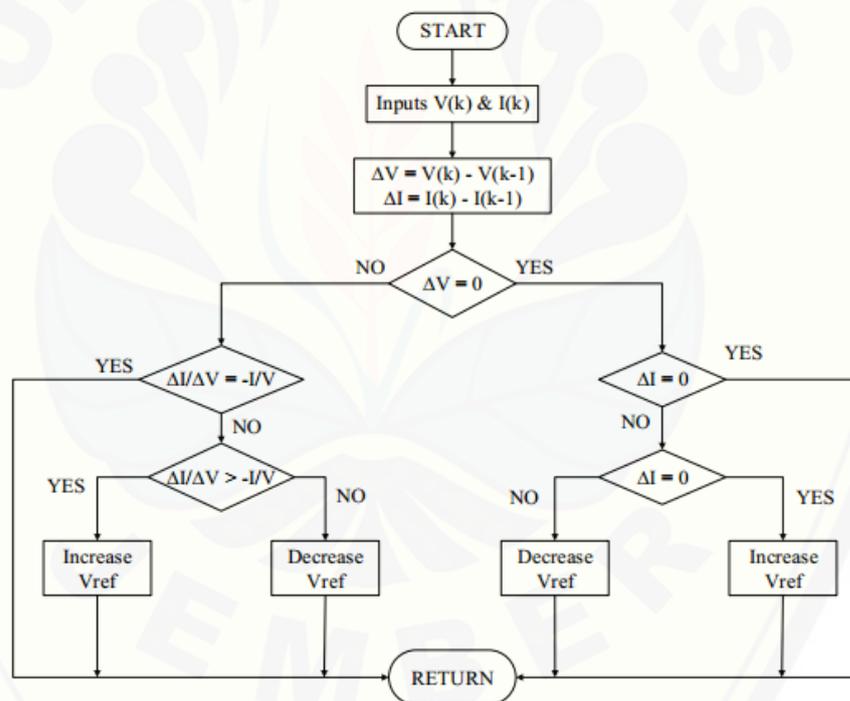
$$CE = E(k) - E(k-1) \dots\dots\dots(3.10)$$

Disini, E (*Error*) dibuat sedemikian rupa sehingga dapat mendeskripsikan kondisi kenaikan konduktansi menjadi nol disaat MPP telah dicapai (pada persamaan 3.7). Sedangkan E(k) dan E(k-1) merupakan besar *error* saat ini dan *error* saat sebelumnya, yang mana jika dikurangkan akan menjadi perubahan dari besar *error* (*change of error*).

Gambar 3.9 menunjukkan desain *fuzzy rules database* yang digunakan. Dan kurva *Membership Function* yang sesuai dari *input* dan *output* ditunjukkan pada gambar 3.11.



Gambar 3.11 Kurva Region Arus dan Tegangan. (Shiau,2015)



Gambar 3.12 Diagram Alir Algoritma *Incremental Conductance*

Algoritma *Incremental Conductance* memperbolehkan sistem untuk mengidentifikasi secara langsung lokasi dari titik operasi yang sesuai dengan MPP tidak seperti pada Algoritma *Perturb Observe* variasi dari nilai parameter luar digunakan untuk mengestimasi apakah sistem telah menjejak titik operasi pada MPP. Oleh sebab itu, kegunaan dari algoritma ini adalah untuk mendesain domain

keluaran yang mengizinkan ukuran nilai *duty ratio* yang lebih besar untuk meningkatkan efisiensi dari proses MPPT. *Rules database* untuk algoritma ini diganti menjadi 3 region. Berikut merupakan pembagian *region*:

1. Region 1. Titik operasi berada pada sisi kiri MPP. Daerah didekat titik operasi dari MPP digunakan untuk menentukan derajat dari penurunan *duty ratio* untuk proses MPPT tersebut.
2. Region 2. Titik operasi berada tepat pada MPP. *Output* diterapkan pada ZE.
3. Region 3. Titik operasi berada pada sisi kanan dari MPP. Daerah didekat titik operasi dari MPP digunakan untuk menentukan derajat dari kenaikan *duty ratio* untuk proses MPPT tersebut (Shiau, 2015).

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian Optimalisasi Daya Keluaran Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan menggunakan algoritma *Incremental Conductance* berbasis *Fuzzy Logic* maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Perancangan simulasi kontrol Pembangkit Listrik Tenaga Angin pada dirancang dengan menggunakan Algoritma *Incremental Conductance* sebagai pengendali titik daya maksimum yang di implementasikan pada suatu *buck-boost converter* karena tegangan keluaran dari turbin angin bersifat fluktuatif dikarenakan kecepatan angin yang bervariasi, agar didapatkan daya yang optimal.
2. Pada algoritma *Incremental Conductance*, sistem mampu mencapai daya maksimumnya (MPPT) sebesar 657,39 W yaitu pada kecepatan angin sebesar 10.05 m/s dengan beban resistansi sebesar 50 ohm, sedangkan jika tanpa menggunakan MPPT, daya maksimum yang dicapai hanya sebesar 542 W yaitu pada beban yang sama yaitu 50 ohm.
3. Nilai efisiensi tertinggi pada *buck-boost converter* dengan kecepatan angin sebesar 2.51 m/s, pada beban 25  $\Omega$  terdapat pada saat *duty cycle* 60% yaitu efisiensi daya sebesar 91% dengan daya *input* 3.032 watt dan daya *output* sebesar 2.747 watt.
4. Perbandingan efisiensi daya yang diperoleh pada sistem dengan menggunakan MPPT lebih besar dibandingkan dengan sistem tanpa MPPT, efisiensi daya rata-rata yang diperoleh sistem dengan MPPT yaitu sebesar 92,8% dengan efisiensi tertinggi sebesar 96,7% dan efisiensi terendah sebesar 88,7%. Sedangkan sistem tanpa MMPPT hanya memperoleh efisiensi daya sebesar 90,2% dengan efisiensi tertinggi sebesar 93,5% dan efisiensi terendah sebesar 87,5%

## 5.2 Saran

Setelah dilakukannya penelitian ini, ada beberapa saran yang dapat digunakan untuk pengembangan penelitian yang selanjutnya. Beberapa saran tersebut antara lain sebagai berikut :

1. Dapat dilakukannya implementasi sistem pada rancang bangun pembangkit listrik tenaga angin.
2. Pada penelitian ini, hanya membandingkan daya yang di optimasi dengan dan tanpa menggunakan MPPT, untuk selanjutnya mungkin bisa ditambahkan dengan membandingkan beberapa metode MPPT yang lainnya.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Haryanto, Ismoyo. 2009. Pengembangan Perancangan *Airfoil* Sudu Turbin Angin Kecepatan Rendah Berbasis Komputasi Cerdas. Jurusan Teknik Mesin. Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.
- Wuryanduri, Rehang. 2016. Desain Generator Magnet Permanen Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Angin Pada Daerah Kecepatan Angin Rendah. Jurusan Teknik Elektro. Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Daryanto, Y. 2007. Kajian Potensi Angin untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu. Yogyakarta : BALAI PPTAGG – UPT-LAGG
- Novitasari. 2014. Optimalisasi Daya Output Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan *Permanent Magnet Synchronous Generator* berbasis *Neural Network*. Skripsi. Jember : Fakultas Teknik Universitas Jember
- Otong, Muhammad, dan Rifai Mardanie. *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin menggunakan *Buck-boost Converter*. *Jurnal Ilmiah*. Serang, Banten : Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Banten
- Shiau, Jaw – Kuen, Wei, Yu – Chen dan Lee, Min – Yi. 2015. *A Study on the Fuzzy-Logic-Based Solar Power MPPT Algorithms Using Different Fuzzy Input Variables*. *Algorithms*. 8 : 100 – 127. ISSN 1999-4893.
- Armaditya. 2012. *Maximum Power Point Tracking (MPPT) Pada Variable Speed Wind Turbine (VSWT) Dengan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) menggunakan Switch Mode Rectifier (SMR)*. Jurusan Teknik Elektro ITS. Surabaya.

Muldi Yuhendri, Mochammad Ashari, Mauridhi Hery Purnom. 2009. *Maximum Output Power Tracking Pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin Stand Alone Berbasis Neural Network Counterpropagation-Fuzzy Logic Controller*. Jurusan Teknik Elektro ITS. Surabaya.

Wander, Inderpreet Singh. 2011. *Modeling Of Synchronous Generator And FullScale Converter For Distribution System Load Flow Analysis*. Master of Technology, Electrical Engineering, P. A. University. India.

Rand, Joseph. 2010. *KidWind Project: Wind Turbine Blade Design*. s.l. : National Wind Technology Center, 2010.

Utami, Sri. 2017. Implementasi Algoritma *Perturb and Observe* untuk mengoptimasi Daya Keluaran *Solar Cell* Menggunakan MPPT. *Jurnal Infotel*. 9(1) : 92 – 99. ISSN : 2085-3688; e-ISSN : 2460-0997.

Rifa'i, Muhammad. 2016. *Desain Rangkaian Buck-Boost Converter Pada Sistem Charging Lampu Penerangan Lingkungan Pondok Pesantren Di Kota Malang*. Prosiding SENTIA. Volume 8 – ISSN: 2085-2347

Akbar, Ridwanyah M., Hidayat, I. dan Adam, K. B. 2016. *Rancang Bangun Dan Implementasi Buck Boost Converter Dengan Maximum Power Point Tracking Menggunakan Metode Perturb And Observe*. E-Procedding. 3(3) : 4178 – 4184. ISSN : 2355-9365.

Afandhi, Rizal Noer. 2013. *Metode Optimasi Maximum Power Point Tracking (MPPT) Pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin Daerah Tepi Pantai Watu Ulo Menggunakan PI-Fuzzy Logic Controller*. *Skripsi*. Jember : Fakultas Teknik Universitas Jember

Ian Laird, D. D.-C. (2013). High Step-Up DC/DC Topology and MPPT Algorithm

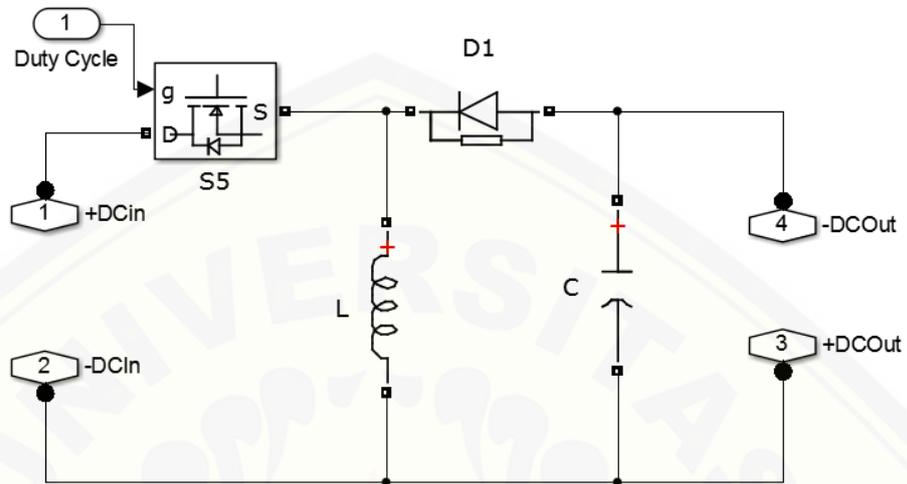
for Use With a Thermoelectric Generator. *IEEE*, 28(7)

Kok, T. S., Mekhilef, S., & Safari, A. (2013). Simple and low cost *incremental conductance* maximum power point tracking using *buck-boost* converter. *journal of renewable energy and sustainable energy* 5, 1-12

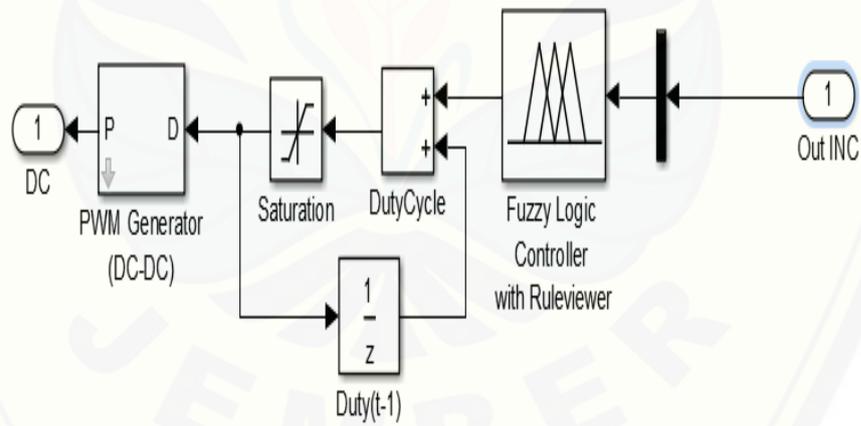


LAMPIRAN

A. Gambar Pada Simulink Matlab

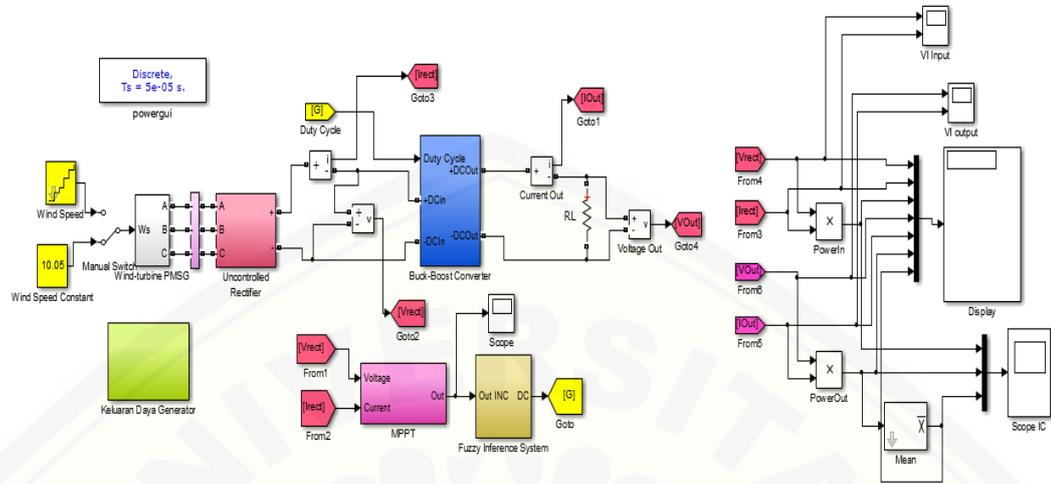


Gambar 1. Rangkaian *Buck-Boost Converter*

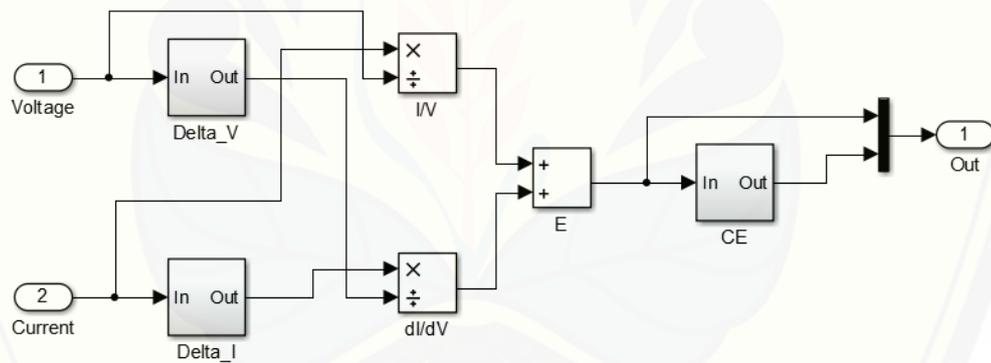


Gambar 2. Sub Blok *Fuzzy Logic Controller*

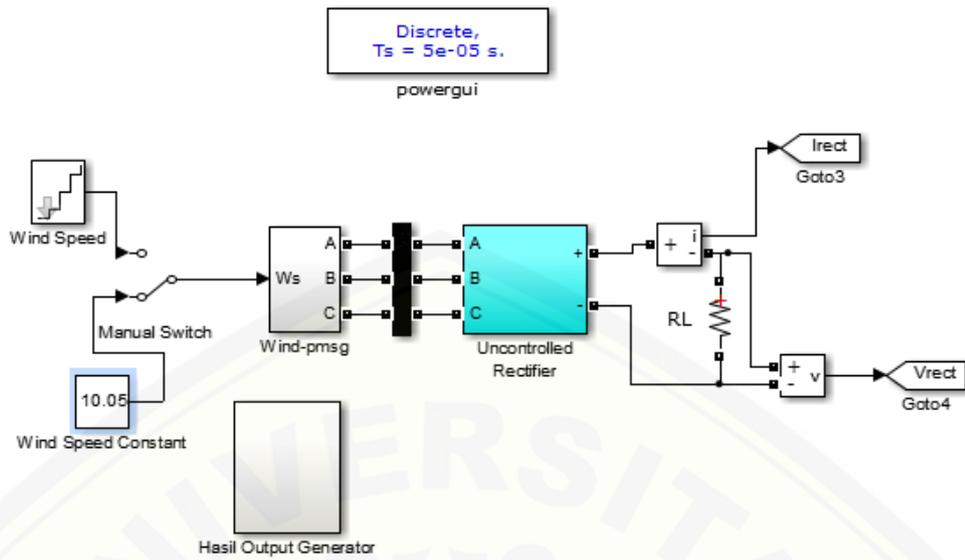
OPTIMALISASI DAYA KELUARAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN DENGAN MENGGUNAKAN ALGORITMA INCREMENTAL CONDUCTANCE BERBASIS FUZZY LOGIC  
SITA AGUSTINA (JIS1910201085)



Gambar 5. Blok Simulink Sistem *Fuzzy* Mppt Algoritma *Incremental Conductance*



Gambar 6. Sub Blok Input *Fuzzy* MPPT Algoritma *Incremental Conductance*



Gambar 7. Blok Simulink Sistem Tanpa menggunakan MPPT