



**SISTEM KONVERSI ENERGI ANGIN *GRID-TIED* BERBASIS
*FUZZY LOGIC CONTROLLER***

SKRIPSI

Oleh

Rr. Intan Januarti

NIM 111910201073

PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS JEMBER

2016



**SISTEM KONVERSI ENERGI ANGIN *GRID-TIED* BERBASIS
*FUZZY LOGIC CONTROLLER***

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi skripsi dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi S1 Teknik Elektro
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

Rr. Intan Januarti

NIM 111910201073

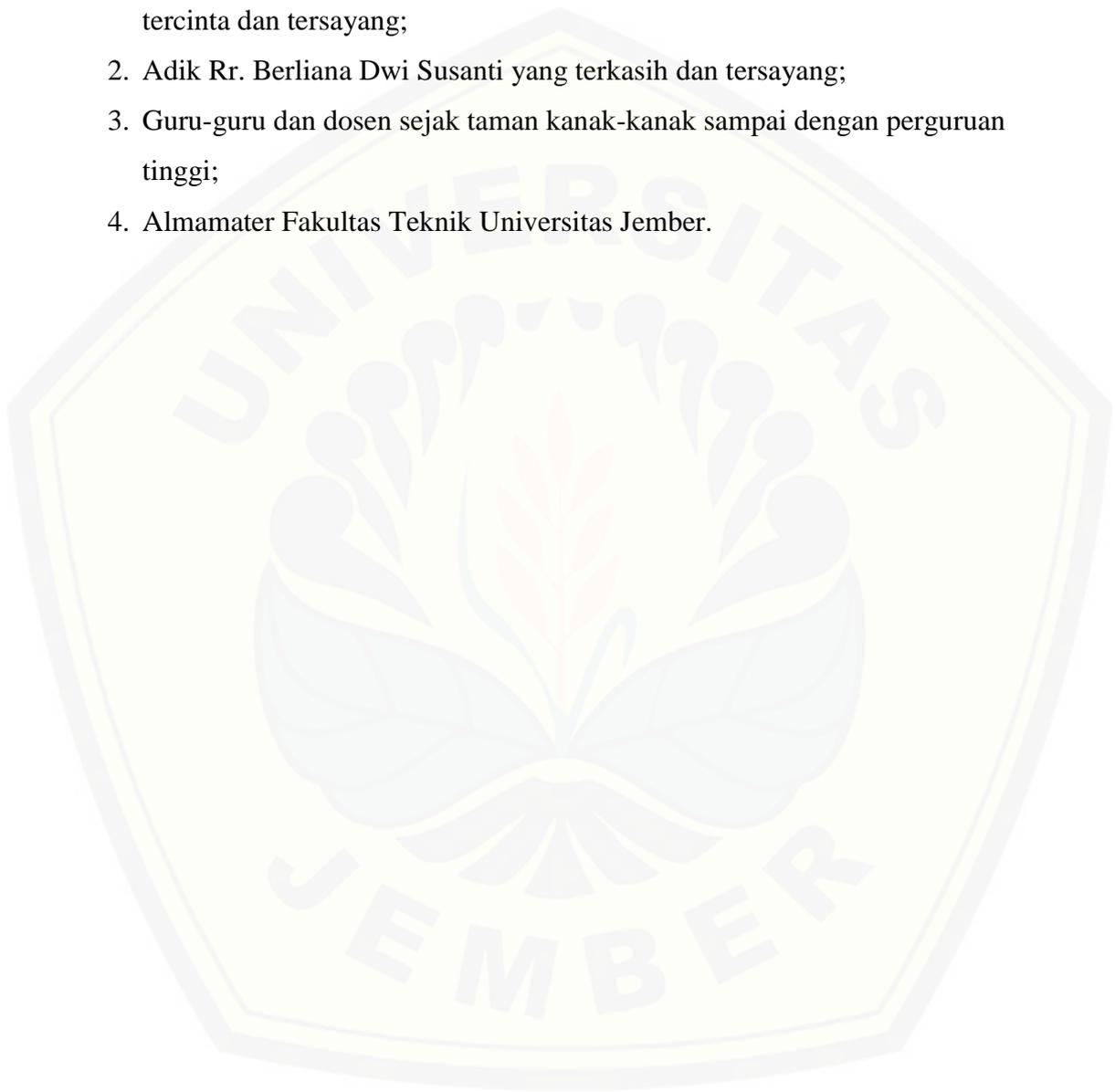
**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER**

2016

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Ibunda Rr. Idawati dan Ayahanda R. Harry Soetjahjono (almarhum) yang tercinta dan tersayang;
2. Adik Rr. Berliana Dwi Susanti yang terkasih dan tersayang;
3. Guru-guru dan dosen sejak taman kanak-kanak sampai dengan perguruan tinggi;
4. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember.



MOTO

Dan Allah tidak menjadikan pemberian bala bantuan itu melainkan sebagai khabar gembira bagi (kemenangan) mu, dan agar tenteram hatimu karenanya.

Dan kemenanganamu itu hanyalah dari Allah Yang Maha Perkasa lagi Maha Bijaksana. (Q.S. Al-Imran: 126)^{*)}

Maka nikmat Tuhan kamu yang manakah yang kamu dustakan?

(Q.S. Ar-Rahman: 13)^{**)}

Kegagalan hanya terjadi jika kita menyerah. (Lessing)^{***)}

^{*)} Departemen Agama Republik Indonesia. 2010. Al Qura'an dan terjemahannya. Semarang : PT Kumudasmoro Grafindo.

^{**)} Departemen Agama Republik Indonesia. 2010. Al Qura'an dan terjemahannya. Semarang : PT Kumudasmoro Grafindo.

^{***)} Anonim.

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

nama : Rr Intan Januarti

NIM : 111910201073

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul “Sistem Konversi Energi Angin *Gried-Tied* Berbasis *Fuzzy Logic Controller*” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan dalam institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 06 Juni 2016

Yang menyatakan,

Rr Intan Januarti

NIM 111910201073

SKRIPSI

**SISTEM KONVERSI ENERGI ANGIN *GRIED-TIED* BERBASIS
*FUZZY LOGIC CONTROLLER***

oleh

Rr Intan Januarti

NIM 111910201073

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Sistem Konversi Energi Angin *Gried-Tied* Berbasis *Fuzzy Logic Controller*” telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal : Senin, 06 Juni 2016

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember.

Tim Penguji:

Pembimbing Utama,

Pembimbing Anggota,

Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T.

Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T.

NIP 197106141997021001

NIP 197104022003121001

Penguji I,

Penguji II,

Ir. Widyono Hadi, M.T.

H.R.B.Moch. Gozali, S.T., M.T.

NIP 196104141989021001

NIP 196906081999031002

Mengesahkan

Dekan Fakultas teknik,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M.

NIP 196612151995032001

Sistem Konversi Energi Angin Gried-Tied Berbasis Fuzzy Logic Controller

Rr Intan Januarti

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

ABSTRAK

Energi angin merupakan salah satu energi alam terbarukan yang ramah lingkungan dan bebas polusi serta memiliki potensi yang cukup besar sebagai pembangkit listrik. Namun, perubahan kecepatan angin dan perubahan beban membuat daya yang dihasilkan bervariasi. Dalam tugas akhir ini, dilakukan studi tentang perancangan simulasi Sistem Konversi Energi Angin *Gried-tied* yaitu sistem hibrid antara energi angin dan *grid* yang tidak *stand alone*, jika sewaktu-waktu terjadi kekurangan daya maka beban akan disuplai oleh *AC grid*. Pada penelitian ini, Sistem Konversi Energi Angin *Gried-tied* dilengkapi dengan sistem pengaturan catu daya berbasis pada *State Of Charge (SOC)* baterai, kondisi angin, dan kondisi beban dengan menggunakan metode *Fuzzy Logic Controller (FLC)*. Dari hasil simulasi selama 1 hari *real time*, menunjukkan penggunaan *AC grid*. Percobaan dengan *SOC* awal baterai yang sama yaitu 25 %, pada saat menggunakan pensaklaran manual, saklar *AC grid* akan *ON* pada pukul 20.00 - 23.00, sedangkan pada saat menggunakan *smart switch* berbasis *FLC* saklar *AC grid* akan *ON* pada pukul 10.00 – 12.00 dan 16.00 – 22.00. Dapat disimpulkan bahwa efektifitas Sistem Konversi Energi Angin *Gried-tied* ini dapat ditentukan berdasarkan waktu pensaklaran *AC grid* dan menghindari penggunaan *AC grid* jika energi angin masih mampu mensuplai beban.

Kata kunci: *Fuzzy Logic Controller, Grid, Sistem Konversi Energi Angin.*

Wind Power System Gried-Tied Based On Fuzzy Logic Controller

Rr Intan Januarti

*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of
Jember*

ABSTRACT

Wind energy is the one of renewable energy that environmentally friendly and pollution-free and has considerable potential as a power plant. However, wind speed changes and load changes can generate the power varies. Therefore in this final project will be discussed about Wind Power System Gried-tied is hybrid system between wind turbine and grid that can connect to the grid at any time to avoid a power shortage. Wind Power System Gried-tied which is equipped with by the management of charging system based on state of charger (SOC) battery, wind turbine, and weight condition which used Fuzzy Logic Controller (FLC) method were discussed. From the simulation results, it is show that use of the AC grid, the SOC of the same battery is 25%, when manual switched used, the grid switch will turn ON at 20.00 – 23.00. While if we used smart switch based on fuzzy logic controller, then the switch will turn ON at 10.00 – 12.00 and 16.00 - 22.00. It can be concluded that the effectiveness of the Wind Power System Gried-tied can be determined at the time of switching AC grid and avoid using the AC grid when the wind energy is still able to supply the load.

Key words: *Fuzzy Logic Controller, Grid, Wind Power System.*

RINGKASAN

Sistem Konversi Energi Angin *Gried-Tied* Berbasis *Fuzzy Logic Controller*;
Rr Intan Januarti, 111910201073; 2016; 81 halaman; Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Jember.

Perkembangan zaman menyebabkan kebutuhan energi dunia terus meningkat, hal ini dikarenakan penambahan jumlah penduduk, ekonomi dan pola konsumsi energi itu sendiri. Masyarakat Indonesia tergantung pada pasokan listrik dari PLN yang digunakan baik untuk kebutuhan penerangan maupun untuk mendukung kegiatan ekonomi, seperti pada industri. Namun ketersediaan energi fosil semakin hari semakin menipis. Oleh karena itu alternatif lain yaitu menggunakan energi terbarukan (*renewable energy*). Energi angin merupakan salah satu energi alam terbarukan yang ramah lingkungan dan bebas polusi serta memiliki potensi yang cukup besar sebagai pembangkit listrik. Namun, masalah utama dari jenis energi tersebut adalah tidak tersedia terus menerus. Energi angin tersedia pada waktu yang sering kali tidak dapat diprediksi (*sporadic*), dan sangat berfluktuasi tergantung cuaca atau musim.

Dalam tugas akhir ini, dilakukan studi tentang perancangan simulasi Sistem Konversi Energi Angin *Gried-tied* yaitu sistem hibrid antara energi angin dan *grid* yang tidak *stand alone*, jika sewaktu-waktu terjadi kekurangan daya maka beban akan disuplai oleh *AC grid*. Pemanfaatan Sistem Konversi Energi Angin *Gried-tied* ini hanya dimaksudkan untuk sebisa mungkin mengurangi pemakaian energi listrik PLN yang dianggap sebagai energi yang berasal dari bahan bakar fosil. Pada penelitian ini, Sistem Konversi Energi Angin *Gried-tied* dilengkapi dengan sistem pengaturan catu daya berbasis pada *State Of Charge (SOC)* baterai, kondisi angin, dan kondisi beban dengan menggunakan metode *Fuzzy Logic Controller (FLC)*. Sistem yang akan dirancang dalam penelitian ini adalah Sistem Energi Angin yang terhubung dengan *grid (grid-tied)* tetapi tidak disinkronkan pada sisi listrik *AC*-nya, sehingga sistem tersebut dirancang untuk terhubung dengan *grid* menggunakan *change over switch* yang dikontrol

berdasarkan pertimbangan kebutuhan daya dan energi yang tersimpan dalam baterai.

Pada penelitian ini terdapat 2 percobaan dengan *SOC* awal baterai yang sama yaitu 25 % yaitu percobaan pertama Sistem Konversi Energi Angin *Gried-tied* terhubung dengan *AC Grid* dengan menggunakan *manual-switch*, hasil simulasi selama 1 hari *real time* menunjukkan penggunaan *AC grid* pada manual switch, saklar *AC grid* akan *ON* pada pukul 20.00 -23.00. Pada percobaan kedua, Sistem Konversi Energi Angin *Gried-tied* terhubung dengan *AC Grid* dengan menggunakan *smart switch* berbasis *Fuzzy Logic Controller (FLC)* sakelar *AC grid* akan *ON* pada pukul 10.00 – 12.00 dan 16.00 – 22.00. Dapat disimpulkan bahwa efektifitas Sistem Konversi Energi Angin *Gried-tied* ini dapat ditentukan berdasarkan waktu pensaklaran *AC grid* dan menghindari penggunaan *AC grid* jika energi angin masih mampu mensuplai beban.

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Sistem Konversi Energi Angin *Gried-Tied* Berbasis *Fuzzy Logic Controller*”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M. selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Jember;
2. Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember;
3. Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama (DPU) yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan memberikan masukan serta saran demi terselesaikannya skripsi ini;
4. Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Anggota (DPA) yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
5. Andi Setiawan, S.T., M.T. selaku Dosen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember yang telah meluangkan waktu dan pikiran dalam penyusunan skripsi ini;
6. Ir. Widyono Hadi, M.T. selaku Dosen Penguji I yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat membangun demi penyempurnaan skripsi ini;
7. H.R.B. Moch. Gozali, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktu untuk mengoreksi dan memberikan masukan demi penyempurnaan skripsi ini;
8. Sumardi, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing selama penulis menjadi mahasiswa;
9. M. Agung Prawira Negara, S.T., M.T. selaku Komisi Bimbingan S1 yang telah membantu penulisan skripsi secara administratif;

10. Ibunda Rr. Ida Wati dan ayahanda R. Harry Soetjahjono (almarhum) yang telah memberikan dukungan moril dan materiil serta kasih sayang yang tak terhingga;
11. Adik Rr. Berliana Dwi Susanti yang telah memberikan motivasi dan semangat;
12. Kakak Muh. Amienur Rahman yang telah memberikan dukungan serta semangat dalam pengerjaan skripsi ini;
13. Keluarga besar Ersat Broto Amidarmo dan Harun Al Rasyid yang telah memberikan dukungan moril dan materiil.
14. Keluarga besar asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik Mas Sugi, Mala, Darma, Yudha, Mas Satriyo, Mas Gilang, Mbak Novita, Mbak Desti, Mas Takul, Mas Ghifery, Tutut, Tyok, Fajar yang telah memberikan pengalaman selama menjadi asisten laboratorium;
15. Keluarga kuri-kuri Anisia, Kiki, Ervina, Bahtiar, Firzon, Reza, Lukman, Opang, dan Hafidi atas pengalaman berharga yang kita lalui bersama dalam setiap perkumpulan;
16. Rekan-rekan Darma, Novi, Rifan, Alm. Fikri, Iskandar, Dimas, Ilham, dan Novan yang selalu membantu dan meluangkan waktunya di masa kuliah;
17. Rekan-rekan Siska Febri, Siti Safarina, dan Avianti Sondhar yang telah meluangkan waktu bersama selama kuliah di Jember;
18. Sahabat-sahabat seperjuangan Teknik Elektro 2011 yang telah memberikan motivasi dan semangat dalam perjuangan selama di bangku kuliah;
19. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, 06 Juni 2016

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
HALAMAN PEMBIMBINGAN	vi
HALAMAN PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
RINGKASAN	x
PRAKATA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xx
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	4
1.5 Manfaat	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Energi Angin	5
2.2 Turbin Angin	6
2.2.1 Sub Sistem Turbin Angin	7
2.2.2 Jenis Turbin Angin	9
2.2.3 Daya Pada turbin Angin	13
2.3 Permanent Mangnet Synchronous Generator	15
2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Angin	16

2.5 Rectifier	17
2.5.1 Penyearah Tiga Fasa Sistem Jembatan	17
2.6 SOC Baterai.....	18
2.7 Fuzzy Logic Controller (FLC)	19
2.8 Matlab	25
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 Jenis Penelitian.....	27
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian.....	27
3.3 Alat dan Bahan.....	27
3.4 Prosedur Penelitian.....	28
3.5 Diagram Alir Penelitian	30
3.6 Perancangan Sistem / Blok Diagram Sistem	31
3.7 Penentuan Ukuran Sistem.....	31
3.7.1 Penentuan Tegangan Nominal Sistem	32
3.7.2 Penentuan Ukuran Beban.....	32
3.7.3 Perhitungan Kapasitas BCR.....	32
3.7.4 Penentuan Kapasitas Baterai.....	33
3.8 Pemodelan Sistem	34
3.8.1 Pemodelan Wind Power System.....	34
3.8.2 Pemodelan Wind Turbine	34
3.8.3 Pemodelan PMSG.....	36
3.8.4 Pemodelan Transformator.....	37
3.8.5 Pemodelan Rectifier.....	38
3.8.6 Pemodelan AC Grid (PLN).....	38
3.8.7 Pemodelan Baterai	39
3.8.8 Pemodelan Beban	42
3.9 Perancangan Algoritma Kontrol <i>Smart-Switch</i> dengan <i>Fuzzy Logic Controller</i>	43
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	53
4.1 Karakteristik Kecepatan Angin di Pantai Watu Ulo	53
4.2 Pengujian Turbin Angin	54

4.3 Analisis Energi Permintaan Kebutuhan Beban.....	55
4.4 Analisis Karakteristik Kebutuhan Daya	56
4.5 Karakteristik Pengisian (<i>Charger</i>) dan Pengosongan (<i>Discharge</i>) pada Baterai	57
4.5.1 Karakteristik Pengisian (<i>Charger</i>).....	58
4.5.2 Karakteristik Pengosongan (<i>Discharge</i>)	61
4.6 Simulasi Sistem Energi Angin <i>Gried-Tied</i> dengan <i>Manual</i> <i>Switch</i>	63
4.7 Simulasi Sistem Energi Angin <i>Gried-Tied</i> dengan <i>Smart</i> <i>Switch</i>	73
BAB 5. PENUTUP.....	80
5.1 Kesimpulan.....	80
5.2 Saran	80
DAFTAR PUSTAKA	82

DAFTAR TABEL

	Halaman
3.1 Data pembebanan	32
3.2 Data spesifikasi turbin angin.....	36
3.3 Parameter PMSG.....	37
3.4 Parameter pemodelan baterai	41
3.5 Semesta dan jangkauan tiap-tiap variabel fuzzy logic controller	44
3.6 Fungsi keanggotaan masukan variabel soc baterai	45
3.7 Fungsi keanggotaan masukan variabel arus angin (<i>iwind</i>)	46
3.8 Fungsi keanggotaan masukan variabel arus beban (<i>iload</i>)	47
3.9 Fungsi keanggotaan masukan variabel <i>output</i>	48

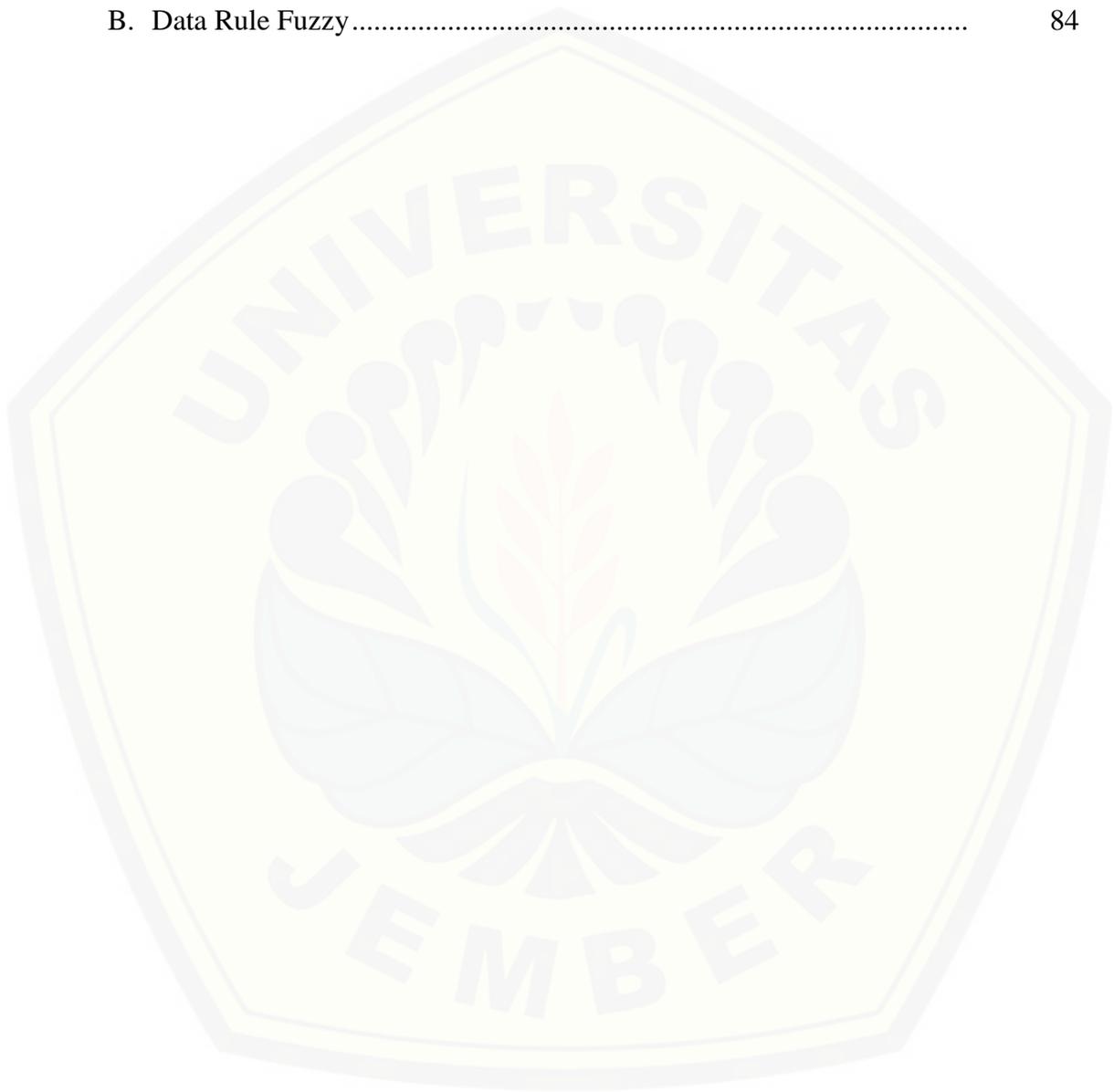
DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Turbin Angin Sumbu Vertikal	9
2.2 Turbin angin sumbu horizontal.....	12
2.3 Struktur Dasar Sistem PLT Angin	16
2.4 Rangkaian Penyearah Tiga Fasa	17
2.5 Bentuk Gelombang	17
2.6 Operasi kendali logika <i>fuzzy</i>	20
2.7 Metodologi pengembangan sistem <i>fuzzy</i>	21
2.8 Pendefinisian kecepatan dalam bentuk logika fuzzy dan logika Booleam.....	22
2.9 Konsep dasar logika <i>fuzzy</i>	25
3.1 Flowchart Penelitian	30
3.2 Perencanaan Sistem dan algoritma Control SOC	31
3.3 Model Wind Power System	34
3.4 Model Simulink Wind Turbine.....	35
3.5 Karakteristik Wind Turbine.....	35
3.6 Model Simulink PMSG	36
3.7 Model Simulink Transformator	37
3.8 Model Simulink Rectifier	38
3.9 Subsistem AC Grid (PLN).....	39
3.10 Skema Alur Kerja Baterai.....	40
3.11 Rangkaian Subsistem Pemodelan Baterai	40
3.12 Rangkaian Subsistem Discrete dan Persamaan Baterai	41
3.13 Rangkaian Subsistem Dinamic Load	43
3.14 Hasil <i>plotfis</i> dan pembagian jangkauan <i>fuzzy</i> pada matlab.....	45
3.15 Fungsi keanggotaan soc baterai	46
3.16 Fungsi keanggotaan arus angin (<i>iwind</i>)	46
3.17 Fungsi keanggotaan arus beban (<i>iload</i>)	47
3.18 Fungsi keanggotaan <i>output</i>	48

3.19	Diagram <i>toolbox fuzzy logic</i> pada sistem energi angin <i>gried-tied</i>	48
4.1	Data kecepatan angin.....	53
4.2	Pengujian turbin angina yang dihubungkan dengan kecepatan angina yang bervariasi.....	54
4.3	Grafik pola beban harian	55
4.4	Grafik kelebihan dan kekurangan energi angin terhadap energi permintaan beban	56
4.5	Rangkaian simulasi pengisian baterai dari sumber energi angin.....	58
4.6	Grafik perubahan tegangan, soc, dan arus baterai saat pengisian dengan energi angin tanpa beban dalam waktu 1 hari	60
4.7	Rangkaian simulasi pengosongan baterai dari sumber energi angin .	61
4.8	Grafik perubahan tegangan, soc, dan arus baterai saat pengisian dengan energi angin tanpa beban dalam waktu 1 hari	63
4.9	Rangkaian pengujian sistem energi angin <i>gried-tied</i> dengan manual switch.....	64
4.10	Grafik kondisi baterai pada sistem energi angin <i>gried-tied</i> dengan manual switch.....	64
4.11	Kondisi arus dan pensaklaran pada sistem energi angin <i>gried-tied</i> dengan manual switch	67
4.12	Grafik kondisi baterai pada sistem energi angin <i>gried-tied</i> dan beban dinaikkan 20 % dari beban normal dengan manual switch	69
4.13	Kondisi arus dan pensaklaran pada sistem energi angin <i>gried-tied</i> dan beban dinaikkan 20 % dari beban normal dengan manual switch	71
4.14	Rangkaian pengujian sistem energi angin <i>gried-tied</i> dengan <i>smart switch</i> dengan menggunakan fuzzy logic controller	73
4.15	Grafik kondisi baterai pada sistem energi angin <i>gried-tied</i> dengan <i>smart switch</i>	74
4.16	Grafik kondisi arus campuran pada sistem energi angin <i>gried-tied</i> dengan menggunakan <i>smart switch</i>	77

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
A. Data Kecepatan Angin Bulan Maret 2014 (Musim Penghujan)	83
B. Data Rule Fuzzy	84



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan zaman menyebabkan kebutuhan energi dunia terus meningkat, hal ini dikarenakan pertambahan jumlah penduduk, ekonomi dan pola konsumsi energi itu sendiri. Namun ketersediaan energi fosil semakin hari semakin menipis. Oleh karena itu alternatif lain yaitu menggunakan energi terbarukan (*renewable energy*). Kebutuhan akan pemanfaatan sumber energi listrik terbarukan semakin meningkat dengan adanya krisis energi dan juga adanya isu pemanasan global. Berbagai macam sumber energi terbarukan telah dikembangkan para peneliti, seperti pembangkit listrik energi angin, air, surya, pasang air laut, biomasa, biofuel, panas bumi. Pada negara kaya sudah banyak yang memakai *renewable energy* sebagai sumber dayanya.

Masyarakat Indonesia tergantung pada pasokan listrik dari PLN yang digunakan baik untuk kebutuhan penerangan maupun untuk mendukung kegiatan ekonomi, seperti pada industri. Indonesia memiliki potensi sumber energi terbarukan dalam jumlah besar, seperti: biodiesel untuk pengganti solar, mikrohidro, tenaga surya, sampah/limbah, bahkan tenaga angin pun bisa digunakan untuk membangkitkan listrik (Rama P, 2006).

Sumber energi angin merupakan sumber energi terbarukan yang cukup populer yang bersih dan tersedia secara bebas (*free*). Namun, masalah utama dari jenis energi tersebut adalah tidak tersedia terus menerus. Energi angin tersedia pada waktu yang sering kali tidak dapat diprediksi (*sporadic*), dan sangat berfluktuasi tergantung cuaca atau musim. Mengingat bervariasinya lingkungan yang menentukan ketersediaan sumber energi angin, diperlukan pemodelan pembangkit energi angin dan listrik serta baterai penyimpanan untuk mempermudah perancangan dan analisa sistem pembangkit tersebut. Pada umumnya baterai digunakan sebagai penyimpan energi sementara, dan sebuah pengendali digunakan untuk mengoptimalkan pemakaian energi dari masing-masing sumber dan baterai, disesuaikan dengan beban dan ketersediaan energi dari sumber energi yang digunakan.

Teknologi pembangkit listrik tenaga angin pada dua dekade ini berkembang sangat pesat. Selain alasan ekonomis juga karena teknologi ini bebas dari pencemaran lingkungan. Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTA) dapat diterapkan dalam bentuk wind yang tidak terhubung dengan grid (standalone) maupun yang terhubung dengan grid (dalam hal ini PLN). Penerapan pembangkit ini dapat diterapkan pada lokasi terpencil maupun yang telah memiliki grid (Litbang ESDM, 2011).

Pada tujuan ini, Sistem Energi Angin diaplikasikan sebagai sumber energi pada area yang sebenarnya dapat dicatu dari sumber listrik PLN. Pemanfaatan Sistem Energi Angin ini hanya dimaksudkan untuk sebisa mungkin mengurangi pemakaian energi listrik PLN yang dianggap sebagai energi yang berasal dari bahan bakar fosil. Selain itu, pada daerah tertentu di mana catu daya dari PLN mengalami permasalahan keterbatasan pada jam beban puncak, Sistem Energi Angin dapat menjadi solusi untuk memperbaiki faktor beban, yaitu dengan memanfaatkan energi dari baterai pada saat jam beban puncak.

Sistem yang akan dirancang dalam penelitian ini adalah Sistem Energi Angin yang terhubung dengan *grid (grid-tied)* tetapi tidak disinkronkan pada sisi listrik AC-nya, sehingga sistem tersebut dirancang untuk terhubung dengan *grid* menggunakan *change over switch* yang dikontrol berdasarkan pertimbangan kebutuhan daya dan energi yang tersimpan dalam baterai.

Mengacu pada permasalahan-permasalahan di atas, maka dalam penelitian ini akan dirancang sebuah Sistem Energi Angin *grid-tied* yang dilengkapi dengan fitur pengaturan/penjadwalan catu daya antara Sistem Energi Angin dan grid (PLN) menggunakan metode *Fuzzy Logic Controller (FLC)*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, maka dapat diambil beberapa rumusan masalah sebagai berikut :

- a. Bagaimana memodelkan Sistem Konversi Energi Angin *Grid-tied* yang dilengkapi dengan pengaturan catu daya yang dapat mengatur penjadwalan antara Sistem Energi Angin dan *AC Grid*?
- b. Bagaimana mendesain Sistem Energi Angin dan *AC Grid* agar optimal dalam pengoperasiannya yang berbasis pada *SOC* baterai, kecepatan angin, dan kondisi beban dengan menggunakan metode *Fuzzy Logic Controller*?
- c. Bagaimana performansi Sistem Energi Angin pada kecepatan angin dan beban yang berubah-ubah?

1.3 Batasan Masalah

Agar dalam penulisan skripsi ini dapat mencapai sasaran dan tujuan yang diharapkan, maka dalam pembahasan penelitian ini dibatasi sebagai berikut :

- a. Sistem yang akan dirancang dalam penelitian ini adalah Sistem Energi Angin yang terhubung dengan *AC Grid* tetapi tidak disinkronkan pada sisi listrik *AC*.
- b. Beban yang digunakan adalah skala rumah.
- c. Tidak membahas secara detail konstruksi sistem energi angin.
- d. Tidak membahas tentang subsistem pengaturan dan pengkondisian daya.
- e. Pengontrolan sistem dalam lingkup tegangan *DC*.
- f. Pengujian dilakukan dengan pemodelan sistem / simulasi dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan yang akan diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

Merancang Sistem Konversi Energi Angin *Grid-tied* yang dilengkapi dengan sistem pengaturan catu daya yang berbasis pada *SOC* baterai, kecepatan angin, dan kondisi beban dengan menggunakan metode *Fuzzy Logic Controller (FLC)*.

- a. Meningkatkan optimasi penggunaan Sistem Energi Angin yang terhubung dengan *AC grid* (dalam hal ini adalah PLN) sehingga mampu bekerja secara efektif, sehingga sistem kelistrikan tidak menyerap daya pada saat jam beban puncak dan menjamin ketersediaan energi untuk sistem beban yang ada.
- b. Mengetahui pengaruh pemanfaatan Sistem Energi Angin pada kecepatan angin dan beban yang berubah-ubah.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Didapatkan solusi dalam mengatasi permasalahan tentang energi, yaitu dengan pengoptimuman Sistem Energi Angin *Grid-tied* yang dilengkapi dengan fitur pengaturan catu daya yang berdasarkan pada keadaan *SOC* baterai, kecepatan angin dan kondisi beban.
- b. Memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi khususnya tentang pengoptimuman energi alternatif.
- c. Skripsi ini dapat dijadikan referensi awal dalam pembelajaran dikemudian hari, tentang energi terbarukan serta penerapannya secara langsung untuk sistem kelistrikan skala kecil sebagai upaya pemanfaatan energi terbarukan secara nyata.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Angin

Energi merupakan suatu kekuatan yang dimiliki oleh suatu zat sehingga zat tersebut mempunyai pengaruh pada keadaan sekitarnya. Menurut mediumnya dikenal banyak jenis energi. Diantaranya, energi gelombang, energi arus laut, energi kosmos, energi yang terkandung pada senyawa atom, dan energi-energi lain yang bila dimanfaatkan akan berguna bagi kebutuhan manusia. Salah satu dari energi tersebut adalah energi angin yang jumlahnya tak terbatas dan banyak digunakan sebagai energi alternatif yang ramah lingkungan dan berfungsi untuk meringankan kerja manusia. Angin memberikan energi gerak sehingga mampu menggerakkan perahu layar, kincir angin, dan bisa dimanfaatkan menjadi pembangkit listrik yaitu berupa turbin angin. Keberadaan energi angin ini terdapat di lapisan atmosfer bumi yang banyak mengandung partikel udara dan gas. Lapisan troposfer merupakan lapisan atmosfer terendah bumi dan di lapisan ini semua peristiwa cuaca termasuk angin terjadi.

Energi angin adalah energi yang terkandung pada massa udara yang bergerak. Energi angin berasal dari energi matahari. Pemanasan bumi oleh sinar matahari menyebabkan perbedaan massa jenis (ρ) udara. Perbedaan massa jenis ini menyebabkan perbedaan tekanan pada udara sehingga akan terjadi aliran fluida dan menghasilkan angin. Kondisi aliran angin dipengaruhi oleh medan atau permukaan bumi yang dilalui oleh aliran angin dan perbedaan temperatur permukaan bumi.

Angin adalah salah satu bentuk energi yang tersedia di alam, Pembangkit Listrik Tenaga Angin mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin atau kincir angin. Cara kerjanya cukup sederhana, energi angin yang memutar turbin angin, diteruskan untuk memutar rotor pada generator dibagian belakang turbin angin, sehingga akan menghasilkan energi listrik. Energi Listrik ini biasanya akan disimpan kedalam baterai sebelum dapat dimanfaatkan.

2.2 Turbin Angin

Turbin angin adalah sebuah alat yang memanfaatkan energi kinetik angin dan mengubahnya kedalam bentuk energi gerak putaran rotor dan poros generator untuk menghasilkan energi listrik. Energi gerak yang berasal dari angin akan diteruskan menjadi gaya gerak dan torsi pada poros generator yang kemudian akan dihasilkan energi listrik. Turbin angin adalah mesin penggerak yang memanfaatkan angin sebagai penggerakannya.

Berdasarkan arah sumbu geraknya, turbin angin terbagi menjadi 2, yaitu: turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal. Turbin angin sumbu horizontal memiliki sumbu putar yang sejajar dengan tanah. Turbin angin sumbu vertikal memiliki sumbu putar yang arahnya tegak lurus dengan tanah. Berdasarkan prinsip gaya aerodinamik yang terjadi pada rotor, turbin angin terbagi dua yaitu *drag* dan *lift*. Pengelompokan berdasarkan prinsip aerodinamik pada rotor adalah apakah turbin angin menangkap energi angin dengan hanya memanfaatkan gaya *drag* dari aliran udara yang melalui rotor atau memanfaatkan gaya *lift* yang dihasilkan dari aliran udara yang melalui bentuk aerodinamis sudu. Dua kelompok ini memiliki perbedaan yang jelas pada kecepatan putar rotornya. Rotor turbin angin jenis *drag* berputar dengan kecepatan putar rendah sehingga disebut juga turbin angin putaran rendah. Rotor turbin angin jenis *lift* pada umumnya berputar pada kecepatan putar tinggi bila dibandingkan dengan jenis *drag* sehingga disebut juga sebagai turbin angin putaran tinggi. Setiap jenis turbin angin memiliki perancangan, kekurangan dan kelebihan masing-masing.

Energi angin bisa ditangkap dengan dua atau tiga buah bilah sudu yang didesain seperti sayap pesawat terbang. Untuk mendapatkan kecepatan angin yang cukup tinggi, konstan, dan tidak terlalu banyak turbulensi biasanya turbin angin dipasang di atas sebuah menara pada ketinggian 30 meter atau lebih.

Bilah sudu yang digunakan berfungsi seperti sayap pesawat udara. Ketika angin bertiup melalui bilah tersebut, maka akan timbul udara bertekanan rendah di bagian bawah dari sudu, Tekanan udara yang rendah akan menarik sudu bergerak ke area tersebut. Gaya yang ditimbulkan dinamakan gaya angkat. Besarnya gaya angkat biasanya lebih kuat dari tekanan pada sisi depan bilah, atau yang biasa

disebut tarik. Kombinasi antara gaya angkat dan tarik menyebabkan rotor berputar seperti *propeller* dan memutar generator. Turbin angin bisa digunakan secara *stand-alone*, atau bisa dihubungkan ke jaringan transmisi atau bisa dikombinasikan dengan sistem panel surya.

Umumnya daya efektif yang dapat diperoleh sebuah turbin angin hanya berkisar 20-30%. Maka untuk mendapatkan hasil yang valid, dari rumus diatas dapat dikalikan 0,2 atau 0,3.

2.2.1 Sub Sistem Turbin Angin

a. *Gearbox*

Alat ini berfungsi untuk mengubah putaran rendah pada kincir menjadi putaran tinggi. Biasanya *Gearbox* yang digunakan mempunyai rasio sekitar 1:60.

b. *Brake System*

Digunakan untuk menjaga putaran pada poros setelah *gearbox* agar bekerja pada titik aman saat terdapat angin yang besar. Alat ini perlu dipasang karena generator memiliki titik kerja aman dalam pengoperasiannya. Generator ini akan menghasilkan energi listrik maksimal pada saat bekerja pada titik kerja yang telah ditentukan. Kehadiran angin diluar diguaan 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 : *overheat*, *rotor breakdown*, kawat pada generator putus, karena tidak dapat menahan arus yang cukup besar.

c. Generator

Ini adalah salah satu komponen terpenting dalam pembuatan sistem turbin angin. Generator ini dapat mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Prinsip kerjanya dapat dipelajari dengan menggunakan teori medan elektromagnetik. Singkatnya, (mengacu pada salah satu cara kerja generator) poros pada generator dipasang dengan material ferromagnetik permanen. Setelah itu disekeliling poros terdapat stator yang bentuk fisisnya adalah kumparan-kumparan kawat yang membentuk loop. Ketika poros generator mulai berputar maka akan terjadi perubahan fluks pada stator yang akhirnya karena terjadi perubahan fluks ini akan

dihasilkan tegangan dan arus listrik tertentu. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan ini disalurkan melalui kabel jaringan listrik untuk akhirnya digunakan oleh masyarakat. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator ini berupa *AC (alternating current)* yang memiliki bentuk gelombang kurang lebih sinusoidal.

d. Penyimpan energy

Karena keterbatasan ketersediaan akan energi angin (tidak sepanjang hari angin akan selalu tersedia) maka ketersediaan listrik pun tidak menentu. Oleh karena itu digunakan alat penyimpan energi yang berfungsi sebagai *back-up* energi listrik. Ketika beban penggunaan daya listrik masyarakat meningkat atau ketika kecepatan angin suatu daerah sedang menurun, maka kebutuhan permintaan akan daya listrik tidak dapat terpenuhi. Oleh karena itu kita perlu menyimpan sebagian energi yang dihasilkan ketika terjadi kelebihan daya pada saat turbin angin berputar kencang atau saat penggunaan daya pada masyarakat menurun. Penyimpanan energi ini diakomodasi dengan menggunakan alat penyimpan energi. Contoh sederhana yang dapat dijadikan referensi sebagai alat penyimpan energi listrik adalah aki mobil. Aki mobil memiliki kapasitas penyimpanan energi yang cukup besar. Aki 12 volt, 65 Ah dapat dipakai untuk mencatu rumah tangga (kurang lebih) selama 0.5 jam pada daya 780 watt. Kendala dalam menggunakan alat ini adalah alat ini memerlukan catu daya *DC (Direct Current)* untuk men-charge/mengisi energi, sedangkan dari generator dihasilkan catu daya *AC (Alternating Current)*.

e. Rectifier-inverter

Rectifier berarti penyearah. *Rectifier* dapat menyearahkan gelombang sinusoidal (*AC*) yang dihasilkan oleh generator menjadi gelombang *DC*. *Inverter* berarti pembalik. Ketika dibutuhkan daya dari penyimpan energi (aki / lainnya) maka catu yang dihasilkan oleh aki akan berbentuk gelombang *DC*. Karena kebanyakan kebutuhan rumah tangga menggunakan catu daya *AC*, maka diperlukan *inverter* untuk mengubah gelombang *DC* yang dikeluarkan oleh aki menjadi gelombang *AC*, agar dapat digunakan oleh rumah tangga.

2.2.2 Jenis Turbin Angin

a. Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal / tegak (atau TASV) memiliki poros / sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke angin agar menjadi efektif. Kelebihan ini sangat berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)* mampu mendayagunakan angin dari berbagai arah.

Dengan sumbu yang vertikal, generator serta *gearbox* bisa ditempatkan di dekat tanah, jadi menara tidak perlu menyokongnya dan lebih mudah diakses untuk keperluan perawatan. Tapi ini menyebabkan sejumlah desain menghasilkan tenaga putaran yang berdenyut. *Drag* (gaya yang menahan pergerakan sebuah benda padat melalui fluida (zat cair atau gas) bisa saja tercipta saat kincir berputar.



Gambar 2.1 Turbin angin sumbu vertikal (Sumber: Mathew, Sathyajith, 2006)

Karena sulit dipasang di atas menara, turbin sumbu tegak sering dipasang lebih dekat ke dasar tempat ia diletakkan, seperti tanah atau puncak atap sebuah bangunan. Kecepatan angin lebih pelan pada ketinggian yang rendah, sehingga yang tersedia adalah energi angin yang sedikit. Aliran udara di dekat tanah dan

obyek yang lain mampu menciptakan aliran yang bergolak, yang bisa menyebabkan berbagai permasalahan yang berkaitan dengan getaran, diantaranya kebisingan dan bearing wear yang akan meningkatkan biaya pemeliharaan atau mempersingkat umur turbin angin. Jika tinggi puncak atap yang dipasang menara turbin kira-kira 50% dari tinggi bangunan, ini merupakan titik optimal bagi energi angin yang maksimal dan turbulensi angin yang minimal.

1. Keunggulan :

- Tidak membutuhkan struktur menara yang besar.
- Karena bilah-bilah rotornya vertikal, tidak dibutuhkan mekanisme yaw.
- Sebuah TASV bisa diletakkan lebih dekat ke tanah, membuat pemeliharaan bagian-bagiannya yang bergerak jadi lebih mudah.
- TASV memiliki sudut *airfoil* (bentuk bilah sebuah baling-baling yang terlihat secara melintang) yang lebih tinggi, memberikan keaerodinamisan yang tinggi sembari mengurangi *drag* pada tekanan yang rendah dan tinggi.
- Desain TASV berbilah lurus dengan potongan melintang berbentuk kotak atau empat persegi panjang memiliki wilayah tiupan yang lebih besar untuk diameter tertentu daripada wilayah tiupan berbentuk lingkarannya TASH.
- TASV memiliki kecepatan awal angin yang lebih rendah daripada TASH.
- Biasanya TASV mulai menghasilkan listrik pada 10km/jam (6 m.p.h.)
- TASV biasanya memiliki *tip speed ratio* (perbandingan antara kecepatan putaran dari ujung sebuah bilah dengan laju sebenarnya angin) yang lebih rendah sehingga lebih kecil kemungkinannya rusak di saat angin berhembus sangat kencang.
- TASV yang ditempatkan di dekat tanah bisa mengambil keuntungan dari berbagai lokasi yang menyalurkan angin serta meningkatkan laju angina (seperti gunung atau bukit yang puncaknya datar dan puncak bukit),
- TASV tidak harus diubah posisinya jika arah angin berubah.
- Kincir pada TASV mudah dilihat dan dihindari burung.

2. Kelemahan :

- Kebanyakan turbin angin sumbu vertikal (TASV) memproduksi energi hanya 50% dari efisiensi turbin angin sumbu horizontal (TASH) karena *drag* tambahan yang dimilikinya saat kincir berputar.
- Turbin angin sumbu vertikal (TASV) tidak mengambil keuntungan dari angin yang melaju lebih kencang di elevasi yang lebih tinggi.
- Kebanyakan turbin angin sumbu vertikal (TASV) mempunyai torsi awal yang rendah, dan membutuhkan energi untuk mulai berputar.
- Sebuah turbin angin sumbu vertikal (TASV) yang menggunakan kabel untuk menyanggahnya memberi tekanan pada bantalan dasar karena semua berat rotor dibebankan pada bantalan. Kabel yang dikaitkan ke puncak bantalan meningkatkan daya dorong ke bawah saat angin bertiup.

b. Turbin Angin Sumbu Horizontal

Turbin angin sumbu horizontal (TASH) memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara. TASH memiliki gaya gerak listrik (GGL) induksi yang besar. Pembuatan turbin angin sumbu horizontal (TASH) ini membutuhkan tiang penyangga yang kuat serta untuk arah angin dari segala arah. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin (baling-baling cuaca) yang sederhana, sedangkan turbin berukuran besar pada umumnya menggunakan sebuah sensor angin yang digandengkan ke sebuah servo motor. Energi angin yang ditangkap oleh bilah-bilah sudu menghasilkan putaran yang rendah pada hub-nya. Oleh karena itu, sebagian besar turbin angin menggunakan sebuah gearbox untuk mengubah perputaran kincir yang pelan menjadi lebih cepat berputar dan sesuai untuk memutar generator.

Bilah sudu yang digunakan biasanya terbuat dari bahan yang kuat untuk menghindari bilah sudu tersebut terdorong dan mengenai menara ketika berputar pada saat angin kencang bertiup. Biasanya, jarak antara bilah sudu dan menara juga diatur.



Gambar 2.2 Turbin angin sumbu horizontal (Sumber: Mathew, Sathyajith, 2006)

Karena sebuah menara menghasilkan turbulensi di belakangnya, turbin biasanya diarahkan melawan arah anginnya menara. Bilah-bilah turbin dibuat kaku agar mereka tidak terdorong menuju menara oleh angin berkecepatan tinggi. Sebagai tambahan, bilah-bilah itu diletakkan di depan menara pada jarak tertentu dan sedikit dimiringkan. Turbin angin yang berukuran lebih kecil diarahkan dengan menggunakan sirip, sedangkan untuk turbin angin berkapasitas besar menggunakan sensor dan motor servo untuk menggerakkan turbin agar menghadap dan searah dengan arah angin.

Karena turbulensi menyebabkan kerusakan struktur menara, dan realibilitas begitu penting, sebagian besar merupakan mesin upwind (melawan arah angin). Meski memiliki permasalahan turbulensi, mesin downwind (menurut jurusan angin) dibuat karena tidak memerlukan mekanisme tambahan agar mereka tetap sejalan dengan angin, dan karena di saat angin berhembus sangat kencang, bilah-bilahnya bisa ditekuk sehingga mengurangi wilayah tiupan mereka dan dengan demikian juga mengurangi resintensi angin dari bilah-bilah itu.

1. Keunggulan :

Dasar menara yang tinggi membolehkan akses ke angin yang lebih kuat di tempat-tempat yang memiliki geseran angin perbedaan antara laju dan arah angin antara dua titik yang jaraknya relatif dekat di dalam atmosfer bumi. Di sejumlah lokasi geseran angin, setiap sepuluh meter ke atas, kecepatan angin meningkat sebesar 20%.

2. Kelemahan :

- Menara yang tinggi serta bilah yang panjangnya bisa mencapai 90 meter sulit diangkut. Diperkirakan besar biaya transportasi bisa mencapai 20% dari seluruh biaya peralatan turbin angin.
- TASH yang tinggi sulit dipasang, membutuhkan derek yang sangat tinggi dan mahal serta para operator yangampil.
- Konstruksi menara yang besar dibutuhkan untuk menyangga bilah-bilah yang berat, *gearbox*, dan generator.
- TASH yang tinggi bisa mempengaruhi radar airport.
- Ukurannya yang tinggi merintangai jangkauan pandangan dan mengganggu penampilan lansekap.
- Berbagai varian downwind menderita kerusakan struktur yang disebabkan oleh turbulensi.
- TASH membutuhkan mekanisme kontrol *yaw* tambahan untuk membelokkan kincir ke arah angin.

2.2.3 Daya Pada Turbin Angin

Energi kinetik pada turbin dapat dirumuskan:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

Karena massa dapat diganti dengan kerapatan udara ρ , luas area A , dan kecepatan v , maka dapat ditulis:

$$m = \rho Av \quad (2.2)$$

Sehingga persamaan (2.1) dan (2.2) bila digabungkan, akan diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.3)$$

Dengan

P_m = Daya mekanik turbin angin (Watt)

ρ = Kerapatan udara (kg/m^3)

(pada 15°C dan tekanan 1 atm, $\rho = 1,225 \text{ kg}/\text{m}^3$)

A = Luas area turbin yang dilewati angin (m^2) ($A = \pi R^2$)

v = Kecepatan angin (m/s)

Daya yang bisa ditangkap oleh turbin:

$$P_o = \frac{1}{2} (v^2 - v_o^2) \quad (2.4)$$

Dengan

P_o = Daya output turbin angin (Watt)

v = Kecepatan upstream yang melewati turbin angin (m/s)

v_o = Kecepatan downstream yang melewati turbin angin (m/s)

Karena kecepatannya tidak selalu tetap maka diperoleh rata-rata dari kecepatan upstream dan downstream yaitu $\frac{1}{2}(v + v_o)$ maka persamaan (2.2) menjadi:

$$m = \rho A \left(\frac{v + v_o}{2} \right) \quad (2.5)$$

Dan daya yang bisa diekstraksi menjadi:

$$P_o = \frac{1}{2} \left[\rho A \frac{(v + v_o)}{2} \right] (v^2 - v_o^2) \quad (2.6)$$

Persamaan ini menjadi:

$$P_o = \frac{1}{2} \rho A v^3 \frac{\left(1 + \frac{v_o}{v} \right) \left[1 - \left(\frac{v_o}{v} \right)^2 \right]}{2} \quad (2.7)$$

$$P_o = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (2.8)$$

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{v_o}{v}\right) \left[1 - \left(\frac{v_o}{v}\right)^2\right]}{2} \quad (2.9)$$

Dimana

C_p = Koefisien daya atau koefisien turbin

Berdasarkan teori Betz, nilai maksimum C_p adalah 0,59 namun nilai tersebut hanya secara teori, nilai pada umumnya antara 0,4 sampai 0,5 untuk turbin kecepatan tinggi dan 0,2 sampai 0,4 untuk turbin kecepatan rendah.

2.3 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

Generator pada pembangkit listrik tenaga angin berfungsi untuk mengubah energi mekanik yang ditangkap oleh rotor turbin angin menjadi listrik yang akan dimasukkan ke jaringan. Pada aplikasi daya yang besar digunakan generator sinkron, dimana eksitasi diciptakan oleh rotor sehingga menimbulkan medan putar yang akan menghasilkan tegangan bangkit di stator.

Pada tugas akhir ini digunakan generator sinkron jenis magnet permanen (PMSG). Jenis generator ini tidak memerlukan sistem eksitasi dikarenakan sumber eksitasi telah disediakan oleh magnet yang terdapat pada rotor. Kontrol tegangan tidak diperlukan, sehingga mengurangi kesulitan dalam pengendalian. Pada umumnya PMSG digunakan pada pembangkit listrik tenaga angin yang rendah. Keuntungan penggunaan PMSG adalah biaya yang rendah, ketahanan, kesederhanaan, dan lebih mudah dalam mengkopling grid, namun PMSG juga memiliki kekurangan yaitu masih membutuhkan kompensator faktor daya dan efisiensi yang lebih rendah.

Seperti halnya prinsip generator sinkron terdapat hubungan antara frekuensi dan kecepatan yang ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$N_s = N_r = \frac{120f}{p} \quad (2.10)$$

Dimana

N_r = Kecepatan medan rotor (Rpm)

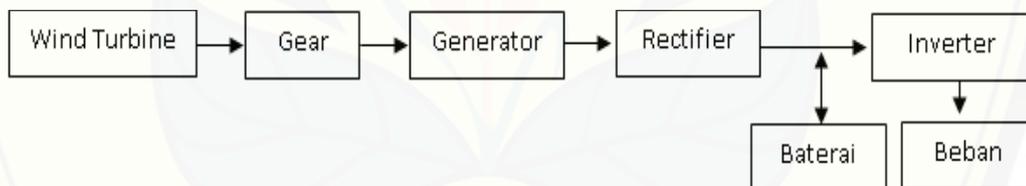
N_s = Kecepatan medan stator (Rpm)

p = Jumlah kutub

f = Frekuensi (Hz)

2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Pembangkit listrik tenaga angin (PLTA) adalah suatu pembangkit listrik yang menggunakan angin sebagai sumber energi untuk menghasilkan energi listrik. Pembangkit ini dapat mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin atau kincir angin. Sistem pembangkitan listrik menggunakan angin sebagai sumber energi merupakan sistem alternatif yang sangat berkembang pesat, mengingat angin merupakan salah satu energi yang tidak terbatas di alam dan pembangkit listrik yang ramah lingkungan.



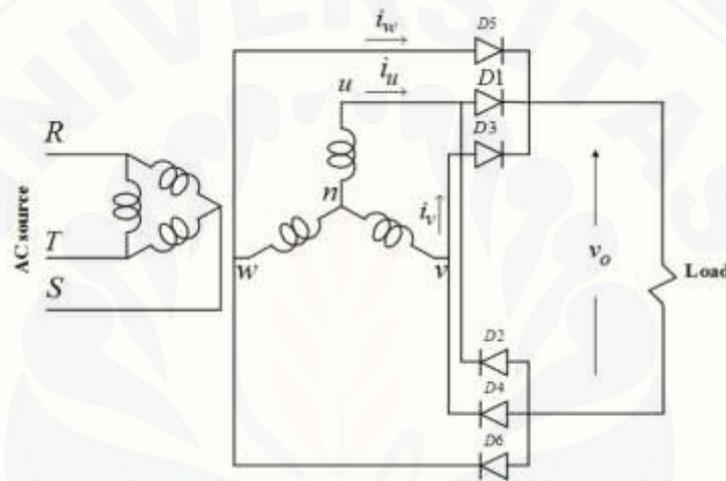
Gambar 2.3 Struktur dasar sistem pembangkit listrik tenaga angin

Pembangkit listrik ini dapat diterapkan dalam bentuk *wind farm* maupun standalone, baik yang terhubung dengan grid maupun tidak terhubung. PLT Angin sangat cocok diterapkan di daerah terpencil maupun daerah yang sudah memiliki grid. Keberadaan dan kelangsungan suatu Pembangkit Listrik Tenaga Angin ditentukan oleh pemilihan lokasi (*sitting*) yang tepat berdasarkan data angin yang akurat dan berlaku sepanjang waktu guna (*service life*) mesin turbin angin. Oleh sebab itu studi potensi angin sepanjang tahun pada lokasi yang mempunyai potensi merupakan sesuatu yang mutlak dilakukan sebelum diputuskan untuk membangun suatu Pembangkit Listrik Tenaga Angin.

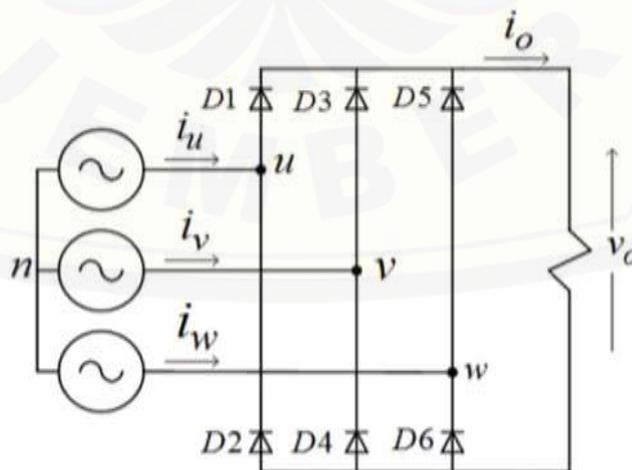
2.5 Rectifier

2.5.1 Penyearah Tiga Fasa Sistem Jembatan

Rectifier adalah alat yang digunakan untuk mengubah sumber arus bolak-balik (AC) menjadi sinyal sumber arus searah (DC). Penyearah terdiri dari dua jenis yaitu penyearah setengah gelombang dan penyearah gelombang penuh, sedangkan untuk penyearah gelombang penuh terdiri dari jenis center tap (CT) dan menggunakan dioda bridge. Pada tugas akhir ini menggunakan penyearah tiga fasa sistem jembatan.



Gambar 2.4 Rangkaian penyearah tiga fasa



Gambar 2.5 Bentuk gelombang penyearah tiga fasa

Prinsip kerja rangkaian penyearah tiga fasa sistem jembatan pada siklus positif sebagai berikut:

- a. D1 dan D3 hidup (ON), karena mendapat bias maju
- b. D2 dan D4 mati (OFF), karena mendapat bias mundur sehingga arus mengalir melalui D1, R, dan D3.

Apabila rangkaian penyearah tiga fasa sistem jembatan memperoleh siklus negatif, maka:

- a. D2 dan D4 hidup (ON), karena mendapat bias maju
- b. D1 dan D3 mati (OFF), karena mendapat bias mundur sehingga arus mengalir melalui D2, R, dan D4.

2.6 State Of Charge Battery (SOC Baterai)

Baterai digunakan sebagai media penyimpanan muatan yang bersumber dari catu daya Sistem Energi Angin dan *grid* (PLN), selain itu baterai digunakan untuk menyuplai daya ke beban. Ukuran baterai sangat tergantung pada beban yang akan diberi catu daya dan komponen lainnya. Ukuran baterai yang terlalu besar baik untuk efisiensi operasi tetapi mengakibatkan kebutuhan investasi yang besar sebaliknya ukuran baterai kecil dapat mengakibatkan tidak tertampungnya daya dari energi angin. Oleh karena itu, ukuran baterai harus ditentukan sesuai kebutuhan dan *supply* daya yang digunakan agar kinerja sistem optimal.

Catu daya Sistem Energi Angin berubah-ubah dalam setiap waktu. Dalam pengisian baterai, tegangan yang dimasukkan ke baterai harus sama (sinkron). Sehingga dalam sistem pengisian baterai diberi *rectifier* pada keluaran catu daya Sistem Energi Angin untuk mengubah keluaran AC menjadi DC sehingga energi angin tersebut dapat disimpan pada baterai. Sedangkan pada catu daya *grid* (PLN) diberi *rectifier* yang berfungsi merubah listrik AC menjadi DC sesuai dengan karakteristik baterai. Untuk penggunaan baterai, dibutuhkan sebuah *konverter* untuk mengubah listrik DC dari baterai menjadi listrik DC yang disalurkan menuju beban dan langsung dapat digunakan pada peralatan – peralatan beban DC.

Sistem pengisian baterai mirip dengan sistem UPS (*Uninterruptible Power Supply*) yang terhubung dengan catu daya Sistem Energi Angin dan *grid* (PLN) dimana terdapat pensaklaran atau penjadwalan catu daya yang akan mengisi baterai. Pada sistem ini, pengisian diprioritaskan pada catu daya Sistem Energi Angin dan catu daya dari *grid* (PLN) sebagai *energy backup* sistem.

Pengisian dilakukan selama terdapat energi angin dikarenakan angin yang bersifat fluktuatif dan pada malam hari beban menyerap daya dari baterai. Apabila energi angin tidak dapat mengisi baterai maka catu daya dari *grid* (PLN) akan mengisi baterai. Pada malam hari, sistem sebisa mungkin tidak menyerap catu daya dari *grid* (PLN) tetapi menyerap catu daya dari baterai.

Sistem penjadwalan atau kontrol pensaklaran antara catu daya Sistem Energi Angin dan *grid* (PLN) menuju baterai ditentukan oleh SOC baterai. *State Of Charge* (SOC) pada baterai adalah sistem pengisian dan pemakaian daya baterai dengan memberikan nilai minimum baterai dan maksimum baterai sehingga baterai dapat digunakan lebih lama (tahan lama). Penentuan nilai minimum dan maksimum baterai ditentukan terlebih dahulu sebelum dihubungkan ke sistem agar pada saat digunakan pendeteksi baterai dapat mengatur sistem penjadwalan antara catu daya Sistem Energi Angin dan *grid* (PLN).

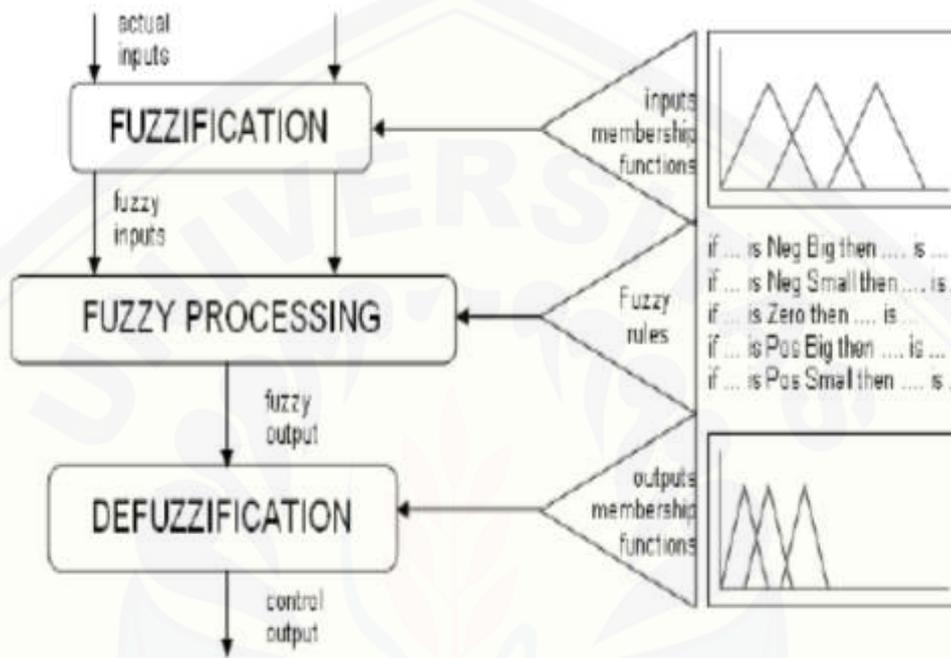
Cara mengukur *State Of Charge* (SOC) dari sebuah baterai dapat dilakukan 3 cara yaitu :

1. Pengukuran secara langsung, dapat dilakukan jika baterai dapat *dicharger* pada nilai yang konstan;
2. SOC dari pengukuran *Specific Gravity* (SG), cara ini bergantung pada perubahan pengukuran dari berat bahan kimia aktif;
3. Perkiraan SOC berdasarkan tegangan, dilakukan dengan mengukur tegangan *cell* baterai sebagai dasar untuk penghitungan SOC atau sisa kapasitas.

2.7 Fuzzy Logic Controller (FLC)

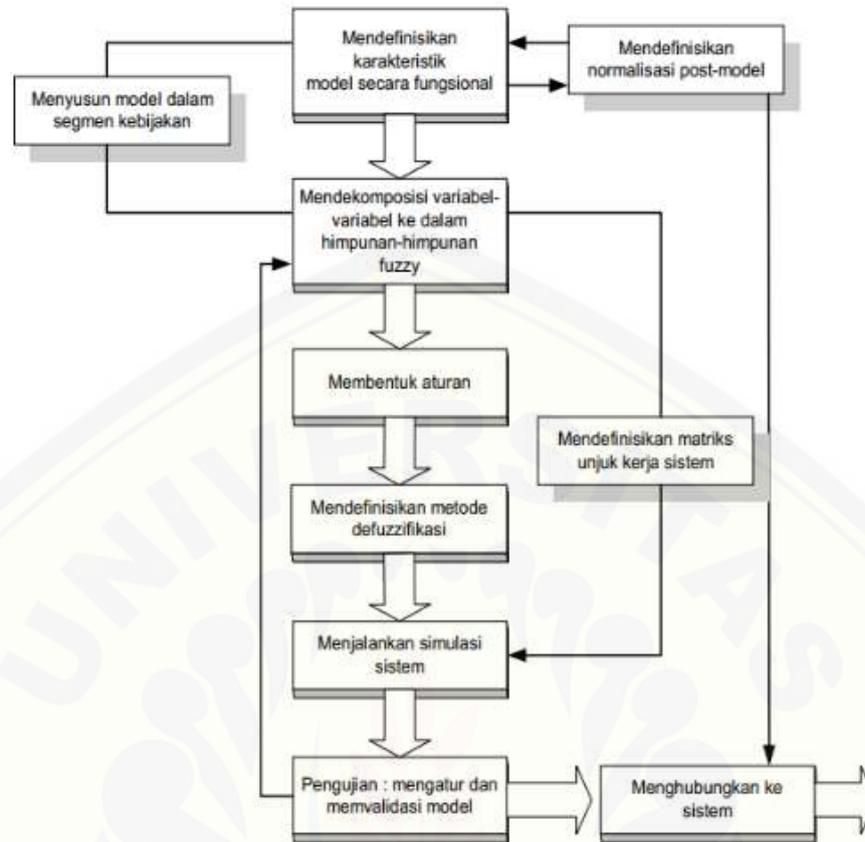
Logika *Fuzzy* pertama kali diperkenalkan oleh *Prof. Lotfi Zadeh* seorang kebangsaan Iran yang menjadi guru besar di *University of California at Berkeley*

pada tahun 1965. Logika *fuzzy* adalah cabang dari sistem kecerdasan buatan (*Artificial Intelegent*) yang mengemulasi kemampuan manusia dalam berfikir ke dalam bentuk algoritma yang kemudian dijalankan oleh mesin (Jantzen.Jan,1998). Adapun proses *fuzzyfiksi* ini kurang lebih digambarkan pada Gambar 2.6 berikut:



Gambar 2.6 Operasi kendali logika *fuzzy* (Sumber : Reznik, 1997)

Algoritma ini digunakan dalam berbagai aplikasi pemrosesan data yang tidak dapat direpresentasikan dalam bentuk biner. *Logika fuzzy* menginterpretasikan *statement* yang samar menjadi sebuah pengertian yang logis. Adapun poin-poin dan tahapan dalam pengaturan dengan menggunakan logika *fuzzy* ini serta Alur pemrosesan pada penolakan data dengan menggunakan *Fuzzy Logic Controller (FLC)* ditunjukkan pada Gambar 2.7 berikut ini :



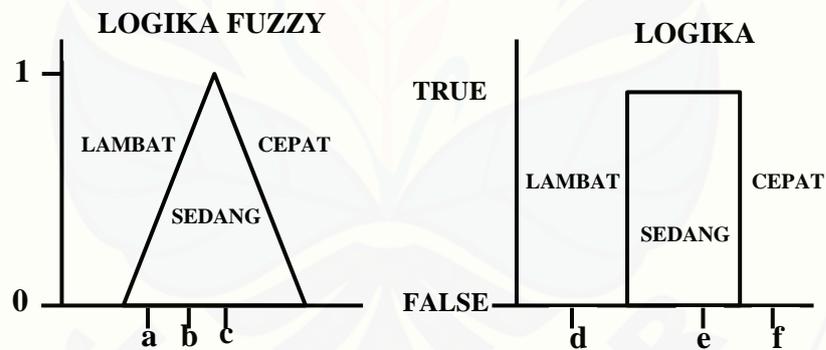
Gambar 2.7 Metodologi pengembangan sistem *fuzzy* (Sumber : Kusumadewi.S, 2002)

Pada Gambar 2.7 merupakan metodologi pengembangan sistem dengan menggunakan *Fuzzy Logic Controller*. *Fuzzy Logic Controller* merupakan sebuah cara untuk mengatur beberapa input sehingga dihasilkan *output* yang sesuai. Apabila *fuzzy logic* digabungkan ke sebuah sistem, maka pemodelan sistem sebagai media utama harus ada terlebih dahulu. Pemodelan sistem ini harus sesuai/mendefinisikan normalisasi post model yang digunakan, artinya nilai yang nantinya masuk ke dalam *fuzzy* harus jelas terlebih dahulu. Operasi *fuzzy logic* perlu dilakukan jika bagian antecedent lebih dari satu pernyataan. Hasil akhir dari operasi ini adalah derajat kebenaran antecedent yang berupa bilangan tunggal. Bilangan ini nantinya diteruskan ke bagian consequent. Masukan operator *fuzzy* adalah dua atau lebih derajat keanggotaan dari variable-variabel inputnya. Keluarannya berupa nilai kebenaran tunggal. Setelah itu variable-variabel tersebut diterjemahkan ke dalam fungsi *fuzzy* dengan beberapa tahap sebagai berikut :

a. Mendekomposisi variable-variabel ke dalam Himpunan *Fuzzy*

Himpunan fuzzy (*fuzzy set*) adalah sekumpulan obyek x dimana masing-masing obyek memiliki nilai keanggotaan (*membership function*) " μ " atau disebut juga dengan nilai kebenaran. Himpunan *Crisp* dapat dinyatakan sebagai nilai yang sebenarnya untuk menyatakan konsep relative, misalnya seperti kecepatan dan posisi. Di dalam penggunaannya, himpunan ini sangatlah terbatas berbeda dengan ekspresi "cepat", "lambat", "jauh", "dekat" ataupun "besar", "kecil" yang merupakan nilai pendekatan dan tergantung pada konteks pembicaraan. Himpunan *fuzzy* memberikan kerangka untuk menyatakan ekspresi.

Himpunan *fuzzy* merupakan suatu pengembangan lebih lanjut tentang konsep himpunan dalam matematika. Himpunan *Fuzzy* adalah rentang nilai-nilai, masing-masing nilai tersebut mempunyai derajat keanggotaan (*membership*). Ungkapan logika Boolean menggambarkan nilai-nilai "Benar" atau "Salah". Ilustrasi antara keanggotaan *fuzzy* dengan Boolean *set* dapat dilihat pada Gambar 2.8 dibawah ini :



Gambar 2.8 Pendefinisian kecepatan dalam bentuk logika *fuzzy* dan logika *boolean*

(Sumber : Jan Jantzen, 1998)

b. Menerjemahkan ke dalam Variabel *Linguistik*

Suatu himpunan *fuzzy* bisa didefinisikan berdasarkan variabel *linguistik* tertentu. Variabel *linguistik* didefinisikan sebagai :

$$(u, T(u), U, R, S) \tag{2.11}$$

Dimana dengan U adalah nama variabel linguistik; $T(u)$ adalah himpunan *term* (*linguistic value/linguistic label*) pada u dan masing-masing *term* didefinisikan dengan fungsi keanggotaan yang normal (mempunyai harga maksimum sama dengan 1) dan *convex* pada U ; R adalah aturan sintatik untuk menghasilkan nama nilai-nilai pada u ; dan S adalah aturan sematik untuk menghubungkan tiap nilai dengan artinya.

c. Proses *Fuzzyfikasi*

Proses *fuzzyfikasi* merupakan proses untuk mengubah variabel *non-fuzzy* (*numerik variabel*) menjadi variabel *fuzzy* (*linguistik variabel*). Nilai masukan-masukan yang masih dalam bentuk variabel numerik yang telah dikuantisasi sebelum diolah oleh pengendali *fuzzy* harus diubah terlebih dahulu ke dalam variabel *fuzzy*. Melalui fungsi keanggotaan yang telah disusun maka nilai-nilai masukan tersebut menjadi informasi *fuzzy* yang berguna nantinya untuk proses pengolahan secara *fuzzy* pula. Proses ini disebut *fuzzyfikasi*.

d. Menentukan Basis Pengetahuan data *fuzzy*

Berisi basis data dan aturan dasar yang mendefinisikan himpunan *fuzzy* atas daerah - daerah masukan dan keluaran dan menyusunnya dalam perangkat aturan. Basis pengetahuan terdiri dari fakta (*Data Base*), dan kaidah atur (*Rule Base*). Fakta (*Data Base*) merupakan bagian pengetahuan yang memuat informasi tentang objek, peristiwa, atau situasi. Fakta umumnya menyatakan kondisi statik dari suatu objek. Sedangkan kaidah atur (*Rule Base*) berisi informasi tentang cara membangkitkan fakta baru atau hipotesa fakta yang sudah ada.

e. Menyusun Basis Data (*Data Base*)

Basis data berfungsi untuk mendefinisikan himpunan - himpunan *fuzzy* dari sinyal masukan dan sinyal keluaran agar dapat digunakan oleh variabel *linguistic* dalam basis aturan. Dalam pendefinisian tersebut biasanya dilakukan secara subjektif dengan menggunakan pendekatan heuristik dan didasarkan pada pengalaman dan pertimbangan yang menyangkut kereakayaan, sehingga bergantung penuh pada perancang.

f. *Penentuan Inferencing (Rule Base)*

Pada umumnya, aturan-aturan *fuzzy* dinyatakan dalam bentuk “*IF...THEN*” yang merupakan inti dari relasi *fuzzy*. Relasi *fuzzy* dinyatakan dengan *R*, juga disebut implikasi *fuzzy*. Untuk mendapatkan aturan “*IF.....THEN*” ada dua cara utama yaitu:

1. Menanyakan ke operator manusia yang dengan cara manual telah mampu mengendalikan sistem tersebut, dikenal dengan “*human expert*”.
2. Dengan menggunakan algoritma pelatihan berdasarkan data-data masukan dan keluaran.

Dalam penalaran logika *fuzzy*, ada dua tipe utama untuk pengambilan keputusan *fuzzy* yaitu : *Generalized Modus Ponens* (GMP) dan *Generalized Modus Tolens* (GMT). GMP disebut juga dengan *direct reasoning*, sedangkan GMT disebut juga *indirect reasoning*.

Kaidah atur dalam *fuzzy* ini biasanya tersusun dengan pernyataan :

IF (antecedent) THEN (consequent) atau dapat juga *IF x is A THEN y is B*.

Antecedent : berisi himpunan fakta input (sebab).

Consequent : berisi himpunan fakta output (akibat).

IF ... THEN ... dalam logika *fuzzy* akan melakukan pemetaan dari himpunan *fuzzy input* ke himpunan *fuzzy output*.

g. *Logika Pengambil Keputusan*

Merupakan inti dari Logika *Fuzzy* yang mempunyai kemampuan seperti manusia dalam mengambil keputusan. Aksi pengaturan *fuzzy* disimpulkan dengan menggunakan implikasi *fuzzy* dan mekanisme inferensi *fuzzy*.

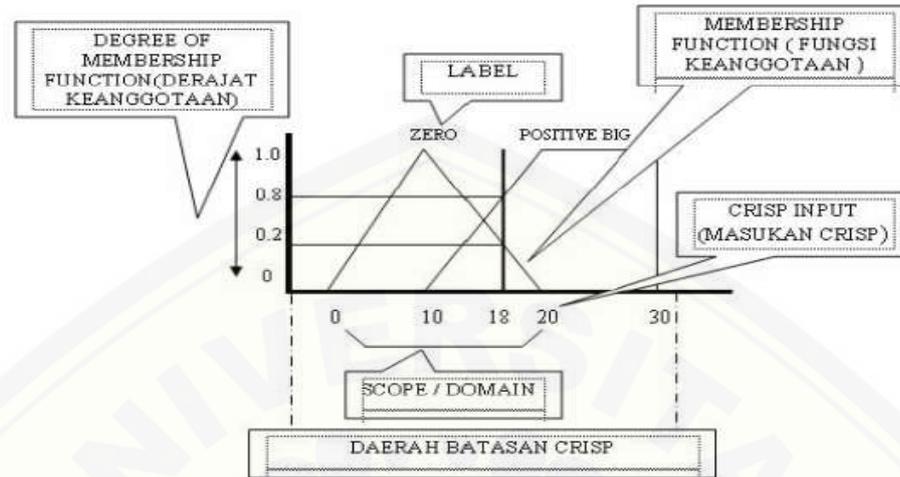
h. *Defuzzyfikasi*

Keputusan yang dihasilkan dari proses penalaran masih dalam bentuk *fuzzy*, yaitu berupa derajat keanggotaan keluaran. Hasil ini harus diubah kembali menjadi variabel numerik *non-fuzzy* melalui proses *defuzzyfikasi*. Adapun persamaan untuk penentuan proses ini ditunjukkan pada Persamaan 2.13 berikut :

$$V_{(0)} = \sum_{j=1}^i \frac{V_i}{J} \quad (2.12)$$

$$|V_f| = v_{\mu v}(v) \quad (2.13)$$

Secara umum diagram pengolahan data dengan *fuzzy* dapat dilihat pada Gambar 2.9 dibawah ini :



Gambar 2.9 Konsep dasar logika *fuzzy* (Sumber : Kusumadewi.S ,2002)

Ada beberapa alasan mengapa orang menggunakan logika fuzzy, antara lain yaitu:

1. Konsep logika *fuzzy* mudah dimengerti. Konsep matematis yang mendasari penalaran *fuzzy* sangat sederhana dan mudah dimengerti.
2. Logika *fuzzy* sangat fleksibel.
3. Logika *fuzzy* memiliki toleransi terhadap data-data yang tidak tepat.
4. Logika *fuzzy* mampu memodelkan fungsi-fungsi non linear yang sangat kompleks.
5. Logika *fuzzy* dapat membangun dan mengaplikasikan pengalaman-pengalaman para pakar secara langsung tanpa harus melalui proses pelatihan.
6. Logika *fuzzy* dapat bekerja sama dengan teknik-teknik kendali secara konvensional.
7. Logika *fuzzy* didasarkan pada bahasa alami.

2.8 Matlab

MATLAB (matemathics labolatory atau matrix laboratory) adalah sebuah program untuk analisis dan komputasi numerik, merupakan suatu bahasa pemrograman matematika lanjutan yang dibentuk dengan dasar pemikiran

menggunakan sifat dan bentuk matriks. Dalam ilmu komputer, MATLAB didefinisikan sebagai bahasa pemrograman yang digunakan untuk mengerjakan operasi matematika atau operasi aljabar matriks.

MATLAB (MATrix LABoratory) yang merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi berbasis pada matriks sering digunakan untuk teknik komputasi numerik, digunakan untuk menyelesaikan masalah-masalah yang melibatkan operasi matematika elemen, matriks, optimasi, aproksimasi, dan lain-lain. MATLAB banyak digunakan pada:

- a. Matematika dan komputasi;
- b. Pengembangan dan algoritma;
- c. Pemrograman modeling, simulasi, dan pembuatan prototipe;
- d. Analisa data, eksplorasi, dan visualisasi;
- e. Analisis numerik dan statistik;
- f. Pengembangan aplikasi teknik.

MATLAB merupakan system interaktif yang data dasarnya adalah matriks. Matriks dianggap data dasar dalam MATLAB dapat ditulis dalam bentuk matrik. Selain itu di dalam MATLAB sendiri tersedia perangkat lunak Simulink dimana kita dapat memanfaatkan penggunaan simulink dari macam-macam demos yang tersedia untuk keperluan teknik pengendalian maupun untuk analisis suatu plant. Pada penelitian ini metode *Fuzzy Logic Controller (FLC)* diterapkan pada Simulink MATLAB. Penelitian ini menggunakan MATLAB versi 7.1.1.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan jenis penelitian berupa metode *action research*. Langkah pertama akan dilakukan kajian (*research*) terhadap Sistem Energi Angin melalui studi literatur. Metode ini digunakan untuk menghasilkan suatu model Sistem Energi Angin dengan pengaturan *State Of Charge* (SOC) baterai berbasis *Fuzzy Logic Controller* (FLC) yang merupakan hipotesa awal dalam penelitian.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun tempat dan waktu penelitian - analisis dilakukan secara umum dilakukan di :

Tempat : Laboratorium Konversi Energi Listrik Fakultas Teknik,
Universitas Jember

Alamat : Jalan Slamet Riyadi no 62 Patrang
Kecamatan Patrang Kabupaten Jember

Waktu : November 2014 – Desember 2015

3.3 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang diperlukan adalah :

1. PC / Laptop

Komputer digunakan untuk melakukan simulasi rancangan sistem serta melakukan analisis hasil simulasi.

2. Software Matlab 7

Perancangan dan simulasi metode *Fuzzy Logic Controller*(FLC) menggunakan *software* Matlab 7.

3.4 Prosedur Penelitian

Dalam pembuatan skripsi dan penelitian ini, dibuat langkah-langkah / prosedur penelitian sebagai berikut :

a. Tahap Persiapan:

Sebelum penelitian dilaksanakan, terlebih dahulu dilakukan tahap persiapan menyusun perlengkapan penelitian serta mempersiapkan administrasi, seminar proposal, pelatihan, membuat garis besar rencana / konsep penelitian.

b. Studi Literatur Terhadap Objek dan Penelitian:

Dalam tahap ini mencari jurnal maupun sumber materi baik artikel lokal maupun internasional yang mendukung penelitian ini dan mempelajari literatur tentang segala sesuatu yang mendukung perancangan Sistem Energi Angin Grid-tied, data sheet komponen-komponen yang dibutuhkan, sistem SOC (State of Charge) pada baterai, Fuzzy Logic Controller (FLC) dll.

c. Pengumpulan Data Kecepatan Angin:

Data kecepatan angin merupakan data yang paling utama pada penelitian ini, dimana data angin tersebut digunakan sebagai input pada sistem agar dapat menghasilkan suatu daya. Data angin yang digunakan merupakan data skripsi dari penelitian sebelumnya yang dilakukan di pantai Watu Ulo Kabupaten Jember selama jangka waktu 24 jam selama 2 hari.

d. Perencanaan dan Penentuan Ukuran Komponen yang Akan Disuplai Oleh Sistem Energi Angin-Grid Tied :

Dalam tahap ini merupakan tahap perencanaan beban dan komponen yang akan dipakai. Penentuan ukuran beban ini digunakan beban yang standart digunakan dalam sebuah rumah. Dimana beban ini merupakan energi maksimal yang akan disuplai sistem dalam jangka waktu 1 hari. Sehingga dari besar beban tersebut dapat dilakukan perancangan sistem energi angin yang sesuai dengan beban yang dibutuhkan dan dapat pula merancang besar kapasitas baterai sebagai media penyimpanan.

e. Pemodelan Sistem, Algoritma Kontrol dan Penjadwalan Pada Sistem Energi Angin-Grid Tied dengan Menggunakan *Simulink* Matlab:

Pemodelan sistem dengan menggunakan software Matlab 7, dimana akan dirancang sebuah sistem energi angin dengan masukan suatu kecepatan angin yang akan menghasilkan suatu daya yang akan disuplai pada beban dan baterai. Selanjutnya merancang dan membuat algoritma kontrol metode *Fuzzy Logic Controller (FLC)* berdasarkan nilai kecepatan angin, baterai dan beban. Logika ini digunakan untuk mengatur penjadwalan antara penggunaan sistem energi angin dan Grid (PLN) untuk mensuplai beban.

f. Pengujian Respon Simulasi:

Dalam tahap ini akan dilakukan pengujian terhadap model sistem yang sudah dibuat dengan menggunakan sistem kontrol (Fuzzy Logic Controller). Hasil dari pengujian respon sistem ini ditampilkan dalam bentuk data berupa tabel dan grafik yang selanjutnya dianalisis tentang hubungan variabel terkait didalamnya.

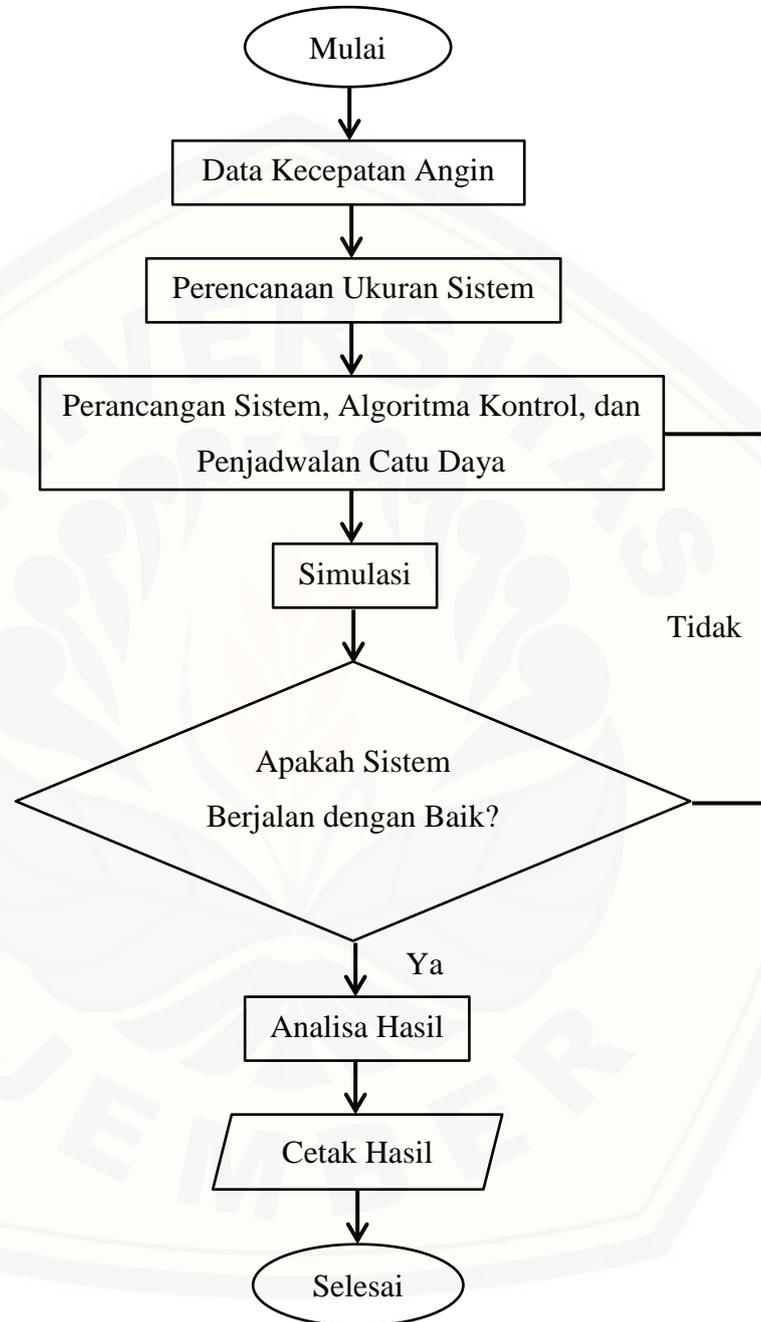
g. Analisis Sistem:

Menganalisa data kecepatan angin, SOC baterai, serta beban untuk efisiensi penjadwalan catu daya sistem energi angin dan grid (PLN). Sehingga dapat mengetahui pemanfaatan sistem energi angin yang digunakan. Dan dapat membandingkan perbedaan penggunaan manual switch dan logika fuzzy dalam mengontrol catu daya tambahan jika baterai mengalami kekurangan daya untuk mensuplai beban.

h. Pengambilan Kesimpulan dan Saran:

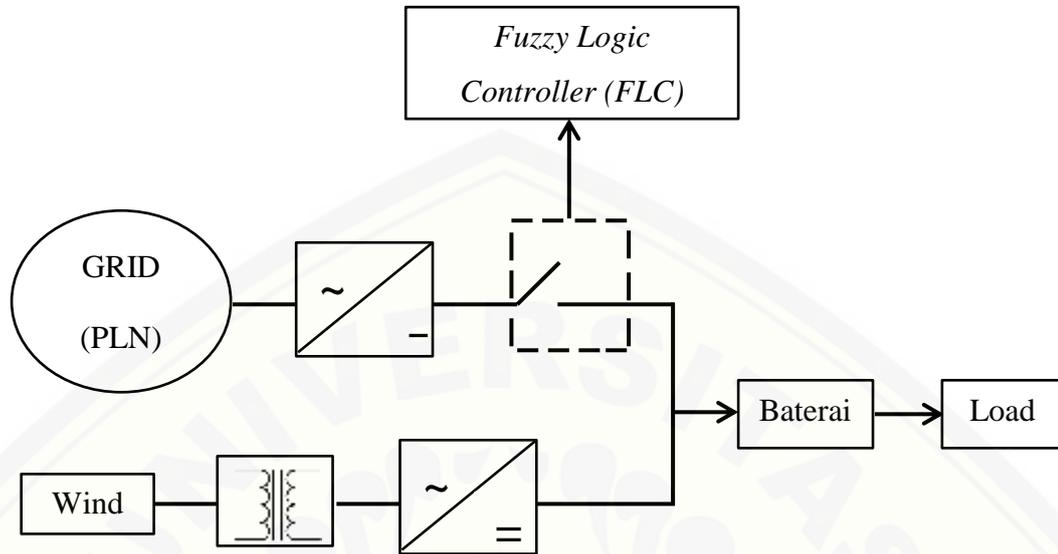
Pengambilan kesimpulan dari semua hasil analisis data yang telah didapat berdasarkan dasar teori yang telah dijelaskan dan berdasarkan hasil pengujian respon simulasi yang telah dilakukan. Serta saran yang berisi tentang perbaikan –perbaikan dan kekurangan pada penelitian ini. Juga berisi saran pengembangan, pembuatan alat dan aplikasi dalam pemanfaatan energi alternatif.

3.5 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Flowchart penelitian

3.6 Perancangan Sistem / Blok Diagram Sistem



Gambar 3.2 Perencanaan sistem dan algoritma control soc pada sistem energi angin-grid tied

Gambar diatas merupakan desain sistem atau blok diagram rancangan Sistem Energi Angin-Grid tie secara keseluruhan pada penelitian yang akan dilakukan. Tujuan perancangan sistem ini adalah untuk mempermudah pembaca dalam melihat sistem secara keseluruhan.

3.7 Penentuan Ukuran Sistem

Dalam penentuan ukuran sistem yang digunakan dalam perancangan Sistem Energi Angin Grid-tied ini, ada beberapa komponen dan atau alat yang harus ditentukan ukurannya meliputi :

- Penentuan tegangan nominal (V_{ss}) yang dipakai;
- Penentuan ukuran beban rumah tangga/energi yang digunakan dalam waktu 1 hari (E_{load}) karena tidak adanya otonomi daya;
- Penentuan kapasitas baterai yang diperlukan (tanpa adanya otonomi daya);

3.7.1 Penentuan Tegangan Nominal Sistem (V_{ss})

Tegangan nominal sistem khususnya komponen-komponen sistem perlu dipilih agar dapat berfungsi pada tegangan nominal (V_{ss}). Tegangan yang digunakan biasanya untuk skala rumah tangga adalah 12 V, 24 V dan 48 V, Seleksi (V_{ss}) harus disesuaikan dengan kondisi sumber dan beban yang disuplai, dan bergantung pada ketersediaan peralatan. Dalam sistem ini digunakan tegangan nominal 12 V DC karena sistem utama berasal dari energy angin dan daya yang digunakan dibawah 5 kWh (Satwiko.S, 2012).

3.7.2 Penentuan Ukuran Beban

Pengujian ini dilakukan selama 24 jam atau time 240 pada simulasi. Beban yang digunakan adalah beban fluktuatif setiap jam berdasarkan kebutuhan beban harian.

Tabel 3.1 Data pembebanan

Real Time	Waktu Simulasi (time)	Beban (Watt)	Real Time	Waktu Simulasi (time)	Beban (Watt)
0	10	300	12	130	400
1	20	300	13	140	300
2	30	300	14	150	300
3	40	300	15	160	400
4	50	300	16	170	600
5	60	400	17	180	800
6	70	500	18	190	1200
7	80	300	19	200	1200
8	90	300	20	210	1200
9	100	500	21	220	600
10	110	500	22	230	400
11	120	500	23	240	300

3.7.3 Perhitungan Kapasitas Baterai Charge Regulator (BCR)

Pada Sistem Energi Angin, beban mendapatkan energi dari Baterai Charge Regulator (BCR). Kapasitas arus yang mengalir pada BCR dapat ditentukan dengan mengetahui beban maksimal yang terpasang. Beban maksimal terjadi pada

malam hari yaitu 1200 W pukul 18.00 – 20.00 (seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1). Dengan menggunakan persamaan 3.1 maka beban maksimal tegangan sistem (V_{ss}) adalah 12 V maka kapasitas arus yang mengalir di BCR sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 I_{\max} &= \frac{P_{\max}}{(V_{ss})} & (3.1) \\
 &= \frac{1200}{12} \\
 &= 100 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Dengan

I_{\max} = Arus yang mengalir pada BCR (Ampere)

P_{\max} = Daya maksimum pada beban (Watt)

V_{ss} = Tegangan nominal sistem (Volt)

3.7.4 Penentuan Kapasitas Baterai

Perhitungan kebutuhan baterai penyimpan dilakukan dengan penentuan terlebih dahulu tegangan nominal baterai V_{ss} . Dalam perancangan sistem ini, tegangan nominal yang digunakan adalah 12 V maka kebutuhan baterai dihitung dengan menggunakan persamaan 3.2 berikut:

$$\begin{aligned}
 A_h &= \frac{E_{load}}{(V_{ss})} & (3.2) \\
 &= \frac{12100}{12} \\
 &= 1008 \text{ Ah} \\
 A_h &\approx 1008 \text{ Ah}
 \end{aligned}$$

Dengan

A_h = Arus yang mengalir pada BCR (Ampere)

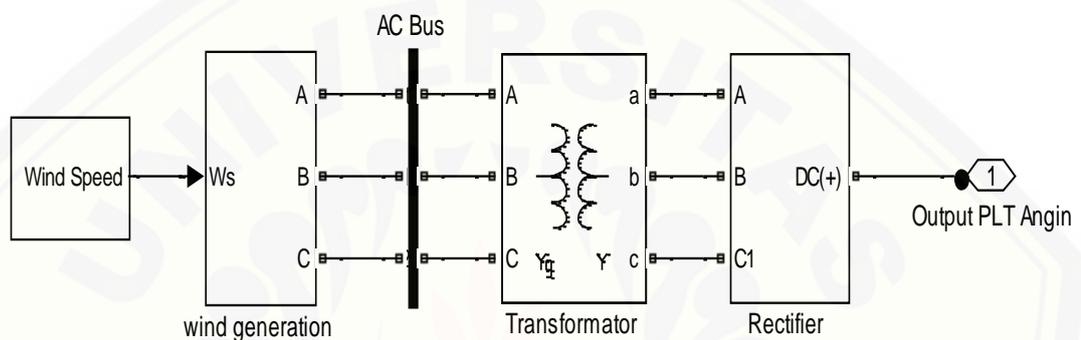
E_{load} = Daya maksimum pada beban (Watt)

V_{ss} = Tegangan nominal sistem (Volt)

3.8 Pemodelan Sistem

3.8.1 Pemodelan *Wind Power System*

Pemodelan *Wind Power System* pada tugas akhir ini seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3. Pemodelan sistem ini terdiri dari beberapa subsistem yang didalamnya terdiri dari rangkaian yang lebih kompleks yaitu kontroler sudut pitch, turbin angin, dua mass drive train, generator sinkron magnet permanen, transformator, dan rectifier.

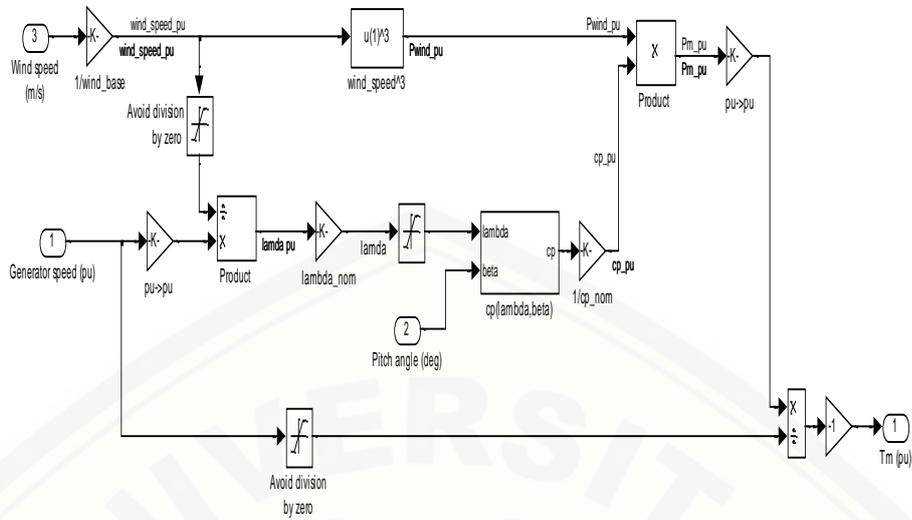


Gambar 3.3 Model *wind power system*

Prinsip kerja pemodelan *Wind Power System* di atas adalah input pada *Wind Power System* berupa data kecepatan angin yang bervariasi setiap jam dalam sehari yang akan menghasilkan torsi mekanik sebagai input pada generator sinkron magnet permanen, dan akan menghasilkan output berupa daya angin dan tegangan AC tiga fasa yang akan disearahkan menggunakan rectifier sehingga akan menghasilkan tegangan DC. Namun sebelum disearahkan terlebih dahulu tegangan diturunkan menggunakan transformator agar menghasilkan tegangan yang diinginkan.

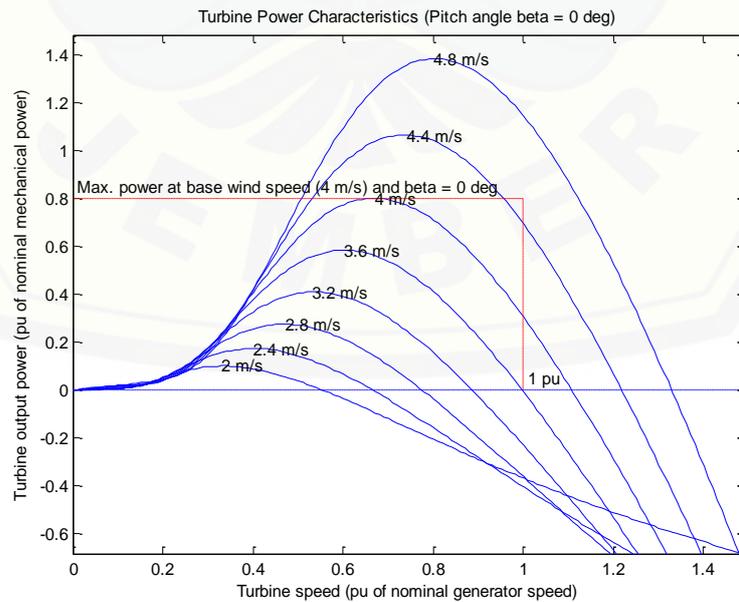
3.8.2 Pemodelan *Wind Turbine*

Turbin angin berfungsi untuk mengubah energi angin menjadi listrik. Pada tugas akhir ini, menggunakan model blok simulink yang sudah tersedia pada Matlab. Input berupa kecepatan angin dalam satuan m/s, sudut pitch dalam satuan degree, dan kecepatan generator dalam satuan pu. Berikut adalah model dari turbin angin pada simulink.



Gambar 3.4 Model simulink *wind turbine*

Karakteristik turbin angin yang digunakan pada tugas akhir ini ditunjukkan pada Gambar 3.5 dibawah ini, dimana karakteristik ini masih dalam satuan pu. Berdasarkan Gambar 3.5 dapat diketahui bahwa daya yang dihasilkan sesuai dengan input kecepatan angin yaitu semakin besar input kecepatan angin maka semakin besar daya yang dihasilkan, dan sebaliknya jika input kecepatan angin semakin kecil maka daya yang dihasilkan juga semakin kecil.



Gambar 3.5 Karakteristik model dari *wind turbine* pada simulink

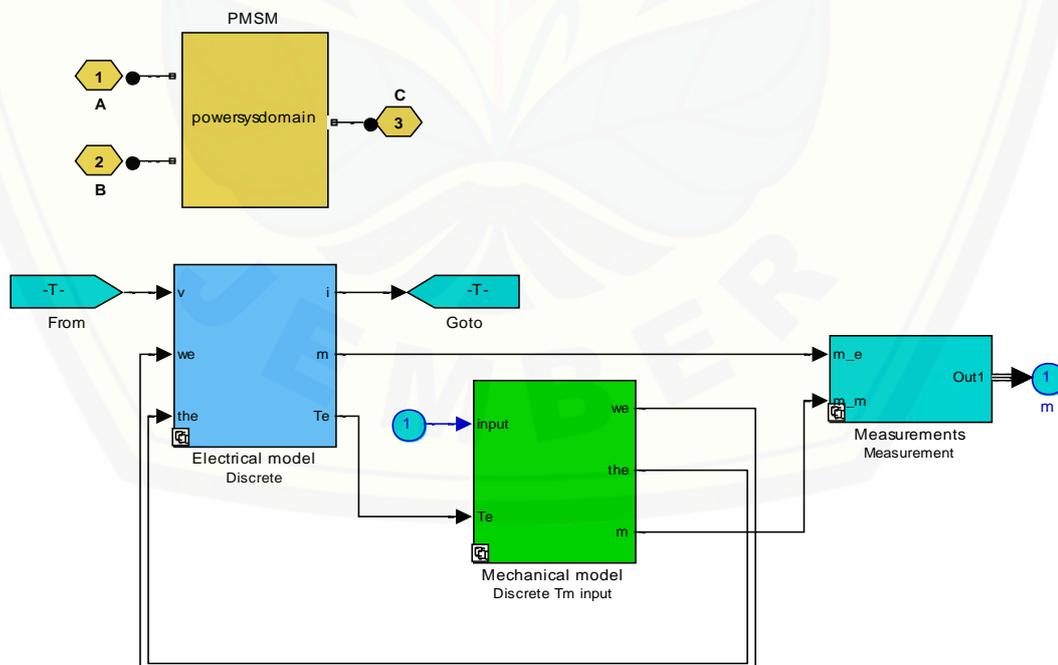
Parameter yang digunakan pada blok simulink turbin angin ditunjukkan pada Tabel 3.2 di bawah ini. Turbin angin yang digunakan memiliki daya output nominal sebesar 1 kW dengan input kecepatan angin dari 2 m/s sampai dengan 6,9 m/s.

Tabel 3.2 Data spesifikasi turbin angin

Daya Nominal	1 kW
Cut In Speed	2 m/s
Cut Off Speed	6,9 m/s
Kecepatan Angin Nominal	4 m/s

3.8.3 Pemodelan *Permanent Magnet Synchronous Generator*

Pada tugas akhir ini digunakan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) yang berfungsi untuk mengubah daya keluaran mekanik dari turbin angin menjadi listrik. Permanent Magnet Synchronous Generator tidak membutuhkan daya eksitasi dari luar, karena kumparan medannya berbentuk magnet permanen. PMSG yang digunakan merupakan model blok simulink yang sudah tersedia pada Matlab. Berikut adalah model dari PMSG pada simulink.



Gambar 3.6 Model simulink PMSG

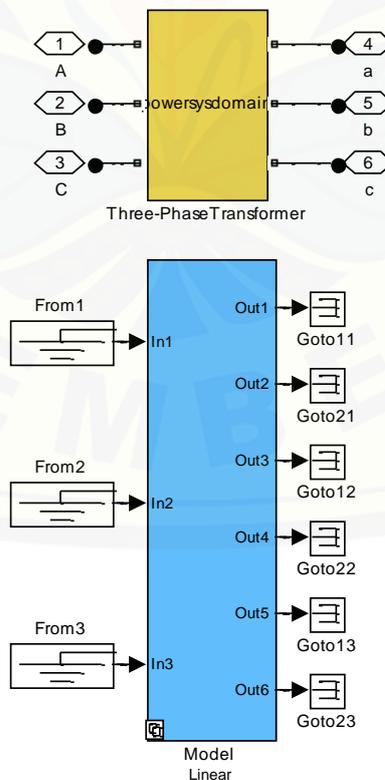
Tabel 3.3 menunjukkan parameter dan spesifikasi PMSG yang digunakan pada *wind power system*.

Tabel 3.3 Parameter PMSG

Jumlah Kutub	5
Rating Kecepatan	153 rad/s
Armature Resistance (R_s)	0,425 Ω
Induktansi Stator (L_s)	8,4 mH
Rating Torsi	3,4275 Nm
Rating Daya	8,5 kW

3.8.4 Pemodelan *Transformator*

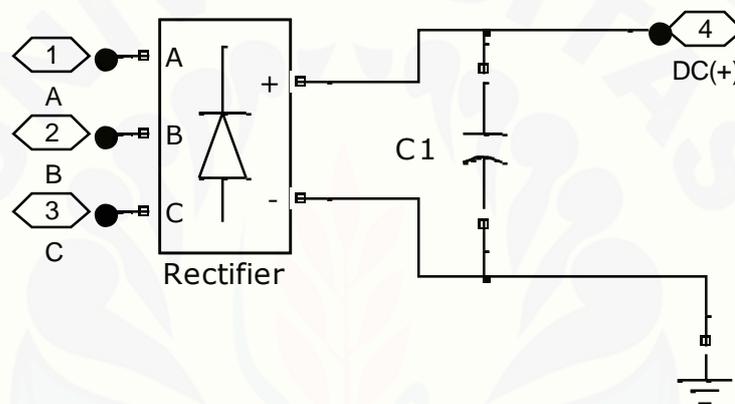
Pada tugas akhir ini digunakan Transformator untuk menurunkan tegangan yang dihasilkan oleh generator agar sesuai dengan tegangan yang diinginkan. Hal ini dikarenakan generator menghasilkan tegangan yang sangat besar. Transformator yang digunakan merupakan model blok simulink yang sudah tersedia pada Matlab. Berikut adalah model dari transformator pada simulink.



Gambar 3.7 Model simulink transformator

3.8.5 Pemodelan *Rectifier*

Pada pembangkit listrik tenaga angin, tegangan keluaran yang dihasilkan generator tergantung pada kecepatan angin saat itu. Maka tegangan yang dihasilkan tidak akan konstan tergantung pada kecepatan angin yang selalu berubah-ubah dalam bentuk tegangan AC. Oleh karena itu diperlukan sebuah penyearah/rectifier agar tegangan yang dihasilkan tegangan DC, sehingga akan mudah untuk mengaturnya. Penyearah yang digunakan merupakan model blok simulink yang sudah tersedia pada Matlab. Berikut adalah model dari rectifier pada simulink.

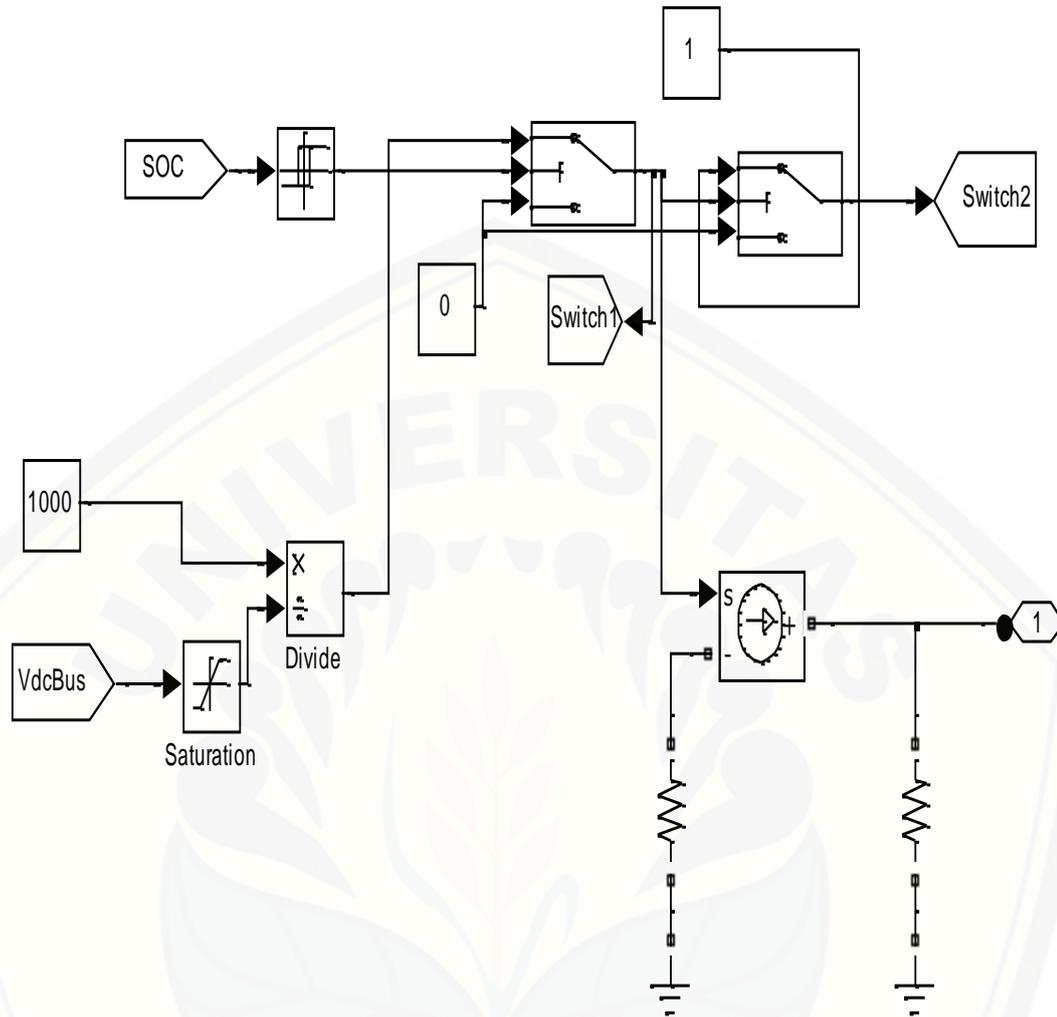


Gambar 3.8 Model simulink rectifier

3.8.6 Pemodelan *AC Grid (PLN)*

Pada tugas akhir ini, selain menggunakan sumber utama energi angin juga digunakan sumber energi cadangan dari Grid (PLN). Sumber energi cadangan tersebut berfungsi untuk menyuplai beban, jika sumber energi dari angin tidak mencukupi untuk menyuplai beban. Pemodelan Grid (PLN) ini menggunakan asumsi kapasitas daya sebesar 1000 kVA dan tegangan telah disearahkan menjadi tegangan DC.

Pemodelan Grid (PLN) yang digunakan merupakan model blok simulink yang sudah tersedia pada Matlab. Berikut adalah model dari Grid (PLN) yang sudah terhubung dengansmart switch pada simulasi Matlab.

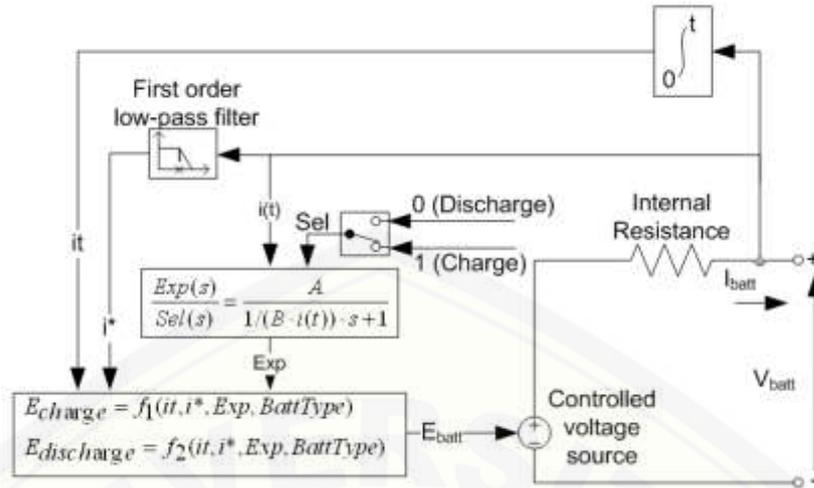


Gambar 3.9 Subsistem Grid (PLN) yang terhubung dengan smart switch

3.8.7 Pemodelan Baterai

Sistem Konversi Energi Angin Gried-tied memerlukan tempat penyimpanan energi dari sumber energi angin dan Grid (PLN) sebelum dihubungkan ke beban. Pada tugas akhir ini digunakan pemodelan tempat penyimpanan energi berupa baterai tipe lead acid yang sudah tersedia pada simulink Matlab yang telah dimodifikasi.

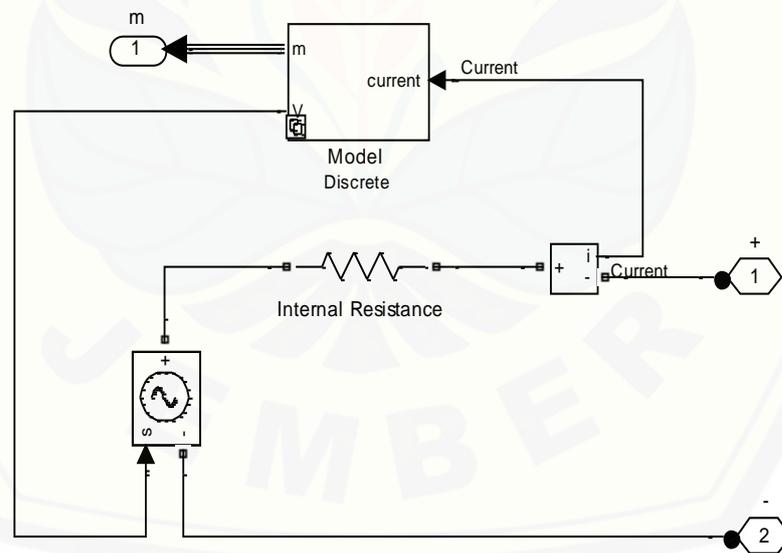
Model simulink baterai yang digunakan adalah baterai dimanis yang memungkinkan digunakan dalam dua keadaan sekaligus yaitu saat *charge* dan *discharge*, tipe baterai ini sangat memungkinkan digunakan secara berulang ulang. Adapun skema alur baterai tipe ini ditunjukkan Gambar 3.10 di bawah ini.



Gambar 3.10 Skema alur kerja baterai dengan *Matlab simulink*

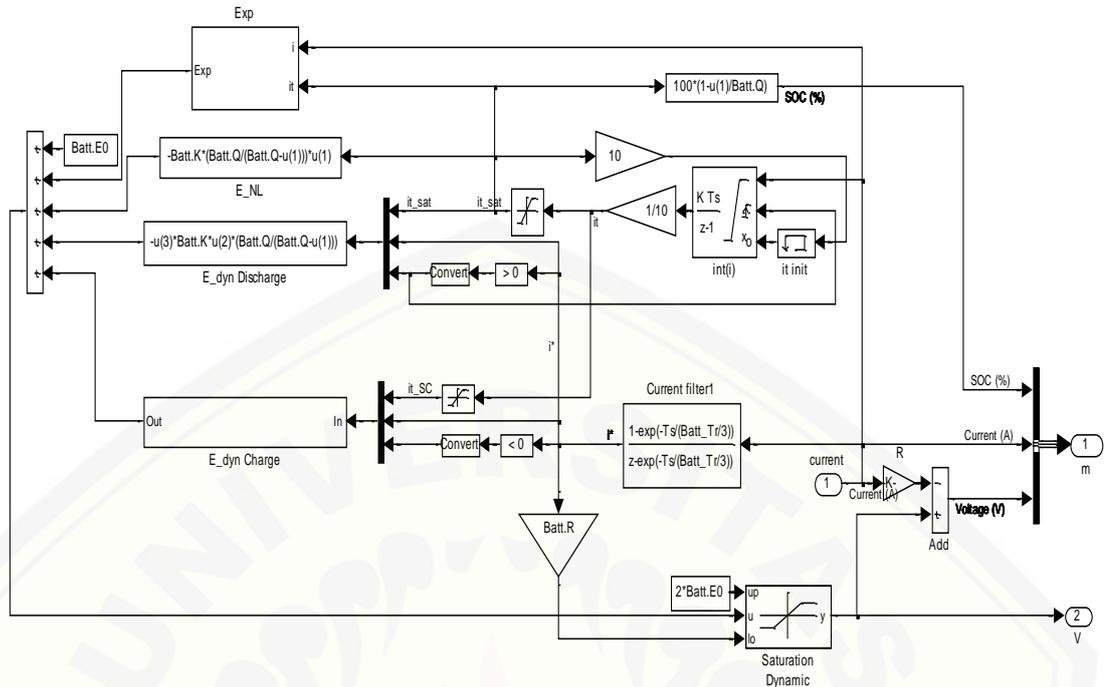
(Sumber : www.mathwork.com)

Adapun subsistem pemodelan baterai sendiri agar persamaan tersebut dapat dihubungkan ke rangkaian *SimPowerSystem* Simulink Matlab maka model *discrete* ditunjukkan seperti Gambar 3.11 dibawah ini.



Gambar 3.11 Rangkaian subsistem pemodelan baterai

Sedangkan *model discrete* pada rangkaian tersebut sebenarnya dibangun dari persamaan-persamaan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.12 dibawah ini.



Gambar 3.12 Rangkaian subsistem *discrete model* dan persamaan untuk pemodelan baterai

Pemodelan baterai pada simulasi seperti yang ditunjukkan Gambar 3.12 diatas juga sama dengan lainnya yang terdiri dari beberapa persamaan yang saling terhubung, sehingga dapat mengetahui nilai arus (A), tegangan (V) dan *State Of Charge* (SOC) baterai.

Sementara parameter-parameter yang terdapat didalam baterai pada *simulink* Matlab ditunjukkan pada Tabel 3.4 dibawah ini.

Tabel 3.4 Parameter pemodelan baterai

Parameter	Nilai
Nominal Voltage	12 V
Rated Capacity	1000 Ah
Initial State Of Charge	0-100 %

Discharge Current	2000 A
Maximum Capacity	1050 Ah
Fully Charged Voltage	1,5679 V
Internal Resistance	0.00012
Capacity @ Nominal Voltage	310.2778 Ah
Exponential Zone	12,2171 V
	3.33333 Ah

Sedangkan untuk pemodelan *charge* dan *discharge*-nya ditentukan oleh Persamaan 3.3 dan 3.4 dibawah ini :

1. *Discharge model* ($i^* > 0$)

$$f1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \right) \cdot 0 \quad (3.3)$$

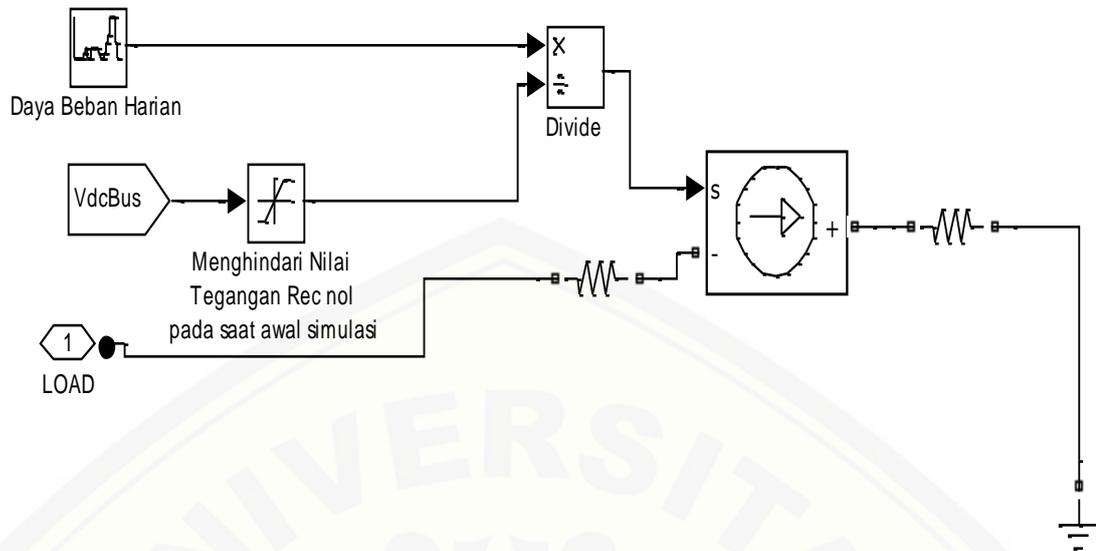
2. *Charge model* ($i^* < 0$)

$$f2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0,1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \cdot 0 \quad (3.4)$$

3.8.8 Pemodelan *Beban*

Pada tugas akhir ini beban yang digunakan dalam pemodelan Sistem Konversi *Grid-Tied* ini adalah beban *fluktuatif* yang dirancang berdasarkan kebutuhan beban harian pada umumnya. Beban yang digunakan berkisar dari 300 sampai dengan 1200 Watt yang dapat berubah setiap jam dan beban berupa beban DC. Beban puncak terjadi pada saat pukul 18.00 sampai dengan pukul 20.00 yaitu sebesar 1200 Watt.

Adapun rangkain subsistem beban untuk simulasi ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.13 dibawah ini.



Gambar 3.13 Rangkaian subsistem *dynamic load* untuk *sistem energi angin grid-tied*

3.9 Perancangan Algoritma Kontrol *Smart-Switch* dengan *Fuzzy Logic Controller*

Pada sistem penjadwalan Sistem Energi Angin *Grid-Tied* dengan *Fuzzy Logic Controller* dalam pencatuan daya untuk menghasilkan *output* berupa *switching ON-OFF* pada *smart-switch AC Grid*. Control *switch* ini kita gunakan kecerdasan buatan dengan metode *Fuzzy Logic Controller* (FLC) yang dipengaruhi oleh 3 *input* yaitu input pertama *State Of Charge* (SOC) baterai, input kedua Arus Angin (*Iwind*), dan input yang ketiga adalah Arus Beban (*Iload*). Seangkan *ouput* yaitu *Switching ON* dan *OFF* dan yang kemudian akan diatur dengan *rule-rule fuzzy* yang ada.

Secara umum perancangan *Fuzzy Logic Controller* didasarkan pada "*expert's experience*", pengalaman pakar dari seorang operator manusia pada perancangan pengendali untuk mengendalikan proses dengan relasi yang selanjutnya dinyatakan dengan aturan *fuzzy*. Dalam penyusunan kontrol Sistem Energi Angin *Grid-Tied* ini digunakan tipe *mamdani* dan ada beberapa langkah utama antara lain sebagai berikut :

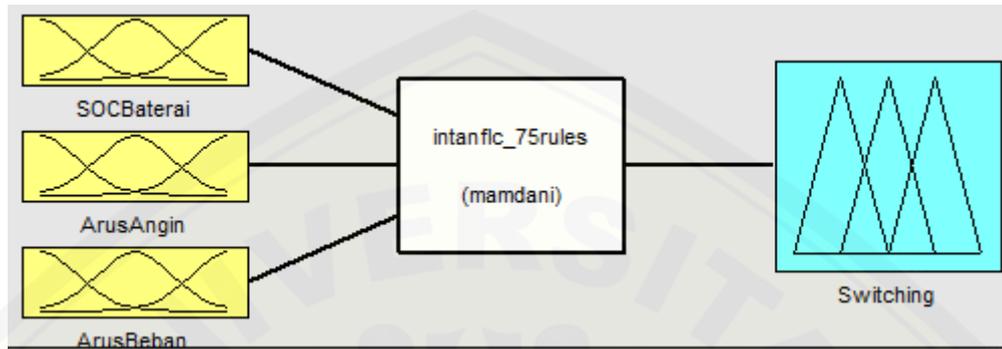
- a. Mendefinisikan *Variable Input* dan *Output Fuzzy Logic Controller* (FLC).

Dalam penelitian ini variable *input* meliputi SOC Baterai, Arus Angin (*Iwind*) dan Arus Beban (*Iload*). Sedangkan *output Fuzzy Logic Controller* adalah variabel *output* yang dimanipulasi dan dikendalikan sehingga menghasilkan *switching ON/OFF* pada *grid*. Adapun rentang semesta serta jangkauan masing-masing variabel ditunjukkan oleh Tabel 3.5 berikut :

Tabel 3.5 Semesta dan jangkauan tiap-tiap variabel *fuzzy logic controller*

No	Tipe	Variable	Range	Keterangan
1	Input	SOC Baterai	10 -90	Didasarkan pada batas optimum baterai saat bekerja. Batas bawah adalah 10% dan batas atas adalah 90%. Hal ini agar kondisi baterai tetap terjaga. Biasanya disebut dengan DOD 80%
		Arus Angin	0 - 50	Penentuan didasarkan hasil simulasi energi angin
		Arus Beban	0 - 120	Penentuan didasarkan pada data energi yang diperlukan dalam waktu 1 hari
2	Output	ON	0.5 - 1	Saat 0.5 – 1 saklar akan menutup, keadaan ini adalah charger/ pengisian (close circuit)
		OFF	0 - 0.5	Pada saat 0 - 0.5 maka saklar akan membuka dan tegangan tidak akan mengalir (open circuit)

Dari pengolahan di *fuzzy* kita bisa melihat dengan menggunakan hasil dari proses pembagian semesta dengan menggunakan fungsi “*plotfis*” seperti yang ditunjukkan Gambar 3.14 berikut :



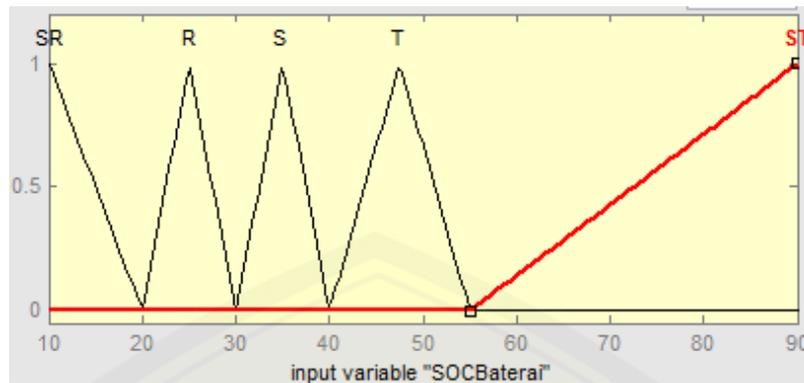
Gambar 3.14 Hasil *plotfis* dan pembagian jangkauan *fuzzy* pada matlab

- b. Membuat partisi *fuzzy* pada ruang *input* dan *output* serta memilih fungsi keanggotaan yang sesuai untuk variabel *linguistic input* dan variabel *linguistic output* tersebut.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.14 dalam penentuan variabel *input* yang didasarkan pada keadaan SOC baterai, Arus Angin, dan Arus Beban yang dibagi menurut kebutuhannya. Penentuan kondisi ini didasarkan pada pengalaman dan prediksi. SOC Baterai fungsi keanggotaan dibagi menjadi 5 kelas. Adapun partisi SOC baterai ini disampaikan pada Tabel 3.6 dan hasilnya dapat ditunjukkan di Matlab seperti Gambar 3.15 berikut :

Tabel 3.6 Fungsi kenggotaan masukan variabel soc baterai

No	Fungsi Keanggotaan	Simbol	Range	Jenis	Min	Center	Max
1	SOC Bat Sangat Rendah	SR	10 - 20	Trimf	0	10	20
2	SOC Bat Rendah	R	20 - 30	Trimf	20	25	30
3	SOC Bat Sedang	S	30 - 40	Trimf	30	25	40
4	SOC Bat Tinggi	T	40 - 70	Trimf	40	47.5	55
5	SOC Bat Sangat Tinggi	ST	70 - 90	Trimf	55	90	100

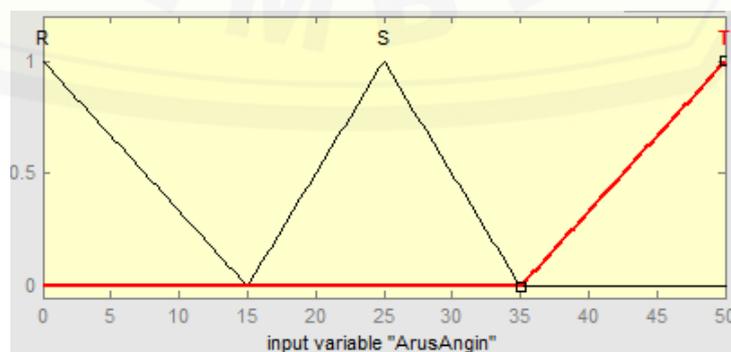


Gambar 3.15 Fungsi keanggotaan soc baterai

Sementara untuk menentukan keanggotaan Arus Angin (I_{wind}) diperoleh dari data hasil simulasi energi angin yang berdasarkan kecepatan angin selama satu hari. Pengelompokan variabel berdasarkan arusnya dibagi menjadi 3 parameter. Dari hasil partisi dan memilih fungsi keanggotaannya dapat dilihat di Tabel 3.7 sedangkan hasil *plotmf* di Matlab ditunjukkan seperti Gambar 3.16 berikut:

Tabel 3.7 Fungsi kenggotaan masukan variabel arus angin (i_{wind})

No	Fungsi Keanggotaan	Simbol	Range	Jenis	Min	Center	Max
1	Arus Angin Rendah	R	0 - 15	trimf	-15	0	15
2	Arus Angin Sedang	S	15 - 35	trimf	15	25	35
3	Arus Angin Tinggi	T	35 - 50	trimf	35	50	65

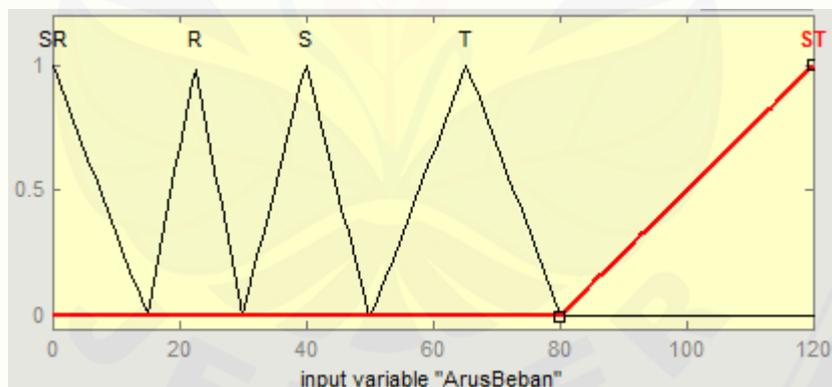


Gambar 3.16 Fungsi keanggotaan arus angin (i_{wind})

Parameter *input* yang ke-3 adalah Arus Beban (*Iload*). Dalam perencanaan sistem kontrol ini, arus beban dibagi menjadi 5 fungsi keanggotaan yang didasarkan pada besar daya tiap jamnya dalam waktu 1 hari. Dari hasil partisi dan memilih fungsi keanggotaannya dapat dilihat di Tabel 3.8 sedangkan hasil *plotmf* di Matlab ditunjukkan seperti Gambar 3.17 berikut:

Tabel 3.8 Fungsi keanggotaan masukan variabel arus beban (*iload*)

No	Fungsi Keanggotaan	Simbol	Range	Jenis	Min	Center	Max
1	Arus Beban Sangat Rendah	SR	0 - 15	trimf	-15	0	15
2	Arus Beban Rendah	R	15 - 30	trimf	15	22.5	30
3	Arus Beban Sedang	S	30 - 50	trimf	30	40	50
4	Arus Beban Tinggi	T	50 - 80	trimf	50	65	80
5	Arus Beban Sangat Tinggi	ST	80 - 120	trimf	80	120	130

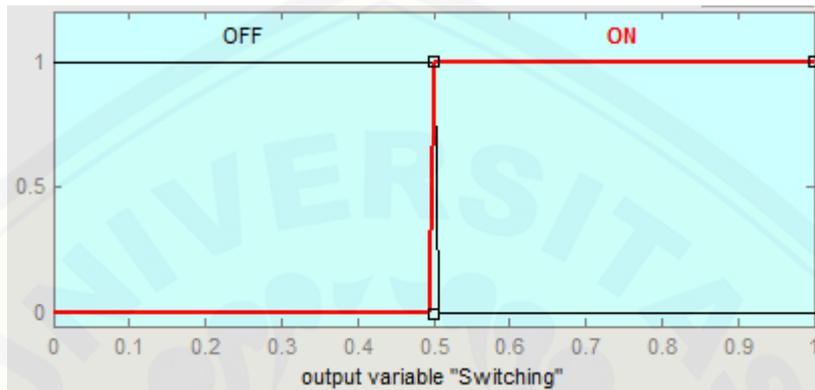


Gambar 3.17 Fungsi keanggotan arus beban (*iload*)

Sementara untuk perancangan Output dari *Fuzzy Logic Controller* ini digunakan *range* antara 0 - 1 dimana jika *output fuzzy* menunjukkan nilai 0 - 0.5 maka saklar akan *OFF*, sementara jika *output* menunjukkan nilai 0.5 - 1 maka saklar akan *ON*. Pada Tabel 3.9 merupakan fungsi keanggotaan dari *output* sedangkan Gambar 3.18 merupakan *plotmf* dari *output*.

Tabel 3.9 Fungsi keanggotaan masukan variabel *output*

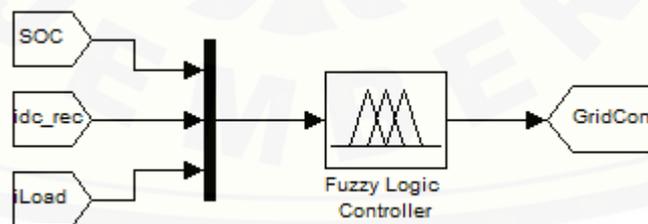
No	Fungsi Keanggotaan	Simbol	Range	Jenis	Min	Center	Max
1	ON	0	0.5 – 1	trapmf	0.49	0.5	1
2	OFF	1	0 - 0.5	trapmf	0	0.5	0.51



Gambar 3.18 Fungsi keanggotaan *output*

c. Membuat Basis Aturan *Fuzzy (Rule Base Fuzzy)*

Langkah berikutnya dalam perancangan sistem kontrol Sistem Energi Angin *Grid Tied* dengan metode *fuzzy logic controller* adalah dengan membuat basis aturan *fuzzy*. Dalam penentuan aturan-aturan kendali ini berdasarkan karakteristik sistem yang dikendalikan. Pada Gambar 3.19 ditunjukkan diagram *fuzzy* dalam Sistem Energi Angin *Grid-tied* ini.



Gambar 3.19 Diagram *toolbox fuzzy logic* pada sistem energi angin *grid-tied*

Dengan melihat peluang dan implikasi yang ada maka Sistem Energi Angin *Grid-tied* ini dapat dikontrol dengan menggunakan 75 (tujuh puluh lima)

kemungkinan yang terjadi. Adapun kemungkinan *rule* yang digunakan dapat dilihat dibawah ini.

1. If (SOC Baterai is SR) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is SR) then (Switching is ON)
2. If (SOC Baterai is SR) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is R) then (Switching is ON)
3. If (SOC Baterai is SR) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is S) then (Switching is ON)
4. If (SOC Baterai is SR) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is T) then (Switching is ON)
5. If (SOC Baterai is SR) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is ST) then (Switching is ON)
6. If (SOC Baterai is SR) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is SR) then (Switching is ON)
7. If (SOC Baterai is SR) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is R) then (Switching is ON)
8. If (SOC Baterai is SR) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is S) then (Switching is ON)
9. If (SOC Baterai is SR) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is T) then (Switching is ON)
10. If (SOC Baterai is SR) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is ST) then (Switching is ON)
11. If (SOC Baterai is SR) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is SR) then (Switching is ON)
12. If (SOC Baterai is SR) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is R) then (Switching is ON)
13. If (SOC Baterai is SR) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is S) then (Switching is ON)
14. If (SOC Baterai is SR) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is T) then (Switching is ON)
15. If (SOC Baterai is SR) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is ST) then (Switching is ON)
16. If (SOC Baterai is R) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is SR) then (Switching is OFF)
17. If (SOC Baterai is R) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is R) then (Switching is ON)
18. If (SOC Baterai is R) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is S) then (Switching is OFF)
19. If (SOC Baterai is R) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is T) then (Switching is OFF)

20. If (SOC Baterai is R) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is ST) then (Switching is OFF)
21. If (SOC Baterai is R) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is SR) then (Switching is OFF)
22. If (SOC Baterai is R) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is R) then (Switching is OFF)
23. If (SOC Baterai is R) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is S) then (Switching is OFF)
24. If (SOC Baterai is R) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is T) then (Switching is OFF)
25. If (SOC Baterai is R) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is ST) then (Switching is OFF)
26. If (SOC Baterai is R) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is SR) then (Switching is OFF)
27. If (SOC Baterai is R) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is R) then (Switching is OFF)
28. If (SOC Baterai is R) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is S) then (Switching is OFF)
29. If (SOC Baterai is R) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is T) then (Switching is OFF)
30. If (SOC Baterai is R) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is ST) then (Switching is OFF)
31. If (SOC Baterai is S) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is SR) then (Switching is OFF)
32. If (SOC Baterai is S) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is R) then (Switching is ON)
33. If (SOC Baterai is S) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is S) then (Switching is OFF)
34. If (SOC Baterai is S) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is T) then (Switching is OFF)
35. If (SOC Baterai is S) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is ST) then (Switching is OFF)
36. If (SOC Baterai is S) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is SR) then (Switching is OFF)
37. If (SOC Baterai is S) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is R) then (Switching is OFF)
38. If (SOC Baterai is S) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is S) then (Switching is OFF)
39. If (SOC Baterai is S) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is T) then (Switching is OFF)

40. If (SOC Baterai is S) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is ST) then (Switching is OFF)
41. If (SOC Baterai is S) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is SR) then (Switching is OFF)
42. If (SOC Baterai is S) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is R) then (Switching is OFF)
43. If (SOC Baterai is S) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is S) then (Switching is OFF)
44. If (SOC Baterai is S) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is T) then (Switching is OFF)
45. If (SOC Baterai is S) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is ST) then (Switching is OFF)
46. If (SOC Baterai is T) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is SR) then (Switching is OFF)
47. If (SOC Baterai is T) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is R) then (Switching is ON)
48. If (SOC Baterai is T) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is S) then (Switching is OFF)
49. If (SOC Baterai is T) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is T) then (Switching is OFF)
50. If (SOC Baterai is T) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is ST) then (Switching is OFF)
51. If (SOC Baterai is T) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is SR) then (Switching is OFF)
52. If (SOC Baterai is T) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is R) then (Switching is OFF)
53. If (SOC Baterai is T) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is S) then (Switching is OFF)
54. If (SOC Baterai is T) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is T) then (Switching is OFF)
55. If (SOC Baterai is T) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is ST) then (Switching is OFF)
56. If (SOC Baterai is T) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is SR) then (Switching is OFF)
57. If (SOC Baterai is T) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is R) then (Switching is OFF)
58. If (SOC Baterai is T) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is S) then (Switching is OFF)
59. If (SOC Baterai is T) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is T) then (Switching is OFF)

60. If (SOC Baterai is T) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is ST) then (Switching is OFF)
61. If (SOC Baterai is ST) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is SR) then (Switching is OFF)
62. If (SOC Baterai is ST) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is R) then (Switching is OFF)
63. If (SOC Baterai is ST) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is S) then (Switching is OFF)
64. If (SOC Baterai is ST) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is T) then (Switching is OFF)
65. If (SOC Baterai is ST) and (Arus Angin is R) and (Arus Beban is ST) then (Switching is OFF)
66. If (SOC Baterai is ST) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is SR) then (Switching is OFF)
67. If (SOC Baterai is ST) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is R) then (Switching is OFF)
68. If (SOC Baterai is ST) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is S) then (Switching is OFF)
69. If (SOC Baterai is ST) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is T) then (Switching is OFF)
70. If (SOC Baterai is ST) and (Arus Angin is S) and (Arus Beban is ST) then (Switching is OFF)
71. If (SOC Baterai is ST) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is SR) then (Switching is OFF)
72. If (SOC Baterai is ST) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is R) then (Switching is OFF)
73. If (SOC Baterai is ST) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is S) then (Switching is OFF)
74. If (SOC Baterai is ST) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is T) then (Switching is OFF)
75. If (SOC Baterai is ST) and (Arus Angin is T) and (Arus Beban is ST) then (Switching is OFF)

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian dan pengujian Sistem Energi Angin *Grid-Tied* ini adalah sebagai berikut :

1. Pemodelan Sistem Energi Angin *Grid-Tied* dapat dilakukan dengan :
 - a. Memodelkan Sistem Energi Angin *Grid-Tied* yang dilengkapi dengan pengaturan catu daya dapat menggunakan *Fuzzy Logic Controller* dengan input berupa SOC baterai dan Delta Arus yang merupakan selisih dari arus beban dan arus angin yang dihasilkan dalam penyusunan algoritma kontrolnya.
 - b. Dalam perancangan Sistem Energi Angin *Grid-Tied* permintaan energi beban lebih besar dari pada energi angin yang dihasilkan maka diperlukan baterai dengan kapasitas 1020 Ah yang digunakan untuk menyimpan energi listrik hasil konversi energi angin saat energi yang dibutuhkan beban sangat rendah.
2. Pemodelan Sistem Energi Angin *Grid-Tied* dengan manual-switch, saklar AC *Grid* di- *ON* kan pada saat pukul 20.00 – 23.00 karena diasumsikan dalam keadaan sesungguhnya dimana konsumen akan cenderung menggunakan AC *Grid* saat beban puncak.
3. Pemodelan Sistem Energi Angin *Grid-Tied* dengan smart-switch terdapat osilasi pada arus grid pukul 10.00 - 12.00 dan pukul 16.00 - 22.00 yang menyebabkan kontrol switch ON dan OFF berubah secara cepat, hal ini dipengaruhi oleh hasil arus angina yang berubah-ubah setiap detik.

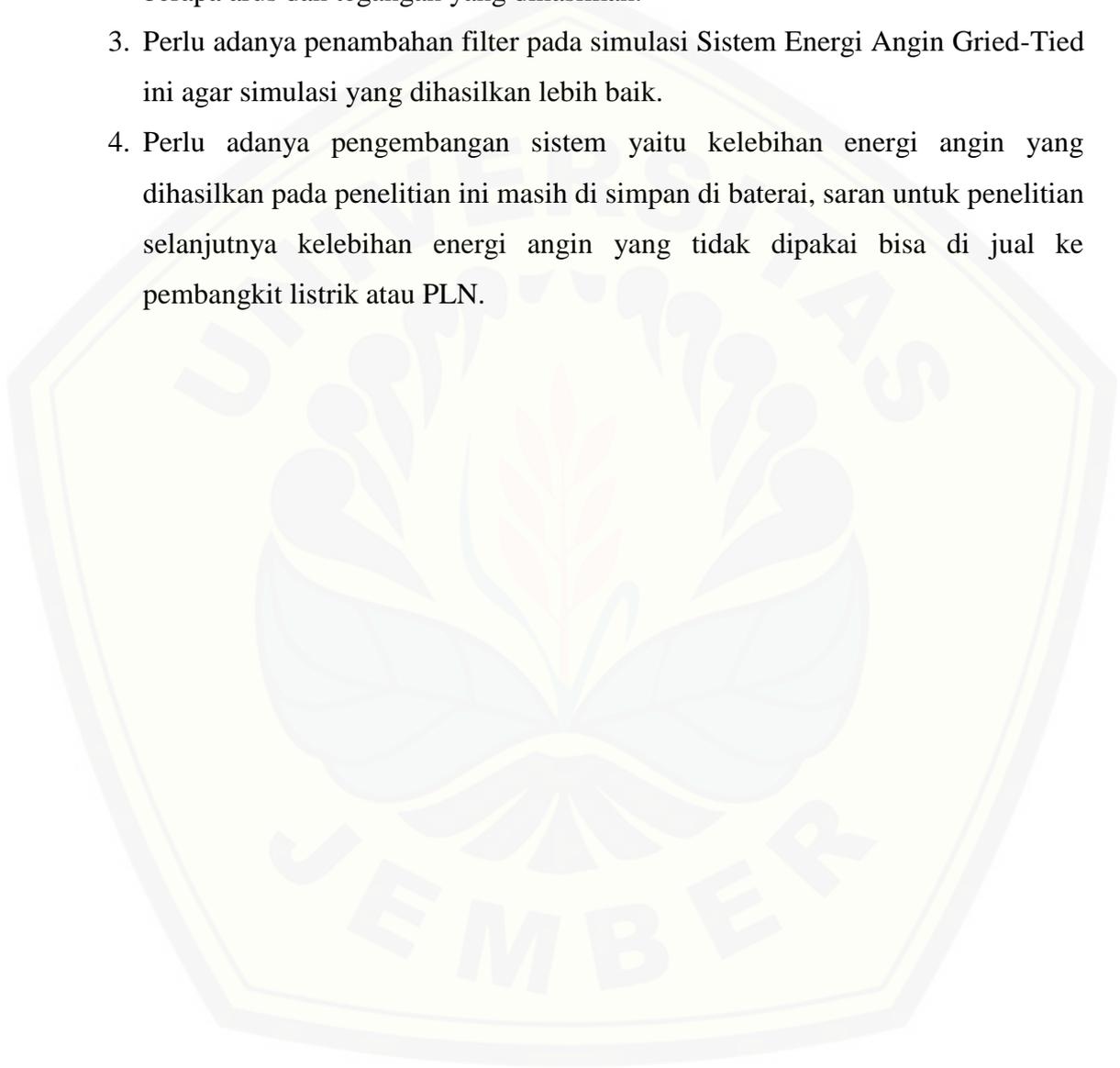
5.2 Saran

Adapun saran yang dapat dilakukan guna memperbaiki hasil setelah penelitian ini antara lain :

1. Sistem Energi Angin *Grid-Tied* merupakan salah satu solusi untuk mengatur *smart switch AC Grid* dalam penelitian ini masih menggunakan pemodelan

sistem di Matlab. Berdasarkan parameter - parameter yang telah disimulasikan maka penelitian ini dapat dilanjutkan dengan mengaplikasikannya pada peralatan – peralatan yang tersedia di laboratorium.

2. Diperlukan pemodelan *AC Grid* yang lebih sesuai sehingga bisa mengontrol berapa arus dan tegangan yang dihasilkan.
3. Perlu adanya penambahan filter pada simulasi Sistem Energi Angin Gried-Tied ini agar simulasi yang dihasilkan lebih baik.
4. Perlu adanya pengembangan sistem yaitu kelebihan energi angin yang dihasilkan pada penelitian ini masih di simpan di baterai, saran untuk penelitian selanjutnya kelebihan energi angin yang tidak dipakai bisa di jual ke pembangkit listrik atau PLN.



DAFTAR PUSTAKA

- Armaditya. 2012. “*Maximum Power Point Tracking (MPPT) Pada Variable Speed Wind Turbine (VSWT) Dengan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) menggunakan Switch Mode Rectifier (SMR).*” *Jurnal TEKNIK POMIT*. Vol. 1, No. 1, (2012) 1-6
- Kusumadewi, Sri. 2002, Analisis dan Desain Sistem *Fuzzy* Menggunakan Toolbox Matlab, Yogyakarta, Graha Ilmu.
- Kuswadi S., 2007. *Kendali Cerdas : Teori dan Aplikasi Praktisnya*. Yogyakarta: Andi Yogyakarta.
- Mushthafa, Dzulfiqar Rais. 2011. Optimasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan *Maximum Power Point Tracker (MPPT)* dengan Metode *Gradient Approximation*”. Tidak Diterbitkan. Skripsi. Surabaya: Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh November.
- Mathew, Sathyajith. *Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. India: Springer.
- Prawidyasari, Destiany. 2014. “Pengendali Sistem Pembangkit Listrik Hibrida Tenaga Angin – PMSG dengan *Fuel Cell* Menggunakan *Fuzzy Logic Controller*.” Tidak Diterbitkan. Skripsi. Jember: Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember.
- Sujono. 2012. Dasar-dasar Fuzzy Logic. Universitas Budi Luhur. <http://staff.budiluhur.ac.id/sujono/files/2012/09/Bab-2.pdf>. Diakses pada 29 Oktober 2014.
- Widiyanto, Parmaputra. 2014. “Sistem Energi Surya Fotovoltaik (SESF) Grid-Tied Dengan Menggunakan Fuzzy Logic Controller”. Tidak Diterbitkan. Skripsi. Jember: Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember. http://id.wikipedia.org/wiki/Turbin_Angin. Diakses pada 29 Oktober 2014. <http://id.wikipedia.org/Wiki/Angin>. Diakses pada 29 Oktober 2014.

DAFTAR LAMPIRAN

A. Data Kecepatan Angin Bulan Maret 2014 (Musim Penghujan)

Koordinat Lokasi	Tanggal	Waktu	Kecepatan Angin	Temperatur
58°25,4'88" E 113°33,7'6"	18-03-2014	08.00	4.5	35.50
		09.00	5	36.10
		10.00	4.5	34.70
		11.00	5.5	34.90
		12.00	6.9	33.60
		13.00	6.9	32.90
		14.00	6.4	33.10
		15.00	5	31.80
		16.00	4.2	30.70
		17.00	3.6	28.80
		18.00	3.4	28.10
19.00	3.6	27.30		
Koordinat Lokasi	Tanggal	Waktu	Kecepatan Angin	Temperatur
58°25,4'88" E 113°33,7'6"	19-03-2014	20.00	3.1	26.10
		21.00	2.5	25.50
		22.00	2.5	25.30
		23.00	2	23.10
		00.00	2.5	25.70
		01.00	2	24.90
		02.00	2.1	26.40
		03.00	2.1	26.10
		04.00	2.4	25.70
		05.00	2.6	28.10
		06.00	2.8	31.40
07.00	3.7	33.90		
Rata-rata			3.72	29.57

Sumber : Prawidyasari, Destiany. 2014. "Pengendali Sistem Pembangkit Listrik Hibrida Tenaga Angin – PMSG dengan *Fuel Cell* Menggunakan *Fuzzy Logic Controller*." Skripsi. Jember: Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember.

B. Data Rule Fuzzy

1. If (SOC Baterai is 10 %) and (Arus Angin is 25 A) and (Arus Beban is 60 A) then (Switching is ON)
2. If (SOC Baterai is 25 %) and (Arus Angin is 10 A) and (Arus Beban is 5 A) then (Switching is OFF)
3. If (SOC Baterai is 40 %) and (Arus Angin is 5A) and (Arus Beban is 50 A) then (Switching is ON)
4. If (SOC Baterai is 50 %) and (Arus Angin is 30 A) and (Arus Beban is 100 A) then (Switching is OFF)
5. If (SOC Baterai is 75 %) and (Arus Angin is 40 A) and (Arus Beban is 120 A) then (Switching is OFF)

