

SKRIPSI

**“IMPLEMENTASI PENJEJAK TITIK DAYA MAKSIMUM BERBASIS
LOGIKA SAMAR UNTUK DAYA KELUARAN OPTIMAL PADA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU”**

disusun dan diajukan oleh :

MAWAR MELATI

D041 17 1013



DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**IMPLEMENTASI PENJEJAK TITIK DAYA MAKSIMUM BERBASIS LOGIKA
SAMAR UNTUK DAYA KELUARAN OPTIMAL PADA PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA BAYU**

Disusun dan diajukan oleh :

MAWAR MELATI

D041 17 1013

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi
Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 24 Januari 2022
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping

Dr. Ir. Hj. Sri Mawar Said, M.T.
NIP. 19601106 198601 2 001

Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, M.T.
NIP. 19621231 119903 1 024



Ketua Program Studi

Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT.
NIP. 19691026 199412 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Mawar Melati

NIM : D041171013

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : SI

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**“IMPLEMENTASI PENJEJAK TITIK DAYA MAKSIMUM BERBASIS
LOGIKA SAMAR UNTUK DAYA KELUARAN OPTIMAL PADA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU”**

- Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri dan semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitnya. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Makassar, 10 Januari 2022

Yang membuat pernyataan


METERAL
TEMPEL
1CEFAJX696362242

Mawar Melati

ABSTRAK

Peningkatan jumlah penduduk yang signifikan mendorong peningkatan kebutuhan terhadap energi listrik. Untuk memenuhi kebutuhan energi masyarakat yang meningkat, diperlukan adanya penambahan pembangkit untuk menyuplai tenaga listrik sesuai dengan kebutuhan masyarakat. Selain penambahan pembangkit listrik, pengoptimalan daya keluaran setiap pembangkit juga perlu diperhatikan. Salah satu cara untuk mengoptimalkan daya keluaran pada pembangkit listrik tenaga bayu adalah dengan menggunakan penjejak titik daya maksimum menggunakan algoritma perubahan konduktansi dengan sistem kontrol Logika Fuzzy atau disebut juga Logika Samar. Algoritma perubahan konduktansi merupakan salah satu metode untuk menjejak titik daya maksimum. Algoritma ini menggunakan pengukuran penambahan pada perubahan konduktansi pada generator untuk mengetahui perubahan daya, tegangan maupun arus pada generator. Sistem kontrol Logika Samar diimplementasikan untuk membantu teknik penjejak titik daya maksimum konvensional untuk mendapatkan titik tegangan operasi maksimum lebih cepat dan juga dapat meminimalisir fluktuasi tegangan setelah titik daya maksimum. Dari penelitian yang dilakukan, dihasilkan bahwa daya keluaran pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu menggunakan penjejak titik daya maksimum lebih besar dibandingkan dengan daya keluaran pada Sistem Pembangkit Tenaga Bayu tanpa menggunakan penjejak titik daya maksimum. Metode penjejak titik daya maksimum menggunakan algoritma perubahan konduktansi dengan sistem kontrol Logika Samar memperoleh hasil yang lebih optimal untuk menghasilkan daya maksimum pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu.

Kata Kunci : Listrik, Penjejak Titik Daya Maksimum, Algoritma Perubahan Konduktansi, Logika Samar, Optimal, Daya Keluaran.

ABSTRACT

A significant increase in population has led to an increase in the need for electrical energy. To meet the increasing energy needs of the community, it is necessary to add additional generators to supply electricity according to the needs of the community. Furthermore the addition of power plants, optimizing the output power of each generator also needs to be considered. One of the ways to optimize the output power of a wind power plant is to use a maximum power point tracker using a conductance change algorithm with a Fuzzy Logic control system. The conductance change algorithm is one method to track the maximum power point. This algorithm uses additional measurements of changes in the conductance of the generator to determine changes in power, voltage and current in the generator. Fuzzy Logic control system is implemented to assist conventional maximum power point tracking techniques to get the maximum operating voltage point faster and can also minimize voltage fluctuations after the maximum power point. From the research conducted, it is found that the output power of the Wind Power Generation System using a maximum power point tracker is greater than the output power of the Wind Power Generation System without using a maximum power point tracker. The maximum power point tracking method uses a conductance change algorithm with a Fuzzy Logic control system to obtain more optimal results to produce maximum power in the Wind Power Generation System.

Keywords: *Electricity, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Incremental Conductance Algorithm, Fuzzy Logic, Optimal, Output Power.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah subhanahu wa ta'ala, Tuhan semesta alam, atas limpahan rahmat, karunia, dan hidayah-Nya, demikian pula Salam dan shalawat kita tuturkan kepada Baginda Rasulullah Muhammad SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Implementasi Penjejak Titik Daya Maksimum Berbasis Logika Samar Untuk Daya Keluaran Optimal Pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu”. Tujuan penulisan skripsi ini untuk memenuhi sebagian syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) bagi mahasiswa program S1 di program studi Teknik Elektro Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan skripsi ini tidak mudah, banyak kendala dan tantangan yang dihadapi. Namun berkat pertolongan dari Allah subhanahu wa ta'ala melalui bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat penulis menghaturkan terima kasih yang sebesar-besarnya bagi semua pihak yang telah memberikan bantuan moril maupun material baik langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan skripsi ini hingga selesai. Maka, dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang tulus kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Rahab Djasman dan Ibu Asriani beserta keluarga tercinta yang tidak henti-hentinya memberikan doa dan dukungan dalam bentuk apapun kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

2. Ibu Dr. Ir. Hj. Sri Mawar Said M.T., selaku Pembimbing I dan Bapak Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang selaku Pembimbing II, terima kasih telah meluangkan waktu dan memberikan bimbingan, gagasan, serta ide-ide dalam penyelesaian skripsi ini.

3. Bapak Dr. Indar Chaerah Gunadin M.T., dan Bapak Ir.H.Gassing, M.T., selaku dosen penguji yang selalu memberikan saran, koreksi, dan arahan demi sempurnanya skripsi ini.

4. Ibu Dr.Eng. Dewiani, S.T., M.T dan Bapak Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T. selaku Ketua dan Sekretaris Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

5. Ibu Dr.Ir.Ingrid Nurtanio, M.T dan Ibu Andarini Asri S.T., M.T yang telah bersedia meluangkan waktunya untuk memberikan saran dan arahan dalam pengerjaan skripsi ini.

6. Seluruh dosen dan staf pengajar yang telah memberikan kami ilmu, bantuan dan kemudahan selama kami menempuh pendidikan di Departemen Teknik Elektro.

7. Kepada Rekan-Rekan “EQUAL17ER 2017” Departemen Teknik Elektro angkatan 2017 yang sejak pertama menginjakkan kaki di Universitas Hasanuddin hingga saat ini berjuang bersama peneliti untuk menuntut ilmu di kampus merah tercinta.

8. Semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini namun tidak bisa disebutkan satu persatu pada kesempatan ini.

Akhir kata, penulis ucapkan jazaakumullahu khairan kepada seluruh pihak. Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini dikarenakan keterbatasan ilmu pengetahuan, wawasan, dan pengalaman.

Makassar, 10 Januari 2022

Mawar Melati

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN KEASLIAN.....	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	iv
<i>ABSTRACT</i>	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Potensi Energi Angin di Indonesia.....	7
2.2 Sistem Konversi Energi Angin pada PLTB	8
2.1.1 Turbin Angin	8
2.1.2 SKEA Secara Umum	12
2.1.3 SKEA Variabel Speed	13
2.2 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)	14
2.3 DC-DC Converter.....	15
2.4 Maximum Power Point Tracking (MPPT)	16
2.5 Pulse Width Modulation (PWM)	18
2.6 Logika Fuzzy.....	19

2.6.1 Himpunan Fuzzy	19
2.6.2 Struktur Dasar Logika Fuzzy	20
2.7 Algoritma Incremental Conductance	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	24
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	24
3.1.1 Tempat Penelitian	24
3.1.2 Waktu Penelitian	24
3.2 Alat dan Bahan	25
3.3 Data Yang Diperlukan	25
3.4 Prosedur Penelitian	25
3.5 Diagram Alir Penelitian	27
3.6 Blok Diagram Sistem	28
3.7 Pemodelan Turbin Angin	30
3.8 Pemodelan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)	34
3.9 Perancangan Buck-boost Converter	36
3.8 Perancangan Fuzzy Logic Control (FLC)	39
3.9 Algoritma MPPT	43
3.9.1 Algoritma Penjumlahan dari konduktansi dan kenaikan konduktansi sebagai input (<i>Incremental Conductance</i>)	44
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	47
4.1 Gambaran Umum	47
4.2 Pengujian Pengaruh Kecepatan Angin terhadap Keluaran Generator	48
4.3.1 Desain Fuzzy MPPT Algoritma Incremental Conductance	53
4.4 Pengujian Implementasi MPPT Incremental Conductance Dengan Pemodelan Turbin Angin Tanpa Menggunakan Variabel Luas Daerah Sapuan Rotor Dan Kerapatan Udara (Model A)	63
4.5 Pengujian Implementasi MPPT Incremental Conductance Dengan Pemodelan Turbin Angin Yang Menggunakan Variabel Luas Daerah Sapuan Rotor Dan Kerapatan Udara (Model B)	69
4.6 Pengujian Pengaruh Resistansi Beban Terhadap Daya Pada Sistem Dengan Menggunakan MPPT Pada Pemodelan Turbin Angin Model A	73

4.7 Pengujian sistem PLTB tanpa menggunakan MPPT Pada Pemodelan Turbin Angin Model B	77
4.8 Perbandingan Daya Keluaran dengan menggunakan dan tanpa menggunakan MPPT	80
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	82
5.1 Kesimpulan.....	82
5.2 Saran.....	83
DAFTAR PUSTAKA	84
LAMPIRAN.....	87

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Potensi Energi Angin di Indonesia (<i>BPPT - outlook energy Indonesia.2016</i>).....	8
Gambar 2. 2 Komponen Turbin Angin	9
Gambar 2. 3 Jenis-jenis turbin angin (<i>Kadek Fendy Sutrisna. 2011</i>)	10
Gambar 2. 4 Sistem Konversi Energi Angin Secara Umum.....	12
Gambar 2. 5 Sistem Variable Speed (<i>Kadek Fendy Sutrisna. 2011</i>)	13
Gambar 2. 6 Rangkaian Buck-Boost Converter (<i>MH. Rashid. 2007</i>).....	16
Gambar 2. 7 Grafik Incremental conductance	22
Gambar 3. 10 Diagram Alir Algoritma Incremental Conductance	45
Gambar 4. 1 Tampilan Hasil Keluaran Generator pada kecepatan 7 m/s	49
Gambar 4. 2 Tampilan Hasil Keluaran Generator pada kecepatan 8,7 m/s	50
Gambar 4. 3 Tampilan Hasil Keluaran Generator pada kecepatan 9,2 m/s	50
Gambar 4. 4 Tampilan Hasil Keluaran Generator pada kecepatan 11,3 m/s	51
Gambar 4. 5 Tampilan Hasil Keluaran Generator pada kecepatan 13 m/s	51
Gambar 4. 6 Blok Fuzzy Logic Controller.....	52
Gambar 4. 7 Blok Input Fuzzy Algoritma Incremental Conductance	54
Gambar 4. 8 Plot Membership Function Variable Input Error	56
Gambar 4. 9 Plot Membership Function Variable Input Delta Error.....	57
Gambar 4. 10 Plot Membership Function Variable Duty ratio.....	58
Gambar 4. 11 Rule Viewer.....	62
Gambar 4. 12 Tampilan Hasil Pengujian Implementasi MPPT Incremental Conductance dengan kecepatan angin 7 m/s pada pemodelan turbin angin model A.....	64
Gambar 4. 13 Tampilan Hasil Pengujian Implementasi MPPT Incremental Conductance dengan kecepatan angin 8,7 m/s pada pemodelan turbin angin model A.....	65
Gambar 4. 14 Tampilan Hasil Pengujian Implementasi MPPT Incremental Conductance dengan kecepatan angin 9,2 m/s pada pemodelan turbin angin model A.....	66

Gambar 4. 15 Tampilan Hasil Pengujian Implementasi MPPT Incremental Conductance dengan kecepatan angin 11,3 m/s pada pemodelan turbin angin model A.....	67
Gambar 4. 16 Tampilan Hasil Pengujian Implementasi MPPT Incremental Conductance dengan kecepatan angin 13 m/s pada pemodelan turbin angin model A.....	68
Gambar 4.17 Tampilan Hasil Pengujian Implementasi MPPT Incremental Conductance dengan kecepatan angin 7 m/s dengan pemodelan turbin angin model B	70
Gambar 4.18 Tampilan Hasil Pengujian Implementasi MPPT Incremental Conductance dengan kecepatan angin 8,7 m/s dengan pemodelan turbin angin model B	71
Gambar 4.19 Tampilan Hasil Pengujian Implementasi MPPT Incremental Conductance dengan kecepatan angin 9,2 m/s dengan pemodelan turbin angin model B	71
Gambar 4.20 Tampilan Hasil Pengujian Implementasi MPPT Incremental Conductance dengan kecepatan angin 11,3 m/s dengan pemodelan turbin angin model B	72
Gambar 4.21 Tampilan Hasil Pengujian Implementasi MPPT Incremental Conductance dengan kecepatan angin 13,7 m/s dengan pemodelan turbin angin model B	72
Gambar 4.22 Daya Keluaran Sistem MPPT dengan beban 10 Ω dengan kecepatan 7 m/s pada pemodelan turbin angin model A.....	74
Gambar 4.23 Daya Keluaran Sistem MPPT dengan beban 20 Ω dengan kecepatan 7 m/s pada pemodelan turbin angin tmodel A.....	75
Gambar 4.24 Daya Keluaran Sistem MPPT dengan beban 50 Ω dengan kecepatan 7 m/s pada pemodelan turbin angin model A.....	75
Gambar 4. 25 Daya Keluaran Sistem MPPT dengan beban 75 Ω dengan kecepatan 7 m/s pada pemodelan turbin angin model A	76
Gambar 4. 26 Daya Keluaran Sistem MPPT dengan beban 100 Ω dengan kecepatan 7 m/s pada pemodelan turbin angin model A	76
Gambar 4.27 Tampilan Hasil Sistem PLTB tanpa menggunakan MPPT pada kecepatan 7 m/s	78
Gambar 4.28 Tampilan Hasil Sistem PLTB tanpa menggunakan MPPT pada kecepatan 8,7 m/s.....	78

Gambar 4. 29Tampilan Hasil Sistem PLTB tanpa menggunakan MPPT pada kecepatan 9,2 m/s.....	79
Gambar 4.30 Tampilan Hasil Sistem PLTB tanpa menggunakan MPPT pada kecepatan 11,3 m/s	79
Gambar 4.31 Tampilan Hasil Sistem PLTB tanpa menggunakan MPPT pada kecepatan 13 m/s	80

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Spesifikasi Buck-Boost Converter	38
Tabel 3. 2 Rule Base Fuzzy Logic Controller.....	42
Tabel 4. 1 Daya Keluaran Generator pada beban $20\ \Omega$	48
Tabel 4. 2 Rule base of Fuzzy Logic	59
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Implementasi MPPT Incremental Conductance dengan pemodelan turbin angin model A.....	63
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Implementasi MPPT Incremental Conductance dengan pemodelan turbin angin model B.....	69
Tabel 4.5 Daya Keluaran Sistem MPPT dengan variasi beban pada kecepatan 7 m/s.....	73
Tabel 4.6 Hasil Pengujian sistem PLTB tanpa menggunakan MPPT.....	77
Tabel 4.7 Perbandingan Daya Keluaran dengan menggunakan dan tanpa menggunakan MPPT	81

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini kebutuhan energi listrik semakin meningkat sebanding dengan pertumbuhan penduduk dengan rata-rata pertumbuhan sekitar 1,34% pada tahun 2015. Penggunaan listrik dalam kurun waktu tahun 2000-2014 mengalami pertumbuhan rata-rata 6,8% per tahun dengan rasio elektrifikasi nasional sebesar 84,4% pada tahun 2014, dimana mengalami peningkatan 3,9% dari tahun 2013. Terdapat 16,6% penduduk Indonesia yang belum mendapatkan fasilitas listrik. Pada tahun 2012, bahan bakar pembangkit nasional menggunakan bahan bakar fosil lebih dari 90%. Penggunaan energi fosil sebagai bahan bakar pembangkit listrik dapat menghasilkan emisi CO₂ sebesar 500g CO₂/kWh hingga 1200g CO₂/kWh. Di Indonesia pada tahun 2012 menghasilkan emisi gas rumah kaca sebesar 540 juta ton CO₂ dengan pertumbuhan rata-rata sebesar 5,5%. Penghasil emisi gas rumah kaca terbesar adalah pembangkit listrik dari 177 juta ton CO₂. Namun ketersediaan energi fosil yang digunakan selama ini semakin menipis, dimana cadangan batubara hanya dapat dimanfaatkan hingga 75 tahun, gas dapat dimanfaatkan hingga 33 tahun dan minyak memiliki potensi terkecil hanya dapat dimanfaatkan 12 tahun. Kondisi ini menyebabkan krisis energi di Indonesia sehingga diperlukan diversifikasi energi untuk menjamin ketersediaan energi. Hal ini sejalan dengan Undang-Undang No.30 Tahun 2007 tentang energi yang menyatakan salah satu cara penyediaan energi dilakukan melalui diversifikasi

energi dan meningkatkan penyediaan energi baru dan terbarukan. Diversifikasi energi dapat dilakukan dengan mencari energi alternatif yang dapat menggantikan penggunaan energi fosil. Indonesia memiliki potensi energi terbarukan seperti tenaga air, panas bumi, angin, surya, samudera, maupun biomasa yang cukup besar. 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). Berdasarkan beberapa sumber energi terbarukan, energi angin mengalami perkembangan yang cukup cepat. Pemanfaatan energi angin di Indonesia seringkali mengalami beberapa kendala yang 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 untuk pemanfaatan energi angin di Indonesia yang lebih maksimal perlu dilakukan pengembangan perancangan turbin angin yang mampu beroperasi pada kecepatan angin rendah (Ismoyo,2009).

Berdasarkan Global Wind Energy Outlook, pada akhir 2015, total kapasitas energi angin yang telah diinstal di lebih dari 90 negara sebesar 432,9 GW dengan rata-rata perkembangan sekitar 17%. Pemanfaatan energi angin menjadi energi listrik membutuhkan turbin angin dan generator listrik. Turbin angin beroperasi didalam dua mode yaitu kecepatan konstan (*constant speed*) atau kecepatan berubah (*variable speed*).

Sistem konversi energi angin (SKEA) sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin yang selalu bervariasi. Disamping keunggulan dari pemanfaatan energi angin, tantangan lainnya adalah fluktuasi kecepatan angin yang berubah-ubah dengan cepat. Hal ini menyebabkan ketidak-optimalan ekstraksi daya dari turbin angin. Untuk mengatasi tantangan tersebut, penelitian-penelitian sebelumnya telah dilakukan. Hasil penelitian tersebut secara umum menggambarkan bahwa untuk mengoptimalkan daya keluaran dari turbin angin, sistem perlu dilengkapi dengan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Ada beberapa metode dalam menemukan titik optimal dari sistem, diantaranya kendali *Tip Speed Ratio* (TSR), kendali *Power Signal Feedback* (PSF), *Hill Climbing Search* (HCS), *Gradient Approximation*, dan 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).

Penelitian yang akan dilakukan yaitu dengan pengoptimasian daya keluaran dengan mengimplementasikan MPPT berbasis kontrol *Fuzzy Logic* dalam menjejak daya maksimum. Diharapkan dengan menggunakan *Fuzzy Logic*, 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 *fuzzy logic* untuk nantinya dapat diketahui apakah

dengan algoritma *Fuzzy Logic* dapat mencapai MPPT secara efektif dan diharapkan dapat menghasilkan efisiensi daya yang lebih baik dibandingkan dengan tanpa menggunakan Algoritma MPPT. Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka penelitian simulasi turbin angin ini difokuskan untuk mencari titik daya maksimum dalam kondisi angin tetap dan berubah-ubah menggunakan *fuzzy logic* dengan bantuan *software Simulink MATLAB*

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang pengendalian daya maksimum PLTB menggunakan *Fuzzy Logic* ?
2. Bagaimana perbandingan daya *output* PLTB menggunakan MPPT dan tanpa menggunakan MPPT ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis langkah-langkah merancang pengendalian daya maksimum PLTB menggunakan *Fuzzy Logic*.
2. Menganalisis perbandingan antara daya *output* PLTB menggunakan MPPT dan tanpa menggunakan MPPT

1.4 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah penelitian diatas, agar pembahasan tidak terlalu luas maka diperlukan suatu pembatasan masalah. Dalam laporan ini terdapat beberapa batasan masalah yaitu:

1. Tidak membahas konstruksi dari sudut *pitch* bilah turbin angin.
2. Tidak membahas detail tentang turbin angin, generator, *rectifier* dan *converter* yang digunakan.
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 *Simulink MATLAB*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari dilakukannya penelitian ini sebagai berikut :

1. Penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan dalam pengoptimalan daya pembangkit listrik tenaga bayu.
2. Membuka wawasan penulis maupun pembaca mengenai karakteristik pembangkit listrik tenaga bayu.
3. Mendorong pembaca untuk semakin mengembangkan potensi yang dapat mengoptimalkan daya sepenuhnya pada PLTB.
4. Membuka wawasan penulis maupun pembaca mengenai pengoptimalan daya PLTB menggunakan *software Simulink MATLAB*.

1.6 Sistematika Penulisan

Penyusunan proposal ini memiliki sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Ini berisi tentang penguraian secara singkat latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan tentang teori penunjang yang relevan untuk bahan penelitian yang diperoleh dari sumber referensi untuk menyusun kerangka teori dan konseptual.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini berisi tentang waktu dan tempat penelitian, metode pengambilan data, analisa data, dan langkah-langkah penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini berisi tentang hasil dari penelitian yang telah dilakukan beserta pembahasannya.

BAB V PENUTUP

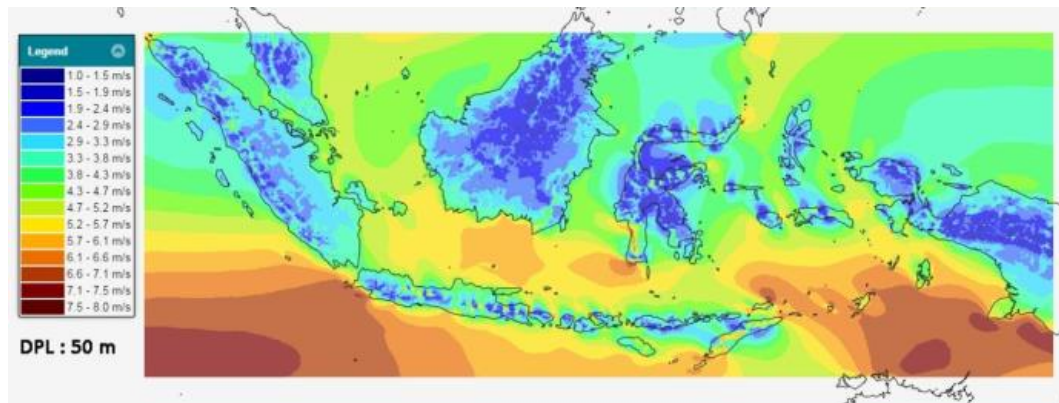
Dalam bab ini, berisi tentang kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan dan saran-saran mengenai penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Potensi Energi Angin di Indonesia

Indonesia adalah suatu negara yang dikarunia potensi alam yang begitu besar, salah satunya angin. Potensi angin yang dapat dimanfaatkan menjadi sumber energi mempunyai kecepatan diatas 5 m/s dan itu berada pada 120 lokasi dan tersebar di wilayah Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan dan Pantai Selatan Jawa (Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional.2006). Berdasarkan kementerian ESDM RI, sumber daya energi angin diberbagai wilayah Indonesia berkisar antara 2,5 – 5,5 m/s pada ketinggian 24 meter di atas permukaan tanah. Dengan kecepatan tersebut, sumber daya energi angin Indonesia termasuk dalam kategori kecepatan angin kelas rendah hingga menengah. Secara keseluruhan, potensi energi angin Indonesia diperkirakan mencapai 970 MW dan baru dimanfaatkan sekitar 1,96 MW, sehingga prospek pengembangan teknologi PLTB masih sangat tinggi. Indonesia khususnya Sulawesi Selatan terdapat dua pembangkit listrik tenaga bayu Jeneponto dan pembangkit tenaga listrik bayu di Sidrap. Pembangkit listrik tenaga bayu Jeneponto yang memiliki 20 turbin dengan masing-masing turbin berkapasitas 3,6 MW sehingga kapasitas daya yang dapat dibangkitkan oleh pembangkit tersebut adalah 72 MW. Penggunaan energi angin sebagai energi alternatif memiliki keuntungan yaitu ramah lingkungan, bebas polusi emisi CO₂, sumber daya yang tidak terbatas, handal dan mudah didapatkan.



Gambar 2. 1 Potensi Energi Angin di Indonesia (BPPT - outlook energy Indonesia.2016)

2.2 Sistem Konversi Energi Angin pada PLTB

2.1.1 Turbin Angin

Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB) merupakan suatu sistem pembangkit listrik yang mengkonversikan suatu energi kinetik dari udara menjadi energi mekanik yang menyebabkan putaran yang terjadi pada generator sehingga menghasilkan arus listrik.

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 (Ayu Fitriah,dkk.2019).

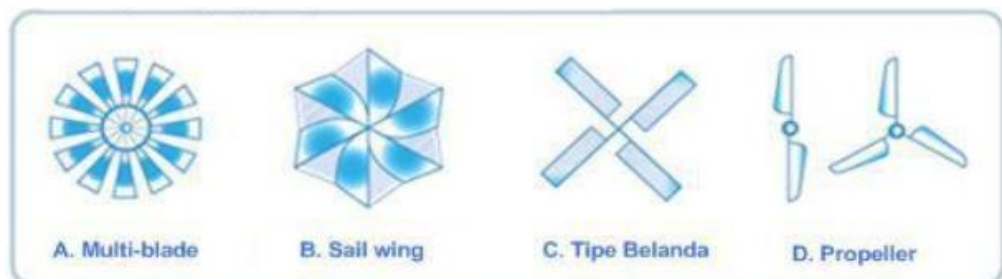


Gambar 2. 2 Komponen Turbin Angin

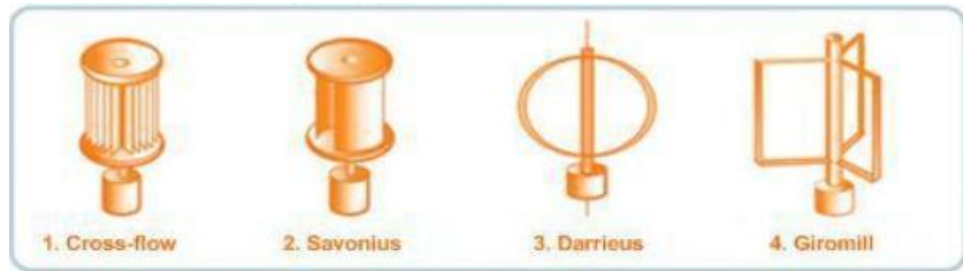
a) Kincir angin

Secara umum kincir angin dapat di bagi menjadi 2, yaitu kincir angin yang berputar dengan sumbu horizontal, dan yang berputar dengan sumbu vertikal.

a. Baling – baling yang berputar secara *Horizontal-Axis*



b. Baling-baling yang berputar secara *Vertical-Axis*



Gambar 2. 3 Jenis-jenis turbin angin (Kadek Fendy Sutrisna. 2011)

b) *Gear Box*

Merupakan suatu peralatan yang dipasang pada PLTB yang berfungsi untuk mengubah putaran rendah pada kincir menjadi putaran tinggi.

c) *Brake System*

Alat ini digunakan untuk menjaga putaran pada poros setelah *gearbox* agar bekerja pada titik aman saat terjadi angin yang besar. Alat ini perlu dipasang karena generator memiliki titik kerja yang aman dalam pengoperasiannya. Generator ini akan menghasilkan energi listrik maksimal pada saat bekerja pada titik kerja yang telah ditentukan. Kehadiran angin diluar dugaan akan menyebabkan putaran yang cukup cepat pada poros generator, sehingga jika tidak diatasi maka putaran ini dapat merusak generator. Dampak dari kerusakan akibat putaran berlebih diantaranya adalah : *overheat*, rotor *breakdown*, kawat pada generator putus, karena tidak dapat menahan arus yang cukup besar.

d) Generator

Ada berbagai jenis generator yang dapat digunakan dalam sistem turbin angin, antara lain generator sinkron (*synchronous generator*), generator tak sinkron (*asynchronous generator*), rotor sangkar maupun rotor belitan ataupun generator magnet permanen. Penggunaan generator sinkron memudahkan kita untuk mengatur tegangan dan frekuensi keluaran generator dengan cara mengatur arus medan dari generator.

e) Penyimpanan Energi

Pada sistem stand alone, dibutuhkan baterai untuk menyimpan energi listrik berlebih yang dihasilkan turbin angin.

f) Box Kontrol Turbin Angin

Setiap Turbin Angin memiliki *box* kontrol masing - masing. Fungsi dari *box* kontrol sendiri adalah untuk mengatur kecepatan putaran Pada kincir dan *supply* dalam kondisi cuaca normal. Tegangan dari turbin angin ke panel beban atau rumah induk.

g) *Dummy Load*

Merupakan tempat pembuangan tegangan berlebih yang dihasilkan oleh pembangkit.

h) *Data Logger*

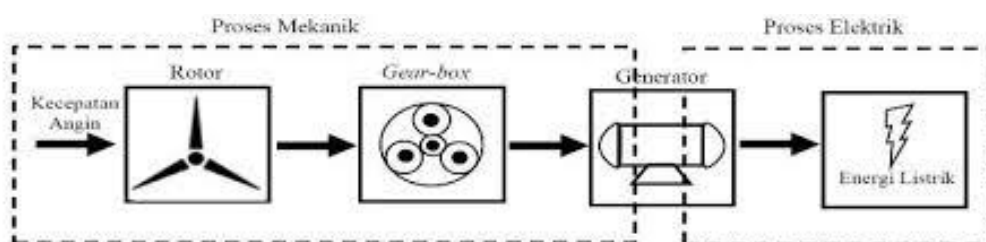
Merupakan suatu *device* yang dapat membaca berbagai macam jenis sinyal *input* yang selanjutnya merekam dan disimpan dalam memori internal serta langsung dihubungkan dengan komputer.

i) *Tower*

Tower digunakan untuk menopang dan meletakkan komponen-komponen lain pada turbin angin.

2.1.2 SKEA Secara Umum

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. Daya konverter elektronika juga dapat digunakan untuk ekstraksi daya ditingkatkan dan variabel kecepatan operasi dari turbin angin (N.A. Hidayatullah, H. Nur, dan K. Ningrum, 2016).

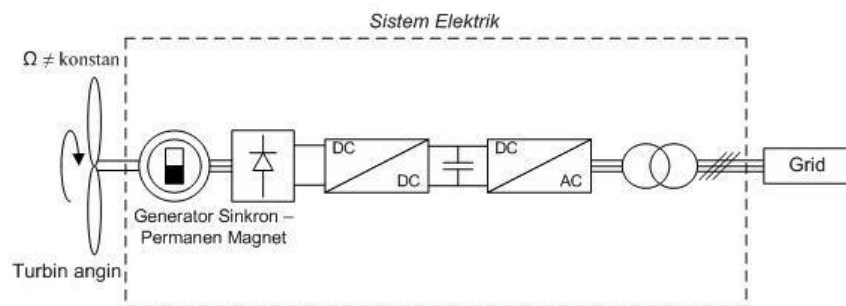


Gambar 2. 4 Sistem Konversi Energi Angin Secara Umum

Ketika rotor berputar, maka akan terinduksi ggl pada rotor sehingga menghasilkan energi listrik. Energi listrik pada turbin angin merupakan proses terakhir yang terjadi pada konversi energi. Yang dimaksud energi listrik ini adalah perubahan dari energi mekanik melalui generator sehingga menjadi arus listrik.

2.1.3 SKEA Variabel Speed

Sistem *variable speed* menggunakan generator sinkron magnet permanen (*direct drive*) dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2. 5 Sistem Variable Speed (Kadek Fendy Sutrisna. 2011)

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. Prinsip kerja generator sinkron dengan generator sinkron magnet permanen sesungguhnya tidak jauh berbeda. Penggunaan magnet permanen menghasilkan medan magnet yang tetap sehingga tidak memerlukan pencatutan arus searah untuk menghasilkan medan magnet. Sedangkan fluks diperoleh dari magnet permanen yang telah diberikan perlakuan khusus sehingga arah garis-garis gaya magnet keluar dari kutub magnet secara radial atau axial. Generator ini juga memiliki konstruksi umum yang sama yaitu memiliki lilitan stator sebagai tempat terjadinya induksi elektromagnetik, rotor tempat meletakkan magnet permanen sebagai sumber medan magnet, dan celah udara sebagai tempat mengalirnya fluks udara dari rotor ke stator. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada mesin dengan frekuensi elektrik pada stator adalah sebagai berikut:

$$f = \frac{n.p}{120} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

f = frekuensi listrik yang dihasilkan (Hz)

P = Jumlah Kutub Generator

N = putaran generator (rpm)

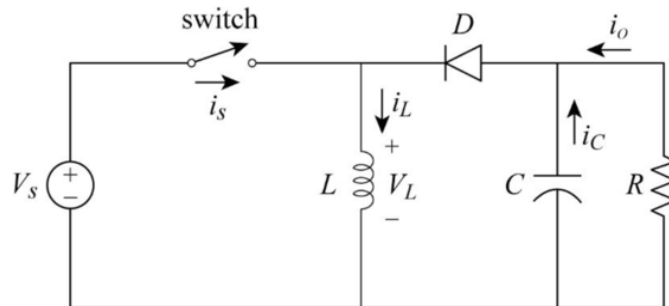
Oleh karena rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnet, persamaan diatas juga menunjukkan hubungan antara kecepatan putar rotor dengan frekuensi listrik yang dihasilkan. Agar daya listrik dibangkitkan tetap pada frekuensi 50Hz atau 60 Hz, maka generator harus berputar pada kecepatan tetap dengan jumlah kutub yang telah ditentukan. 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 generator yang biasa dipakai biasanya memerlukan arus eksitasi untuk membuat medan magnetnya sedangkan magnet permanen tidak memerlukan arus eksitasi. Desain rotor dengan jumlah kutub yang banyak memungkinkan generator ini beroperasi pada putaran rendah. Dibandingkan dengan mesin konvensional, generator magnet permanen memiliki beberapa kelebihan mampu bekerja di putaran rendah tanpa *gearbox*, biaya perawatan cenderung lebih rendah, tidak memerlukan arus eksitasi.

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 berbeda. Dalam penelitian ini konverter ini bertindak sebagai *load* elektrik yang dapat memvariasikan keluarannya. Buck-boost merupakan salah

satu regulator mode *switching* menghasilkan tegangan keluaran yang lebih kecil atau lebih besar dibanding tegangan masukannya.



Gambar 2. 6 Rangkaian Buck-Boost Converter (MH. Rashid. 2007)

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).

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.

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). Walaupun kecepatan angin bervariasi, turbin angin harus tetap dapat mengekstrak energi angin secara maksimal. Sehingga diperlukan *maximum power point tracking* (MPPT) yang berfungsi untuk mencari titik daya maksimum dan mempertahankan sistem konversi energi angin tetap menghasilkan daya optimum walaupun terjadi perubahan kecepatan angin. Pada kecepatan angin tertentu, daya maksimum akan didapatkan jika generator berputar pada kecepatan tertentu pula.

Oleh karena itu, MPPT pada sistem *variable speed wind turbine* (VSWT) dilakukan dengan mengubah kecepatan rotasi generator terhadap setiap perubahan kecepatan angin sehingga daya yang dihasilkan akan maksimum. 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. 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*.

Pada tahun 2016, Hidayatullah dan Ningrum (Hidayatullah, Nur Asyik, Ningrum, Hanifah Nur Kumala.2016) membahas tentang permasalahan meningkatkan efisiensi rasio daya keluaran pembangkit listrik tenaga angin. Pembangkit listrik tenaga angin mempunyai efisiensi daya yang rendah, sehingga energi angin yang dapat di proses hanya sekitar 30% hingga 40%. Metode yang

digunakan adalah *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). MPPT adalah suatu metode untuk mengoptimalkan daya keluaran dari pembangkit listrik tenaga angin. MPPT tersebut dapat digunakan untuk mengoptimalkan daya yang keluar dari generator. Selain itu, fungsi MPPT dapat digunakan sebagai pengendali daya yang berlebihan ketika kecepatan angin melebihi beban pada turbin angin. Hasil dari metode MPPT ini adalah sistem ini dapat meningkatkan efisiensi daya keluaran.

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 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 saklar otomatis seperti MOSFET. Hal yang berpengaruh adalah besar *duty cycle*. *Duty*

cylce merupakan perbandingan waktu *on* dan besar *duty cycle* yang digunakan untuk mengontrol konverter tergantung dari kontrol algoritma MPPT yang digunakan.

2.6 Logika Fuzzy Atau Logika Samar

Logika Fuzzy atau yang lebih sering dikenal dengan *fuzzy logic* pertama kali diperkenalkan di Universitas California di Barkeley pada tahun 1965 oleh Prof. Lutfi Asker Zadeh dalam tulisannya tentang teori himpunan *fuzzy*. 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

2.6.1 Himpunan Fuzzy

Sekumpulan objek x dimana masing-masing objek memiliki nilai keanggotaan atau membership function " μ " 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.

2.6.2 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 variable 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)

2.7 Algoritma Incremental Conductance

Algoritma *Incremental conductance* merupakan salah satu metode MPPT. Algoritma ini menggunakan pengukuran *incremental* pada perubahan konduktansi pada generator, baik termoelektrik maupun sel surya. Dengan membandingkan pengukuran *incremental*, dapat diketahui perubahan daya, tegangan maupun arus (Kok, Mekhilef, & Safari, 2013). *Incremental conductance* didefinisikan sebagai (dI_{tg} / dV_{tg}) .

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \dots \dots \dots (2.2)$$

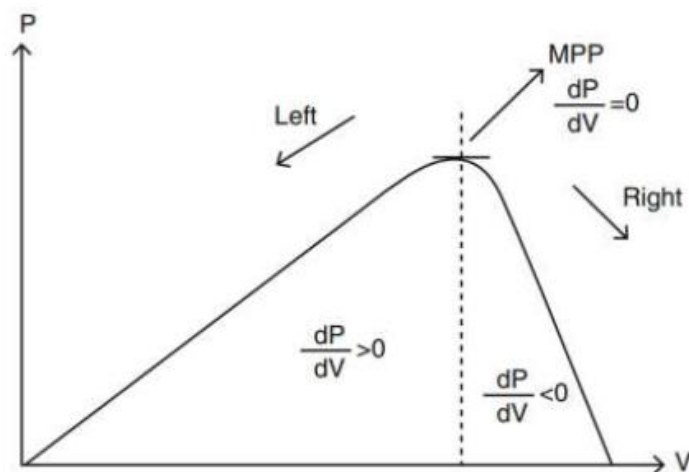
$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \dots \dots \dots (2.3)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \dots\dots\dots(2.4)$$

Persamaan 2.2 merupakan proses membandingkan nilai perubahan arus dan perubahan tegangan terhadap nilai arus dan tegangan yang ditentukan. Sedangkan Persamaan 2.3 dan 2.4 merupakan perbandingan ketika nilai tidak sama, sehingga dapat bernilai positif maupun negatif sesuai dengan besar nilai arus dan tegangan.

$$\frac{dP}{dV} = 1 + \frac{dI}{dV} \dots\dots\dots(2.5)$$

Sehingga didapatkan Persamaan 2.5 yang merupakan nilai dari perubahan daya terhadap tegangan. Nilai tersebut akan digunakan untuk mencari titik maksimum dari PV (Kok, Mekhilef, & Safari, 2013), dalam penelitian ini nilai tersebut akan digunakan untuk mencari titik maksimum dari turbin angin (Lokanadham & Bhaskar, 2012).



Gambar 2. 7 Grafik Incremental conductance

Gambar di atas 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.