

**ANALISIS PEMBANGKIT HIBRID ENERGI TERBARUKAN
UNTUK EDUKASI**

*ANALYSIS ON RENEWABLE ENERGY HYBRID GENERATOR
FOR EDUCATION*

MAHYUDDIN



**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2013**

**ANALISIS PEMBANGKIT HIBRID ENERGI TERBARUKAN
UNTUK EDUKASI**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi

Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

MAHYUDDIN

Kepada

**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2013

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Mahyuddin
Nomor Mahasiswa : P2700211417
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 25 Juli 2013

Yang menyatakan

Mahyuddin

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur senantiasa kita panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan Rahmat dan Hidayah-Nya sehingga Tesis ini dapat diselesaikan dengan segala kesederhanaannya.

Shalawat dan salam senantiasa tercurah atas diri Rasulullah *Shallallahu 'alaihi Wasallam*, keluarga beliau, para sahabat dan orang-orang yang senantiasa beriman sampai akhir zaman nanti.

Tesis yang berjudul "*Analisis Pembangkit Hibrid Energi Terbarukan untuk Edukasi*" ini diajukan sebagai salah satu syarat guna memperoleh gelar Magister Teknik pada Jurusan Teknik Elektro Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin.

Tesis ini disusun berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dan penulis menyadari bahwa penelitian ini dapat terselesaikan atas bantuan berbagai pihak. Olehnya itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Prof. Dr. Ir. H. Nadjamuddin Harun, MS dan Dr-Ing. Faizal Arya Samman, ST.,MT selaku pembimbing dalam penyusunan tesis ini. Ucapan terima kasih juga penulis haturkan kepada komisi penguji, yaitu Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Tola, M.Eng, Dr. Ir. Zahir Zainuddin, M.Sc, Dr. Ir. H. Ansar Suyuti, MT atas masukan yang diberikan dalam rangka penyempurnaan penelitian ini, dan kepada seluruh dosen yang telah memberikan ilmunya kepada penulis.

Ucapan terima kasih juga penulis haturkan kepada Bapak Rektor Universitas Hasanuddin, Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro PPs Universitas Hasanuddin, dan seluruh staf dan pegawai Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin.

Ucapan terima kasih tak lupa pula penulis sampaikan kepada seluruh teman-teman mahasiswa program studi Teknik ELEktro atas semua bantuan dan dukungannya. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada kedua orang tua, kakak dan adik-adikku atas doa dan dukungannya yang tak pernah putus. Yang terkhusus juga penulis menyampaikan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada Sri Wahyuni Nur, S.Pd yang senantiasa selalu memberikan dorongan dan semangat baik suka dan duka.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih perlu permbenahan. Oleh karena itu, kritik dan saran senantiasa penulis harapkan sebagai masukan demi penyempurnaan tesis ini. Semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca terkhusus bagi penulis. Amin

Makassar, Juli 2013

Mahyuddin

ABSTRAK

MAHYUDDIN. *Analisis Pembangkit Hibrid Energi Terbarukan untuk Edukasi* (dibimbing oleh Nadjamuddin Harun dan Faizal Arya Samman).

Penelitian ini bertujuan mengetahui kinerja sistem hibrid antara fotovoltaik, genset, dan baterai, serta unit-unit sistem sehingga dapat bekerja sebagai sebuah sistem yang terpadu dalam menghasilkan daya listrik.

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif dengan pendekatan simulasi. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Konversi Energi Jurusan Teknik Elektro, Universitas Hasanuddin. Parameter-parameter simulasi diperoleh melalui dokumentasi data fotovoltaik, genset dan baterai serta intensitas radiasi matahari. Kemudian, diinput ke dalam program simulasi Matlab Simulink yang telah dibuat. Parameter model simulasi yang dibuat disesuaikan dengan karakteristik komponen-komponen unit dari pembangkit yang ada di Laboratorium.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa bila daya fotovoltaik dan baterai masih mampu melayani beban, maka genset akan berhenti (*off*) atau sebaliknya. Besarnya daya yang dihasilkan oleh fotovoltaik adalah 110.17 Watt pada radiasi matahari 0.88 kW/m^2 , sedangkan besar daya genset 98,08 Watt pada putaran 350 rad/sec. Pada jam ke 31.78 dan 55.79 serta jam ke 67.70 sampai 70.04 dari 72 jam yang disimulasikan, terjadi kekurangan pasokan daya dari sumber. Hal ini dapat diatasi dengan menggunakan baterai yang lebih besar.

Kata kunci: pembangkit, hibrid, energi terbarukan, edukasi

ABSTRACT

MAHYUDDIN. *Analysis on Renewable Energy Hybrid Generator for Education* (Supervised by Nadjamuddin Harun and Faizal Arya Samman).

The research is aimed to investigate the hybrid system performance between photovoltaic, genset and battery as well as the system units, so that they could function as an integrated system in generating the electric power.

This was a descriptive research with simulation approach. The research was carried out in the Conversion Energy Laboratory, Electrical Engineering Department, Hasanuddin University. Simulation parameters were obtained through data documentation of the photovoltaic, genset, battery and Solar radiation intensity, they were inputted into Simulink Matlab simulation program that had been created. The simulation model parameters created were adjusted with the unit component characteristics of the existing generator in the Laboratory.

The results obtained from the simulation indicates that if the photovoltaic and battery power can still serve the load, the genset will be "off" or vice versa. The power magnitude generated by photovoltaic is 110.17 Watts at 0.88 kW/m² solar radiation, whereas the power magnitude of the genset is 98.08 Watts on the lap of 350 rad/sec. At 31.78 and 55.79 hours and 67.70 hours until 70.04 hours of 72 hours simulated, the power supply decrease occurs from the generator. This can be overcome by using a larger battery.

Key-words: power generator , hybrid, renewable energy, education

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	vi
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR SINGKATAN	xvii
I. PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. <i>State of the Arts</i> Sistem Pembangkit Tenaga Hibrid	3
C. Rumusan Masalah	3
D. Tujuan Penelitian	4
E. Ruang Lingkup dan Batasan Masalah	4
F. Manfaat Penelitian	5
II. LANDASAN TEORI	
A. Sistem Pembangkit Tenaga Hibrid	6
B. Pembangkit Listrik Tenaga Surya Fotovoltaik	15
C. Media Penyimpan Energi (Baterai)	21
D. Sistem Pembangkit Tenaga Diesel	25

E. Beban	31
F. Sistem Kontrol	32
G. <i>Power Management Strategies</i> (PMSs)	34
H. Edukasi (Pendidikan)	37
I. Kerangka Pikir	39
III. METODE PENELITIAN	
A. Jenis Penelitian	40
B. Waktu dan Lokasi Penelitian	40
C. Metode Pengumpulan Data	40
D. Instrumen Penelitian	41
E. Rancangan Penelitian	41
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
A. Hasil Simulasi	48
B. Pembahasan	68
V. KESIMPULAN DAN SARAN	
C. Kesimpulan	71
D. Saran	71
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Spesifikasi modul PV yang ada di Laboratorium	43
Tabel 3.2 Spesifikasi Genset yang ada di Laboratorium.	44
Tabel 3.3 Spesifikasi Baterei yang ada di Laboratorium	44
Tabel 4.1 Radiasi matahari perjam untuk kota Makassar	58

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Sistem pembangkit hibrid kopling AC terpusat (<i>Centralized AC-coupled Hib Power Systems</i>)	8
Gambar 2.2 Sistem pembangkit hibrid kopling AC didistribusikan (<i>Distributed AC-coupled Hibrid Power Systems</i>).	9
Gambar 2.3 Sistem Pembangkit Hibrid Kopling DC	10
Gambar 2.4 Sistem pembangkit Hibrid Kopling Ganda	11
Gambar 2.5 Sistem pembangkit hibrid konfigurasi seri	12
Gambar 2.6 Sistem pembangkit hibrid konfigurasi parallel	14
Gambar 2.7 (a) Cell photovoltaik, (b) Modul photovoltaik	16
Gambar 2.8 Rangkaian ekivalen sederhana dari sel fotovoltaik	16
Gambar 2.9 Model rangkaian ekivalen seri-paralel sel fotovoltaik	18
Gambar 2.10 Karakteristik I – V dan P – V PV-modul	20
Gambar 2.11 Rangkaian ekivalen baterai <i>Lead-Acid</i>	23
Gambar 2.12 Blok diagram sistem PLTD	25
Gambar 2.13 (a) Skema model kontrol umpan balik mesin diesel, (b) Struktur detail model Mesin Linier	29
Gambar 2.14 Model generator DC magnet permanen	30
Gambar 2.15 Rangkaian Kelistrikan Hibrid PV, Genset dan Baterei	35
Gambar 2.16 Kerangka Pikir	39

Gambar 3.1	Model Konfigurasi DC sistem hibrid yang dilaksanakan	42
Gambar 3.2	Algoritma proses <i>charge</i> dan <i>discharge</i> baterai	45
Gambar 3.3	Algoritma proses <i>On-Off</i> Genset	47
Gambar 4.1	Model Matlab Simulink modul PV	48
Gambar 4.2	Kurva karakteristik I – V modul PV, (a) pada temperatur 25 °C dan radiasi matahari sebesar 1 kW/m ² , (b) pada temperatur 25 °C dan radiasi matahari sebesar 0.8 kW/m ²	49
Gambar 4.3	Kurva karakteristik P – V modul PV, (a) pada temperatur 25 °C dan radiasi matahari sebesar 1 kW/m ² , (b) pada temperatur 25 °C dan radiasi matahari sebesar 0.8 kW/m ²	50
Gambar 4.4	(a) Model Matlab Simulink Genset. (b) Model detail Matlab Simulink Genset	51
Gambar 4.5	Profil Arus genset, (a) pada kecepatan 350 rad/sec, (b) kecepatan 150 rad/sec	52
Gambar 4.6	Profil Tegangan yang dibangkitkan oleh genset, (a) pada kecepatan 350 rad/sec, (b) kecepatan 150 rad/sec	53
Gambar 4.7	Profil Daya yang dibangkitkan oleh genset, (a) pada kecepatan 350 rad/sec, (b) kecepatan 150 rad/sec	53
Gambar 4.8	(a) Model Matlab Simulink Baterai, (b) Model detail Matlab Simulink Baterai	54
Gambar 4.9	(a) Blok simulasi daya beban, (b) detail simulasi daya beban	55
Gambar 4.10	Kurva Beban Selama tiga hari (72 Jam)	55
Gambar 4.11	(a) Model Kontrol baterai dan genset, (b) detail kontrol baterai dan genset	56

Gambar 4.12	Model simulasi Matlab Simulink Hibrid PV, Genset dan Baterai	57
Gambar 4.13	Grafik intensitas radiasi matahari perjam selama 72 jam	59
Gambar 4.14	(a) Profil Daya PV dan Genset, (b) Profil Daya yang tersimpan ke Baterai dan Daya yang dipasok dari Baterai ke beban pada kapasitas baterai 40 Ah	60
Gambar 4.15	(a) Profil Daya Beban, (b) Profil Daya Sumber (PV, Genset, dan Baterai) pada kapasitas baterai 40 Ah	61
Gambar 4.16	(a) Profil Daya Beban dan Daya Sumber (PV, Genset, dan Baterai) , (b) Profil Rugi-rugi Daya pada kapasitas baterai 40 Ah	62
Gambar 4.17.	(a) Profil Tegangan Baterai, (b) Profil Arus Baterai dan (c) Profil Energi Baterai pada kapasitas baterai 40 Ah	63
Gambar 4.18.	(a) Profil Daya PV dan Genset, (b) Profil Daya yang tersimpan ke Baterai dan Daya yang dipasok dari Baterai ke Beban pada kapasitas baterai 80 Ah	64
Gambar 4.19.	Profil Daya Beban, (b) Profil Daya Sumber (PV, Genset dan Baterai pada kapasitas baterai 80 Ah	65
Gambar 4.20.	(a) Profil Daya Beban dan Daya Sumber (PV, Genset dan Baterai) , (b) Profil Rugi-rugi Daya pada kapasitas baterai 80 Ah	66
Gambar 4.21.	Profil Tegangan Baterai, (b) Profil Arus Baterai, (c) Profil Energi Baterai pada kapasitas baterai 80 Ah	67

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1.2 Model simulasi Matlab Simulink PV, Genset, Baterai, kontrol Baterai dan control genset	76
Lampiran 2.1 Data hasil simulasi dengan menggunakan baterai yang berkapasitas 40 Ah	88
Lampiran 2.2 Data hasil simulasi dengan menggunakan baterai yang berkapasitas 80 Ah	111

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang / Singkatan	Arti dan Keterangan
A	Ampere
AC	<i>Alternating Current</i> /Arus bolak-balik
BB	<i>Batery Bank</i>
°C	Satuan Temperatur dalam derajat Celcius
DC	<i>Direct Current</i> /Arus DC
DG	<i>Diesel Generator</i>
DOA	<i>Day of Autonomous</i>
DOD	<i>Depth of Discharge</i>
EESG	<i>Electrically Exited Synchronous Generator</i>
K	Satuan Temperatur dalam Kelvin
MF	<i>Maintenance Free</i> / cenderung tidak ada perawatannya
PMSG	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>
PMSs	<i>Power Management Strategies</i>
PLTD	Pembangkit Listrik Tenaga Diesel
PLTS	Pembangkit Listrik Tenaga Surya
PV	Fotovoltaik
SOC	<i>State of Charge</i>
V	Voltage/Tegangan

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan dasar masyarakat dimanapun. Baik di negara berkembang seperti Indonesia, maupun negara-negara maju. Kebutuhan energi listrik di dunia dari tahun ke tahun semakin meningkat seiring dengan perkembangan peradaban manusia. Sementara itu, suplai energi listrik yang bersumber dari minyak bumi, gas bumi, dan batu bara memiliki beberapa keterbatasan, antara lain tidak dapat terbaharukan, pencemaran, dan kerusakan lingkungan yang dihasilkan ketiga sumber energi ini dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Pada sisi lain, energi listrik dari sumber terbarukan, seperti tenaga surya, panas bumi, angin, biomassa, arus laut, hingga ombak belum dapat dimanfaatkan secara maksimal.

Indonesia khususnya di Sulawesi Selatan merupakan daerah yang sumber-sumber energi terbarukan seperti di atas sangat melimpah. Indonesia merupakan daerah tropis, sehingga penyinaran matahari sepanjang tahun dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Energi yang dihasilkan PLTS tersebut pada umumnya digunakan untuk keperluan penerangan dan komunikasi. Beberapa diantaranya merupakan sebuah sistem hibrid yang menggabungkan pembangkit listrik konvensional seperti PLTS dengan genset yang dilengkapi dengan media penyimpan energi.

Pemerintah dalam hal ini PT. PLN berharap masyarakat dapat mengelola pengoperasian sistem kelistrikan tersebut. Oleh karena itu semestinya pengembangan pemanfaatannya harus dilakukan baik dalam bentuk riset seperti keperluan untuk pendidikan dan pelatihan kepada mahasiswa dan masyarakat di laboratorium maupun terapannya berupa teknologi tepat guna yang langsung dapat dimanfaatkan oleh masyarakat. Namun, pengalaman selama ini menunjukkan bahwa program kelistrikan yang dikelola oleh masyarakat banyak mengalami kegagalan karena kurangnya pengetahuan dasar masyarakat terhadap sistem kelistrikan yang berbasis energi terbarukan baik dalam pengoperasian maupun dalam hal pemeliharaan. Untuk itu dibutuhkan suatu model pelatihan kepada masyarakat tentang optimalisasi daya yang dibangkitkan antara pembangkit listrik dari sumber energi terbarukan khususnya PLTS dan pembangkit listrik konvensional seperti genset dalam menghasilkan daya listrik sebagai sebuah sistem yang terpadu..

Berdasarkan dasar tersebut di atas, penulis melakukan penelitian dalam rangka penyelesaian studi pada Program Studi Teknik Energi Listrik Jurusan Teknik Elektro Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin melalui kajian "**Analisis Pembangkit Hibrid Energi terbarukan untuk Edukasi**" dengan menggunakan program simulasi Matlab Simulink.

B. State of the Arts Sistem Pembangkit Tenaga Hibrid

Sumber-sumber energi terbarukan untuk pembangkit listrik tenaga hibrid telah banyak diteliti oleh para peneliti antara lain yang dilakukan oleh Aryunto dkk pada tahun 2011 dengan judul "Pemodelan Sistem Pembangkit Listrik Hibrid Angin dan Surya. Penelitian ini hanya membahas tentang pemodelan *charger* dan *discharger* pada baterai yang digunakan untuk menyuplai beban.

Pada tahun 2009, Nazih Moubayed melakukan penelitian dengan judul "*Control of an Hybrid Solar-Wind System with Acid Battery for Storage*". Penelitian ini juga membahas tentang hibrid antara fotovoltaik dengan menggunakan simulasi Matlab Simulink.

Pada tahun 2006, R.C. Bansal melakukan penelitian dengan judul "*Automatic Reactive-Power Control of Isolated Wind-Diesel Hybrid Power Systems*". Penelitian ini membahas tentang kontrol otomatis daya reaktif pada sistem pembangkit hibrid angin-diesel terisolasi, dimana pada pembangkit energi angin menggunakan generator induksi, sedangkan pada genset menggunakan generator sinkron.

C. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan di atas, maka dalam penelitian ini masalah pokok yang akan menjadi fokus perhatian adalah bagaimana mensimulasikan sistem dan unit-unit sistem sehingga

dapat bekerja sebagai sebuah sistem yang terpadu dalam menghasilkan daya listrik?

D. Tujuan Penelitian

Dengan mengacu pada perumusan masalah sebagaimana tersebut di atas, maka tujuan penelitian ini adalah untuk membuat simulasi sistem hibrid energi terbarukan, khususnya PV, genset dan baterai serta unit-unit sistem, dapat bekerja sebagai sebuah sistem yang terpadu dalam menghasilkan daya listrik.

E. Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

Mengingat bahwa pembangkit hibrid energi terbarukan sangat banyak dan kompleks, maka dilakukan pembatasan yaitu hanya membahas tentang Pembangkit Listrik Energi Terbarukan antara pembangkit listrik tenaga surya PV dengan pembangkit listrik tenaga diesel dengan batasan sebagai berikut :

1. Yang menjadi objek hibrid PV-genset dan baterai ini adalah cara kerja sistem kontrolnya, apakah PV-genset bekerja paralel atau kerja sendiri-sendiri yang berdasarkan dengan permintaan beban.
2. Pemodelan dan simulasi PV-genset-baterai dengan menggunakan *software* Matlab Simulink digunakan untuk melihat respon dari konfigurasi ini.
3. Generator yang digunakan adalah generator DC magnet permanen.

F. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi peserta didik dan masyarakat umum tentang pembangkitan energi terbarukan serta menjadi dasar pengembangan aplikasi langsung dalam pembuatan prototipe sistem kontrol pembangkit hibrid antara modul PV dan genset yang ada di Laboratorium Teknik Energi Jurusan Teknik Elektro Universitas Hasanuddin.

BAB II

LANDASAN TEORI

A. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid

Sistem pembangkit Listrik Tenaga Hibrid adalah suatu sistem pembangkit listrik dengan menggunakan beberapa sumber energi yang berbeda. C.V Nayar dan S.J.Phillips mengatakan bahwa Pembangkit listrik sistem hibrid adalah suatu sistem pembangkit yang menggabungkan beberapa unit pembangkit yang memiliki sumber energi yang berbeda.

Menggabungkan sistem hibrid dengan sistem baterai penyimpanan adalah untuk meningkatkan jangka waktu pasokan energi dan akan memanfaatkan secara optimal sumber daya energi terbarukan yang tersedia dan pada gilirannya dapat menjamin keandalan pasokan energi. Untuk menghadapi kondisi cuaca yang tidak menentu dan untuk membuat sistem pasokan energi pada beban dalam kondisi terburuk, strategi ini membutuhkan kapasitas penyimpanan energi yang besar dan karena itu biayanya sangat mahal. Hal ini dapat diatasi dengan cara hanya memasok energi dari baterai ketika permintaan selama periode cuaca berawan dan cadangan pasokan yang lain (biasanya diesel generator), meskipun hal ini menurunkan proporsi energi terbarukan yang digunakan. Memilih ukuran penyimpanan energi sedemikian rupa adalah untuk meminimalkan waktu diesel berjalan dan untuk memaksimalkan penghematan bahan bakar.

Pada sistem hibrid antara PV-diesel, sumber energi matahari PV dengan pembangkit diesel dirancang untuk pengoptimasian sistem diesel guna memenuhi kebutuhan beban yang bervariasi, untuk mengatasi kelemahan-kelemahan PV, untuk mengantisipasi ketidakpastian cuaca serta mengisi kebutuhan beban puncak yang berlangsung singkat. Dengan demikian kontinuitas penyaluran energi listrik menjadi lebih andal dibanding dengan beberapa sistem pembangkit tunggal.

A.1. Konfigurasi Sistem Hibrid

Model konfigurasi sistem hibrid akan menentukan jumlah komponen sistem yang digunakan, daya keluaran pembangkit, sistem kontrol yang akan diterapkan pada sistem, kebutuhan beban sehingga dapat menentukan biaya investasi dan kinerja sistem.

A.1.1. Konfigurasi sistem hibrid berdasarkan tegangan sistem

Secara umum ada tiga teknik konfigurasi sistem pembangkit hibrid berdasarkan tegangannya (L.E. Weldemariam, 2010), yaitu :

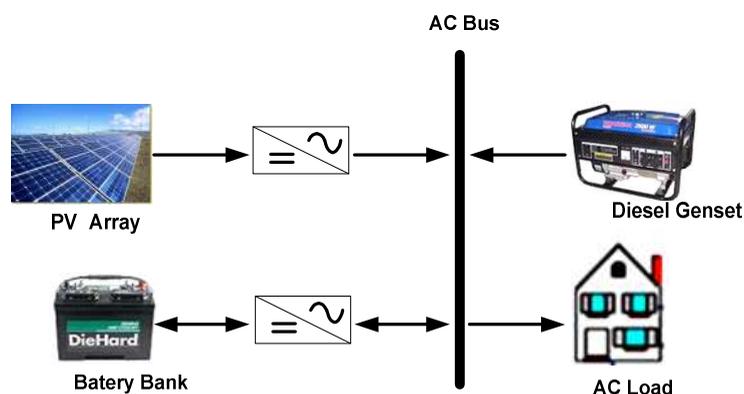
- a. Sistem pembangkit hibrid kopling AC
- b. Sistem pembangkit hibrid kopling DC
- c. Sistem pembangkit hibrid kopling ganda (AC dan DC)

A.1.1.1. Sistem pembangkit hibrid kopling AC

Sistem pembangkit hibrid ini dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu sistem pembangkit hibrid kopling AC terpusat (*Centralized AC-coupled Hybrid*

Power Systems) dan sistem pembangkit hibrid kopling AC didistribusikan (*Distributed AC-coupled Hybrid Power Systems*).

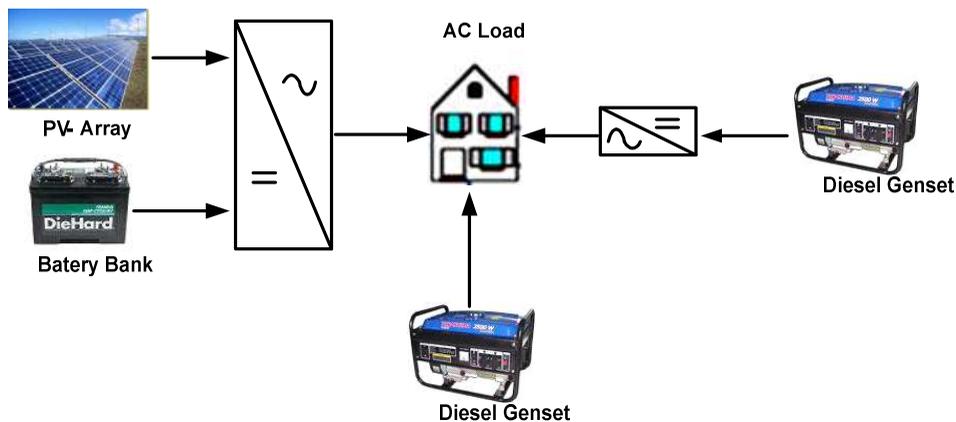
Dikatakan terpusat pada sistem pembangkit hibrid kopling AC terpusat karena semua sistem konversi energi terhubung ke bus AC utama sebelum terhubung ke beban. Konfigurasi ini dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 2.1. Sistem pembangkit hibrid kopling AC terpusat (*Centralized AC-coupled Hybrid Power Systems*)

Generator diesel menghasilkan tegangan AC, sehingga dapat dihubungkan langsung ke bus AC utama. PV-array menghasilkan tegangan DC sehingga harus melalui inverter sebelum digabungkan ke bus AC utama. Pengisian dan pemakaian energi beterei dengan arus DC harus menggunakan inverter dua arah.

Pada sistem pembangkit hibrid kopling AC didistribusikan, masing-masing pembangkit melayani masing-masing beban sehingga tidak menggunakan bus AC utama. Konfigurasi ini dapat digambarkan sebagai berikut.

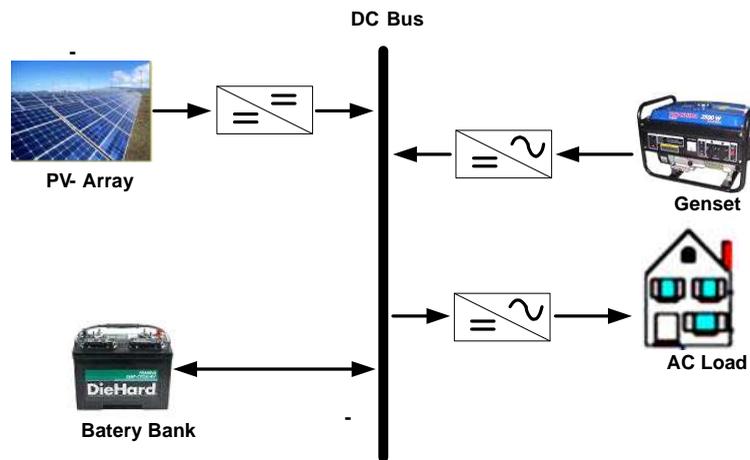


Gambar 2.2. Sistem pembangkit hibrid kopling AC terdistribusikan (*Distributed AC-coupled Hybrid Power Systems*).

Dalam konfigurasi ini, sumber daya tidak perlu dihubungkan ke suatu bus AC utama. Kelebihan dari sistem ini yaitu pembangkitnya dapat dipasang sesuai dengan lokasi sumber dimana sumber energi primernya tersedia seperti radiasi matahari yang cukup. Namun ada juga kelemahan pada konfigurasi ini yaitu sistem pengendaliannya relatif sulit.

A.1.1.2. Sistem pembangkit hibrid kopling DC

Dalam sistem pembangkit hibrid kopling DC semua sistem konversi energinya akan terhubung ke bus DC utama sebelum terhubung ke beban. Pada sistem konfigurasi ini, koneksi beban AC harus melalui inverter. Konfigurasi ini juga disebut konfigurasi terpusat DC. Konfigurasi ini dapat digambarkan sebagai berikut.

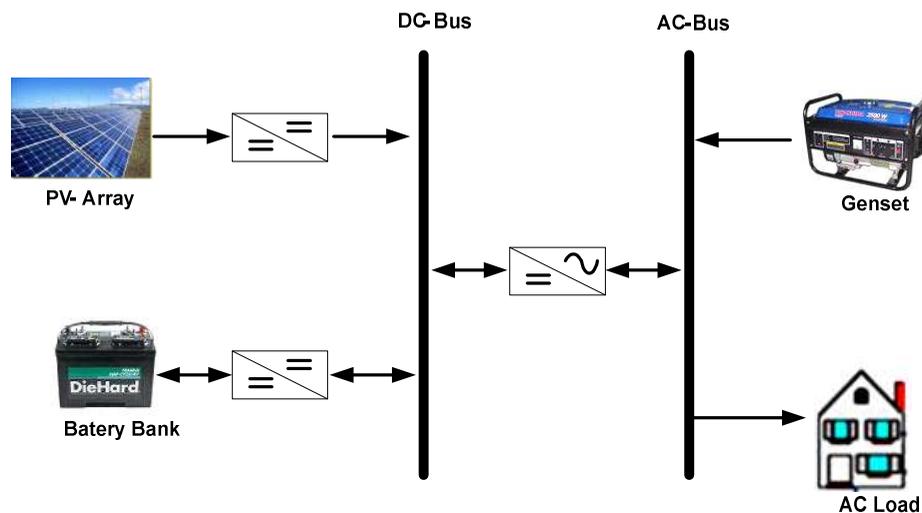


Gambar 2.3. Sistem Pembangkit Hibrid Kopling DC

Karena sumber energi yang terhubung pada bus DC utama, maka generator diesel memerlukan converter AC-DC sebelum terhubung ke bus utama dan beban AC terhubung ke bus utama melalui inverter.

A.1.1.3. Sistem pembangkit hibrid kopling ganda

Sistem pembangkit hibrid kopling ganda yaitu sistem yang menggabungkan antara kopling AC dan kopling DC. Sistem konfigurasi ini, pembangkit energi terbarukan misalnya PV terhubung ke baterai melalui bus DC dan yang lainnya seperti genset terhubung ke bus AC. Gambar 2.4 menunjukkan konfigurasi sistem pembangkit hibrid tipe ganda atau campuran.



Gambar 2.4. Sistem pembangkit hibrid kopling ganda.

Sistem pembangkit hibrid kopling AC mempunyai keuntungan bila dibandingkan dengan kopling DC. Pada kopling AC desainya sangat sederhana sehingga dapat mengurangi biaya investasi, kompatibilitas atau sesuai dengan jaringan yang ada, lebih handal dalam memasok daya listrik. Pada kopling DC biayanya lebih besar dalam investasinya karena membutuhkan lebih banyak komponen, serta pemeliharaannya yang rumit.

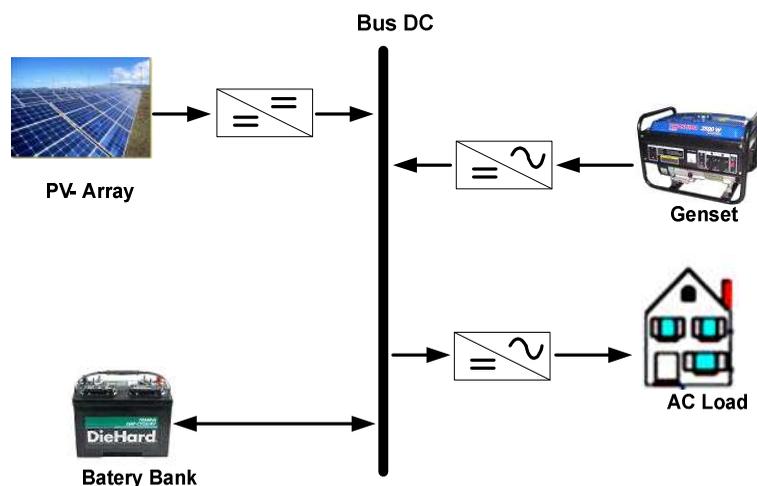
A.1.2. Konfigurasi sistem hibrid berdasarkan cara penyuplaian beban

Berdasarkan cara beban disuplai dari pembangkit energi terbarukan dan generator diesel, Konfigurasi sistem pembangkit hibrid dapat digolongkan menjadi dua (L. E. Weldemariam, 2010), yaitu:

- a. Sistem hibrid konfigurasi seri
- b. Sistem hibrid konfigurasi paralel.

A.1.2.1. Sistem hibrid konfigurasi seri

Dalam skema sistem pembangkit hibrid, semua daya DC dimasukkan ke dalam baterai. Dengan demikian daya yang dihasilkan oleh generator diesel dan PV digunakan untuk mengisi sebuah baterai sebelum disalurkan ke beban. Oleh karena itu setiap komponen harus dilengkapi dengan peubah tegangan yang sesuai dengan tegangan pada baterai. Kemudian, inverter akan merubah daya DC yang disimpan dalam baterai menjadi daya AC dengan tegangan dan frekuensi yang sama pada beban AC. Pada sistem ini harus menggunakan regulator yang digunakan untuk mencegah terjadinya pengisian (*charger*) pada baterai yang berlebihan dari PV dan generator ketika daya melebihi permintaan beban. Dalam hal yang sama pula, regulator ini akan melindungi baterai dari pengosongan (*discharger*) ketika permintaan melebihi pasokan. Gambar 2.5 menunjukkan sistem pembangkit hibrid konfigurasi seri.



Gambar 2.5. Sistem pembangkit hibrid konfigurasi seri.

Jenis konfigurasi ini juga disebut sebagai bus DC terpusat dalam artian bahwa semua pembangkit energi dan baterai terhubung pada bus DC dan beban AC disuplai pada satu titik. Pada konfigurasi ini daya AC dari generator diesel harus diubah menjadi DC oleh converter AC/DC (*rectifier*) sebelum daya disalurkan ke bus DC dimana baterai tersambung. Konfigurasi ini relatif sederhana, namun pada konfigurasi ini mempunyai kekurangan (L.E. Weldemariam, 2010):

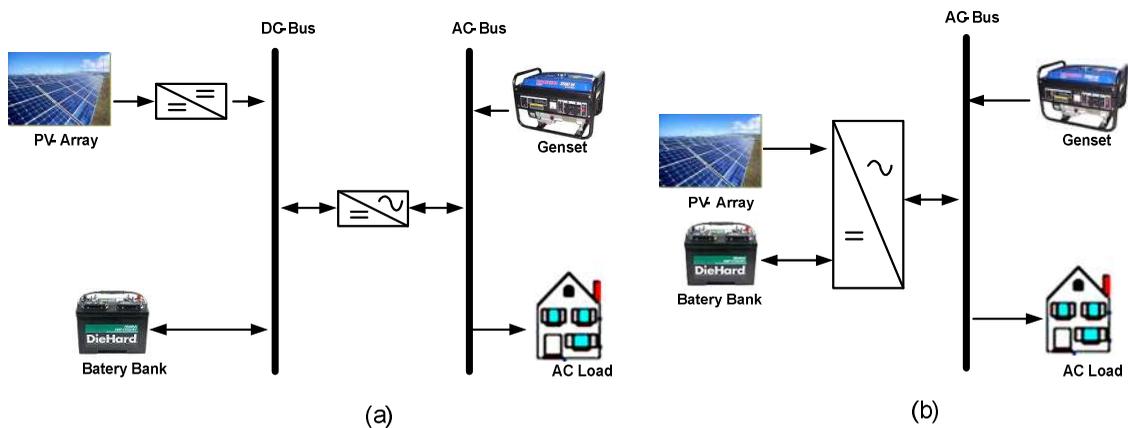
- a. Karena sebagian besar energi melewati baterai, sehingga dapat mengurangi efisiensi sistem.
- b. Membutuhkan ukuran baterai yang besar untuk mengatasi besarnya batasan daya yang disuplai dari generator diesel sehingga biaya pengadaan baterai juga tinggi.
- c. Sebagian besar sistem yang ada dapat beroperasi pada tegangan antara 24V dan 120V, sehingga tidak mungkin menggunakan komponen yang standar dan setiap solusi harus direkayasa secara individual sehingga dapat meningkatkan biaya pada sistem.

A.1.2.2. Sistem hibrid konfigurasi paralel

Sistem hibrid konfigurasi paralel seperti yang terlihat pada gambar 2.6, generator diesel dan pembangkit sumber energi terbarukan memasok langsung dari beban. Ada dua jenis sub-konfigurasi dari sistem hibrid ini, yaitu kopling DC dan kopling AC.

Sistem konfigurasi hibrid parallel kopling DC yang ditunjukkan pada gambar 2.6 (a). Pada konfigurasi menggunakan inverter dua arah (*bi-*

directional) yang dioperasikan secara paralel dengan generator diesel dan dapat berfungsi sebagai inverter dan rectifier (sebagai pengisi baterai). Sistem konfigurasi hibrid kopling DC ini, dimana pembangkit sumber energi terbarukan terhubung ke bus DC bersama dengan baterai untuk memasok daya AC melalui inverter *bi-directional*.



Gambar 2.6. Sistem pembangkit hibrid konfigurasi paralel. (a) Konfigurasi kopling DC, (b) Konfigurasi kopling AC

Sistem konfigurasi hibrid paralel kopling AC dapat ditingkatkan dengan menghubungkan semua pembangkit ke bus AC seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6 (b). Beban dapat dipasok dari sumber energi terbarukan yang paralel dengan generator diesel. Disini sebuah inverter *bi-directional* akan digunakan sehingga baterai dapat memasok dan mengisi sesuai dengan kebutuhan beban dan status dari sumber energi lainnya. Daya DC diperoleh dari sistem PV-array dan beterei sehingga harus dikonversi ke AC sebelum dimasukkan ke bus AC. Jenis konfigurasi ini juga disebut sebagai konfigurasi AC terpusat dalam artian bahwa pembangkit energi terhubung pada bus AC dan beban disuplai pada satu titik.

B. Pembangkit Listrik Tenaga Surya Fotovoltaik (PV)

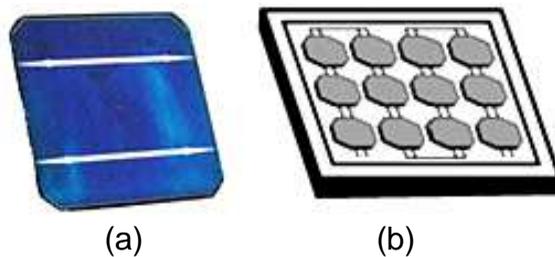
Pembangkit listrik tenaga surya itu konsepnya sederhana, yaitu mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Cahaya matahari merupakan salah satu bentuk energi dari sumber daya alam. Sel surya ini dapat menghasilkan energi listrik dalam jumlah yang tidak terbatas langsung diambil dari matahari, tanpa ada bagian yang berputar sehingga sistem sel surya bersih dan ramah lingkungan.

Bandingkan dengan sebuah generator listrik, ada bagian yang berputar dan memerlukan bahan bakar untuk dapat menghasilkan listrik. Suaranya bising. Selain itu gas buang yang dihasilkan dapat menimbulkan efek gas rumah kaca yang dapat menimbulkan penipisan lapisan ozon.

Sistem pembangkit listrik tenaga surya fotovoltaik yang digunakan terdiri dari panel sel surya (*solar cell*), rangkaian kontroller pengisian baterai (*battery control regulator*), dan aki (*battery*). Beberapa *cell* yang dihubungkan secara seri akan membentuk suatu modul (*module*). Modul sel surya itu menghasilkan energi listrik yang proporsional dengan luas permukaan panel yang terkena sinar matahari.

Sel surya merupakan sambungan dua semikonduktor tipe P dan N. Dalam sambungan P-N tersebut terbentuk tiga daerah berbeda. Pertama daerah tipe P, yang mayoritas pembawa muatannya adalah lubang (*hole*), kedua daerah tipe N dengan mayoritas pembawa muatan adalah elektron dan ketiga adalah daerah pengosongan (*deple*), pada daerah ini terdapat medan listrik internal yang arahnya dari N ke P. Apabila radiasi sinar

matahari mengenai sel surya tersebut maka akan terbentuk elektron dan hole. Adanya pengaruh medan listrik internal, maka hole akan bergerak menuju ke P dan elektron akan bergerak menuju N, sehingga keduanya menghasilkan arus fotodifusi. Sedangkan pada daerah pengosongan dapat pula terjadi pasangan hole dan elektron yang karena pengaruh medan internal yang sama akan bergerak menuju ke arah mayoritasnya, sehingga menghasilkan arus generasi.

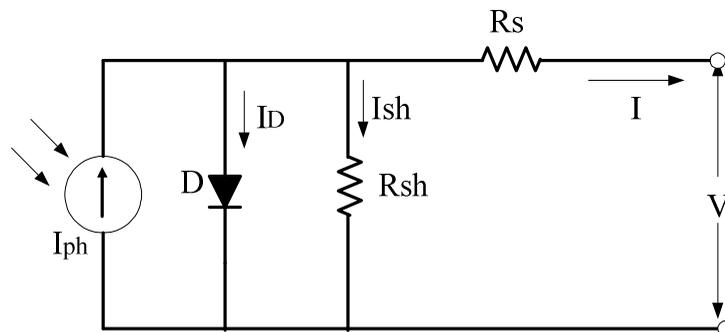


Gambar 2.7. (a) Cell photovoltaik, (b) Modul photovoltaic.

B.1. Model Fotovoltaik (PV)

B.1.1. Model Sel Fotovoltaik (PV-cell)

Model rangkaian sederhana dari *PV-cell* dapat dilihat pada gambar 2.8 dan atau dengan persamaan (2.1). (Huan-Liang Tsai, 2008)



Gambar 2.8. Rangkaian ekivalen sederhana dari sel fotovoltaik.

Pada gambar rangkaian ekivalen di atas, arus ke beban adalah:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q(V+IR_s)}{kT_c A} \right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

dimana:

I_{ph} = arus photocurrent, merupakan fungsi dari radiasi dan suhu matahari.

I_s = arus saturasi referensi dari diode

q = muatan elektron ($1,6 \times 10^{-19}$ C)

V = Tegangan Dioda (V)

k = konstanta Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

T_c = Temperatur kerja sel

A = Faktor ideal dari Dioda

R_s = Resistansi seri sel

R_{sh} = Resistansi shunt sel

Photocurrent tergantung pada radiasi matahari dan suhu kerja sel, yang digambarkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T_c - T_{ref})]\lambda \quad (2.2)$$

dimana:

I_{sc} = Arus short circuit pada 25 °C dan 1 kW/m²

K_i = Temperatur koefisien arus short-circuit sel (0.00023 A/K).

T_{ref} = Temperatur referensi sel (25 °C).

λ = Insolasi matahari [kW/m²]

Di sisi lain, saat saturasi sel bervariasi dengan suhu sel, yang digambarkan dengan persamaan:

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right)}{kA} \right] \quad (2.3)$$

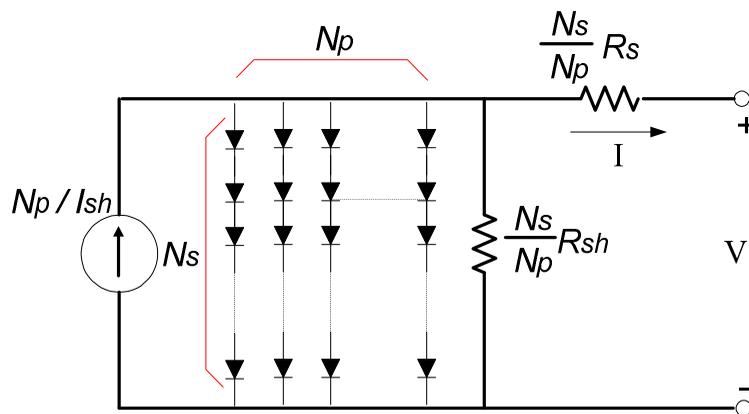
Dimana:

- I_{rs} = Arus saturasi balik sel pada temperatur referensi dan radiasi matahari 1 kW/m^2
- E_g = energi bang-gap dari semikonduktor pada sel (*Silicon* = 1.11 eV).
- A = Konstanta dari jenis produk fotovoltaik (*Si-mono* = 1.2).

B.1.2. Model Modul Fotovoltaik

Karena sel PV hanya menghasilkan kurang dari 2W dan sekitar 0.5V (Huan-Liang Tsai, 2008), maka sel-sel harus terhubung dalam konfigurasi seri-paralel pada modul untuk menghasilkan daya yang cukup tinggi. Sebuah modul PV adalah beberapa sel PV yang dihubungkan secara seri dan paralel untuk menghasilkan arus dan tegangan yang diperlukan. Rangkaian ekuivalen pada modul PV diatur secara seri N_s dan paralel N_p yang dapat ditunjukkan pada Gambar 2.9 sehingga persamaan arus dan tegangan dari modul PV adalah,

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left[\exp \left(\frac{q \left(\frac{V + I R_s}{N_s} \right)}{k T_c A} \right) - 1 \right] - \frac{N_p V + I R_s}{R_{sh}} \quad (2.4)$$



Gambar 2.9. Model rangkaian ekuivalen seri-paralel sel fotovoltaik.

Karena biasanya $I_{ph} \gg I_s$ dan mengabaikan arus bocor ke tanah dibawah nol, sehingga arus short-circuit (I_s) sama dengan photocurrent (I_{ph}), yaitu :

$$I_{ph} = I_{sc} \quad (2.5)$$

Di sisi lain, parameter V_{oc} diperoleh dengan asumsi bahwa arus output adalah nol. Mengingat bahwa tegangan open-circuit PV (V_{oc}) pada suhu referensi dan mengabaikan kebocoran arus shunt, arus saturasi balik saat ini pada suhu referensi dapat diperoleh sebagai:

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s k T_c A}\right) - 1 \right]} \quad (2.6)$$

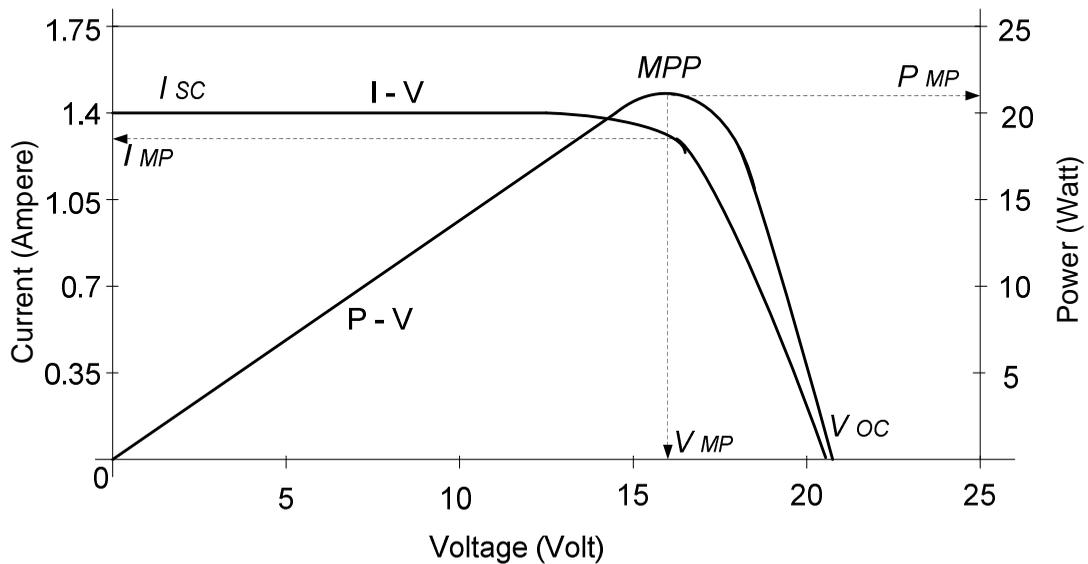
Selain itu, daya maksimum dapat dinyatakan sebagai:

$$P_{max} = V_{max} I_{max} = \gamma V_{oc} I_{sc} \quad (2.7)$$

Dimana V_{max} dan I_{max} adalah terminal tegangan dan arus keluaran dari modul PV pada titik daya maksimum (MPP), dan γ adalah faktor sel yang merupakan ukuran kualitas sel.

B.2. Kurva karakteristik Fotovoltaik

Bentuk kurva karakteristik modul fotovoltaik ditunjukkan pada gambar 2.10 (Marnoto, 2009).



Gambar 2.10. Kurva Karakteristik I – V dan P – V modul PV.

Kurva di atas menggambarkan hubungan antara arus dan tegangan serta daya dengan tegangan yang dihasilkan oleh suatu modul fotovoltaik. Variasi dari kurva ini tergantung dari prosentase radiasi sinar matahari yang mengenai panel sel surya.

B.3. Ukuran Fotovoltaik

Ketika merancang sistem modul PV, ada beberapa faktor harus dipertimbangkan (L.E. Weldemarian, 2010), yaitu: spesifikasi teknis, ukuran komponen secara individual, pertimbangan keselamatan dan segi ekonomisnya dari sebuah sistem.

Faktor yang paling penting yang harus dipertimbangkan pada pemasangan konfigurasi model PV, yaitu:

- ✓ Permintaan energi harian
- ✓ Intensitas radiasi matahari pada daerah yang akan dipasang fotovoltaik
- ✓ Metode pemasangan modul

C. Media Penyimpan Energi (Baterai)

Baterai merupakan piranti penyimpan energi dalam bentuk elektrokimia yang banyak digunakan untuk menyimpan energi untuk berbagai aplikasi. Ada beberapa jenis baterai / aki di pasaran yaitu jenis aki basah/konvensional, hybrid dan MF (*Maintenance Free*). Aki basah/konvensional berarti masih menggunakan asam sulfat (H_2SO_4) dalam bentuk cair. Sedangkan aki MF sering disebut juga aki kering karena asam sulfatnya sudah dalam bentuk gel/selai. Dalam hal mempertimbangkan posisi peletakkannya maka aki kering tidak mempunyai kendala, lain halnya dengan aki basah. Aki konvensional juga kandungan timbalnya (Pb) masih tinggi sekitar 2,5% untuk masing-masing sel positif dan negatif. Sedangkan jenis hybrid kandungan timbalnya sudah dikurangi menjadi masing-masing 1,7%, hanya saja sel negatifnya sudah ditambahkan unsur Calcium. Sedangkan aki MF/aki kering sel positifnya masih menggunakan timbal 1,7% tetapi sel negatifnya sudah tidak menggunakan timbal melainkan Calcium sebesar 1,7%. Pada Calcium battery Asam

Sulfatnya (H_2SO_4) masih berbentuk cairan, hanya saja hampir tidak memerlukan perawatan karena tingkat penguapannya kecil sekali dan dikondensasi kembali.

Dalam aplikasinya di lapangan ada dua jenis baterai yang sering digunakan (Soetedjo dkk) yaitu:

1. Baterai primer

Baterai primer yaitu suatu baterai yang reaksi elektrokimianya yang terjadi bersifat *non-reversible* (tidak dapat balik). Sehingga setelah digunakan pada baterai ini harus dibuang.

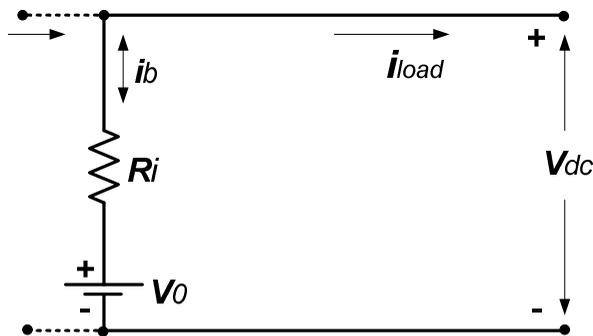
2. Baterai sekunder

Baterai sekunder yaitu suatu baterai yang biasa dikenal dengan baterai *rechargeable* (dapat diisi ulang). Pada baterai ini reaksi elektrokimianya bersifat *reversible* (dapat balik), sehingga setelah digunakan pada baterai ini dapat diisi ulang (*charging*). Baterai *rechargeable* ini terdiri dari:

- a. *Lead-acid (Pb-acid)*
- b. *Nickel-cadmium (NiCd)*,
- c. *Nickel-metal hydride (NiMH)*
- d. *Lithium-ion (Li-ion)*
- e. *Lithium-polymer (Li-poly)*
- f. *Zinc-air.*

Dari keenam jenis baterai *rechargeable* di atas, jenis yang paling umum digunakan adalah jenis *Lead-acid* karena teknologi dan unjuk kerjanya yang tinggi, dari segi harga relatif murah.

Rangkaian ekivalen baterai dapat diperlihatkan pada gambar 2.11, dimana terdiri dari sebuah sumber tegangan dengan hambatan yang disusun seri (Aryuanto dkk).



Gambar 2.11. Rangkaian ekivalen baterai *Lead-Acid*.

Pada gambar di atas, tegangan pada terminal baterai (V_{dc}) dinyatakan dalam persamaan:

$$V_{dc} = V_0 - R_i i_b(t) \quad (2.8)$$

Daya yang diambil dari baterai dapat dinyatakan sebagai:

$$P_{bb}(t) = V_{dc} i_b(t) \quad (2.9)$$

Energi yang masih tersimpan pada baterai setelah beban menarik daya dari baterai juga dapat dinyatakan sebagai:

$$e_{bb} = e_{bb_init}(t) - \int P_{bb}(t) dt \quad (2.10)$$

dimana :

V_{dc} = Tegangan DC pada hubungan bus-DC

V_0 = Tegangan dalam dari baterai bank

R_i = Tahanan dalam dari baterai bank

$i_b(t)$ = Arus yang mengalir keluar dari baterai ke beban

$e_{bb}(t)$ = Energi yang dikirim ke beban ketika baterai terpakai

$e_{bb}(t)$ = $e_{stor}(t)$ (penyimpanan energi) ketika baterai sedang diisi

$e_{bb_init}(t)$ = Energi awal baterai

$P_{bb}(t)$ = Daya baterai yang terkirim ke beban

Kapasitas Baterai

Baterai dapat berukuran sedemikian rupa sehingga mampu menyimpan energi yang cukup dari sumber daya energi terbarukan ketika ada banyak pasokan, agar dapat menyediakan permintaan selama periode matahari yang rendah atau tidak ada sama sekali.

Ukuran dan kapasitas baterai tergantung pada konsumsi energi harian (kWh/hari). Ukuran dari baterai dapat dirumuskan sebagai (L.E. Weldermariam, 2010):

$$BC = \frac{E_{daily_load_deman}}{\eta_b} \frac{DOA}{DOD} \quad [Wh] \quad (2.11)$$

dimana :

$E_{daili_load_demand}$ = Permintaan energi total harian [Wh/hari]

DOD = *Depth of Discharge* (Tinggi debit dari baterai) [70 %]

DOA = *Days of Autonomous* (Jumlah hari tanpa sinar) [diasumsikan 1]

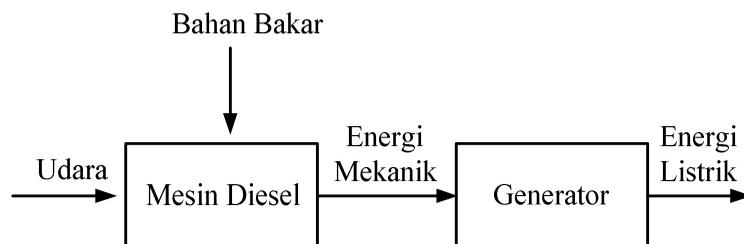
η_b = *Efisiensi* baterai [85 %]

Tegangan baterai sangat tergantung pada keadaan baterai apakah terisi penuh atau tidak.

D. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) ialah Pembangkit listrik yang menggunakan mesin diesel sebagai penggerak mula (*prime mover*). Prime mover merupakan peralatan yang mempunyai fungsi menghasilkan energi mekanis yang diperlukan untuk memutar rotor generator. Mesin diesel sebagai penggerak mula PLTD berfungsi menghasilkan tenaga mekanis yang dipergunakan untuk memutar rotor generator. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel biasanya digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik dalam jumlah beban kecil, terutama untuk daerah baru yang terpencil atau untuk listrik pedesaan dan untuk memasok kebutuhan listrik suatu pabrik.

Secara blok diagram yang sederhana PLTD dapat ditunjukkan seperti gambar di bawah ini.



Gambar 2.12. Blok diagram sistem PLTD

Generator Set (Genset)

Generator set pada umumnya digunakan sebagai pembangkit cadangan untuk berbagai macam aplikasi seperti *workshop mobile*, dalam operasi darurat dan penyelamatan, pembangkit cadangan pada industri, peternakan dan rumah tangga.

Generator set terdiri atas beberapa satuan pembangkit. Dalam satuan pembangkit ini terdapat peralatan-peralatan, baik peralatan utama maupun peralatan bantu yang akan berfungsi untuk kelangsungan kerja dari generator set. Adapun peralatan-peralatan yang dimaksud yaitu :

1. Mesin diesel

Mesin diesel berfungsi sebagai penggerak generator (*prime mover*). Adapun bagian-bagian utama dari mesin diesel yaitu: peralatan pada sistem pembakaran, sistem bahan bakar, sistem pendinginan dan sistem pelumasan. Pada mesin diesel dilengkapi oleh governor yang berfungsi sebagai pengatur kecepatan putaran pada mesin diesel.

Definisi dan identifikasi model matematika dari mesin diesel didasarkan pada analisis fisik dan fenomena dalam model parsial. Persamaan differensial yang mendasar dari karakteristik mesin didasarkan pada persamaan torsi dengan persamaan, (Jan Leucher, 2006).

$$M_E = M_D + M_R + M_L \quad (2.12)$$

dimana:

$$M_E = \text{Torsi Penggerak mesin [Nm]}$$

$$M_D = \text{Torsi dinamik [Nm]}$$

$$M_R = \text{Torsi resistan [Nm]}$$

$$M_L = \text{Torsi beban [Nm]}$$

Torsi dinamik M_D dapat dilihat pada persamaan (2.13). J adalah momen inersia.

$$M_D = J \frac{d\omega}{dt} = J\dot{\omega} \quad (2.13)$$

Mesin merupakan sumber dari gerakan kinematik dan torsi penggerak. Dengan menggunakan aproksimasi untuk M_R dan M_E dari polynomial orde pertama, maka,

$$M_R = f(d, \omega) = f(\omega) = r_0 + r_1\omega \quad (2.14)$$

$$M_E = f(d, \omega) = f(d) = m_0 + m_1d \quad (2.15)$$

Dimana torsi penggerak M_E diperbesar oleh d dan dapat diperkecil oleh perubahan putaran ω dan M_R . Parameter d adalah banyaknya injeksi bahan bakar. Torsi resisten M_R merupakan fungsi dari putaran ω dan efek injeksi bahan bakar d dan hal ini juga bisa diabaikan.

Torsi beban M_L merupakan fungsi dari daya beban P_L atau arus beban I_L dan tegangan output.

$$M_L = f(P_L) = f(I_L) = a_0 + a_1I_L \quad (2.16)$$

Pada persamaan (2.12) di atas dapat dimodifikasi kedalam persamaan (2.17). Dengan menggunakan *approximate expression* untuk M_R , M_E dan M_L maka kita dapat memperoleh persamaan differensial untuk sistem umpan baliknya seperti pada persamaan (2.18) dan (2.19). Oleh karena itu, model dari beban mesin mempunyai bentuk persamaan differensial linier order pertama (2.25).

$$J\dot{\omega} = M_E(d, \omega) - M_R(\omega) - M_L(I_L) \quad (2.17)$$

$$J\dot{\omega} = (m_1 + m_0) - (r_1\omega + r_0) - M_L \quad (2.18)$$

$$J\dot{\omega} + r_1\omega = m_1d - (r_0 - m_0) - M_L \quad (2.19)$$

$$T\dot{\omega} + \omega = K_d - K_L(M_S + M_L) \quad (2.20)$$

dimana T adalah waktu konstan, K adalah faktor pengali mesin, K_L adalah faktor pengali beban, M_S adalah torsi efektif statis, M_L adalah torsi beban.

$$T = \frac{J}{r_1} [s], \quad K = \frac{m_1}{r_1} [mg^{-1}S^{-1}], \quad K_L = \frac{1}{r_1} [N^{-1}m^{-1}S^{-1}],$$

$$M_S = (r_0 - m_0)[Nm] \quad (2.21)$$

Dengan asumsi bahwa mesin dapat dikendalikan oleh sebuah kontrol umpan balik yang proporsional dengan penguatan K_R dapat dituliskan pada persamaan,

$$d = K_R(\omega_P - \omega) = K_R e \quad (2.22)$$

dimana ω_P adalah kecepatan sudut yang diperlukan oleh mesin, ω adalah kecepatan sesaat dan e adalah kesalahan kontrol (*control error*).

Persamaan differensial untuk sistem umpan balik dapat diperoleh dengan,

$$\frac{T}{1+KK_R} \dot{\omega} + \omega = \frac{KK_R}{1+KK_R} \omega_P - \frac{K_L}{1+KK_R} (M_S + M_L) \quad (2.23)$$

$$T_C \dot{\omega} + \omega = K_C \omega_P - K_{LC} (M_S + M_L) \quad (2.24)$$

dimana T_C adalah waktu konstan, K_C adalah faktor pengali mesin, K_{LC} adalah faktor pengali beban. Hasil output persamaan differensial untuk sistem umpan balik yang konkrit dapat mengikuti format sebagai berikut,

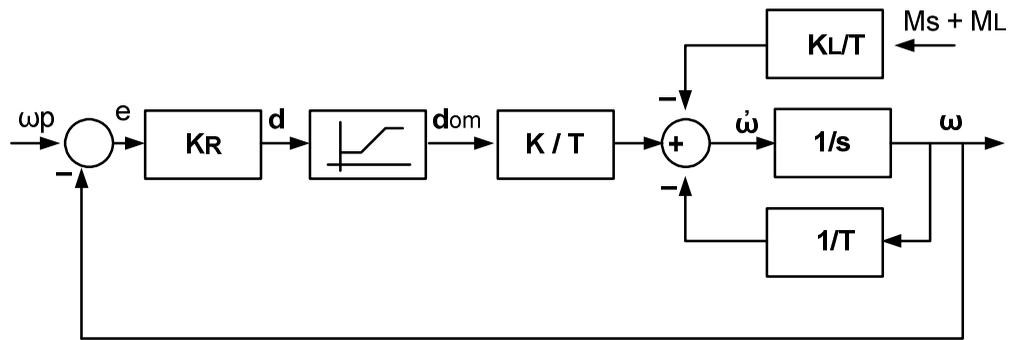
$$17.9\dot{\omega} + \omega = 100.7 d - 74.6(0.5 + M_L) \quad (2.25)$$

Untuk $T_C = 17.9$ s; $K_C = 100.7$ mg⁻¹s⁻¹; $K_{LC} = 74.6$ N⁻¹m⁻¹s⁻¹; $M_S = 0.5$ Nm.

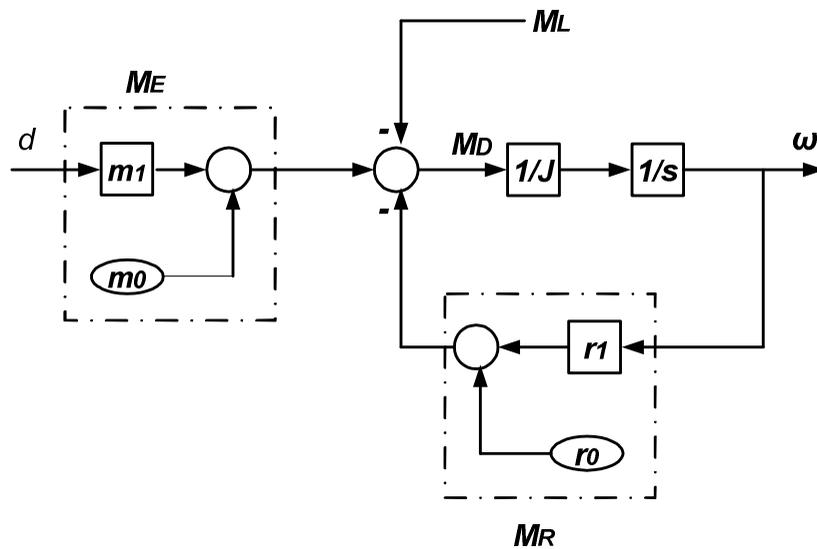
Karakteristik output dari mesin adalah,

$$P(d, \omega) = M(d, \omega)\omega = 1.35d\omega - 0.0134\omega^2 - 0.5\omega \quad (2.26)$$

Skema model kontrol umpan balik dapat dilihat pada gambar 2.13 di bawah ini.



(a)



(b)

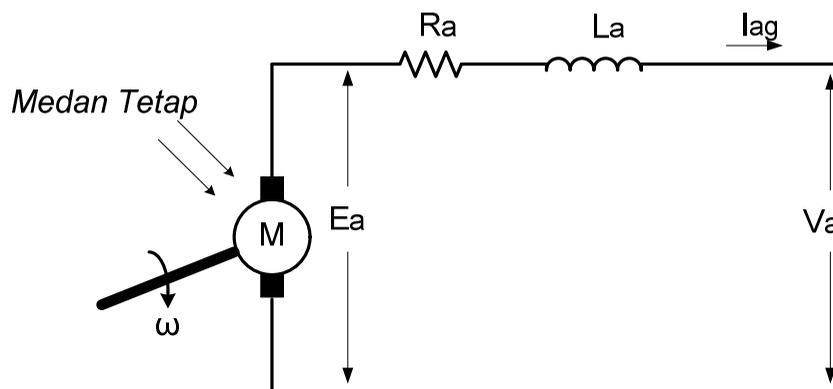
Gambar 2.13. (a) Skema model kontrol umpan balik mesin diesel, (b) Struktur detail model mesin linier.

2. Generator

Generator merupakan bagian dari sistem pembangkit listrik tenaga diesel yang berfungsi merubah energi mekanik (putaran) pada poros mesin diesel menjadi energi listrik.

Pada umumnya pembangkit listrik tenaga diesel (genset) menggunakan generator sinkron (*Synchronous Generator*), baik generator sinkron eksitasi elektrik (*Electrically Excited Synchronous Generator, EESG*) maupun generator sinkron magnet permanen (*Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG*). Pada umumnya genset menggunakan generator sinkron magnet permanen atau generator DC magnet permanen bahkan kedua-duanya dapat digunakan dalam satu genset.

Pada dasarnya sebuah mesin arus searah dapat difungsikan sebagai motor atau generator. Model generator DC magnet permanen dapat dilihat pada gambar 2.14 di bawah ini,



Gambar 2.14. Model generator DC magnet permanen

Tegangan Induksi jangkar atau ggl Jangkar dibangkitkan pada kumparan jangkar dari sebuah generator. Nilai tegangan ini biasa dihitung berdasarkan persamaan-persamaan dibawah ini: (Chee-Mun Ong, 1997)

$$E_a(t) = k_a \Phi \omega(t) = k_E \omega(t)$$

$$k_E \omega(t) = R_a I_{ag}(t) + L_a \frac{d i_{ag}(t)}{dt} + V_a(t) \quad (2.27)$$

$$R_a I_{ag}(t) = L_a \frac{d i_{ag}(t)}{dt} = k_E \omega(t) - V_a(t) \quad (2.28)$$

$$\frac{d i_{ag}(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} [k_E \omega(t) - V_a(t) - R_a I_{ag}(t)]$$

$$\frac{d i_{ag}(t)}{dt} = k_E \omega(t) - V_a(t) - R_a I_{ag}(t) \quad (2.29)$$

$$V_a(t) = k_E \omega(t) - R_a I_{ag}(t) \quad (2.30)$$

$$T_{em}(t) = \frac{k_E \omega(t) \cdot I_{ag}(t)}{\omega(t)} \quad (2.31)$$

dimana:

E_a = Tegangan Induksi atau ggl jangkar [Volt]

k_E = Konsta tegangan induksi

ω = putaran rotor [rad/sec]

R_a = Tahanan jangkar [Ohm]

L_a = Induktansi jangkar [Henri]

I_{ag} = Arus jangkar pada generator [Ampere]

T_{em} = Torsi Elektromagnetik [Nm]

E. Beban

Profil beban merupakan langkah pertama untuk mendesain dari setiap sistem tenaga listrik. Sifat operasi beban dan perilaku konsumen adalah parameter yang menentukan profil beban.

Dalam suatu rangkaian listrik selalu dijumpai suatu sumber dan beban. Bila sumber listrik DC, maka sifat beban hanya bersifat resistif murni, karena frekuensi sumber DC adalah nol. Reaktansi induktif (XL) akan menjadi nol yang berarti bahwa induktor tersebut akan *short circuit*. Reaktansi kapasitif (XC) akan menjadi tak berhingga yang berarti bahwa

kapasitif tersebutakan *open circuit*. Jadi sumber DC akan mengakibatkan beban induktif dan beban kapasitif tidak akan berpengaruh pada rangkaian.

Beban resistif yang merupakan suatu resistor murni yang terdiri dari komponen tahanan ohm saja (*resistance*), contoh : lampu pijar, pemanas. Beban ini hanya menyerap daya aktif dan tidak menyerap daya reaktif sama sekali. Tegangan dan arus se-fasa. Secara matematis, tahanan, arus, tegangan serta daya aktif dapat dinyatakan :

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.32)$$

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.33)$$

$$V = I \cdot R \quad (2.34)$$

$$P = V \cdot I$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (2.35)$$

dimana:

R = Hambatan (Ohm)

V = Tegangan (Volt)

I = Kuat Arus (Ampere)

P = Daya Aktif (Watt)

F. Sistem Kontrol

Untuk mendapatkan sistem bekerja secara optimal, maka perlu mendesain sistem kontrol yang tepat. Dalam mendesain peralatan ini diperlukan penyusunan algoritma sistem kontrol dan simulasi untuk melihat unjuk kerja setiap sub-sistem dan sistem secara menyeluruh. Untuk itu

diperlukan algoritma matematik untuk sistem kontrol dan pembuatan model matematika untuk simulasi unjuk kerja sistem. Pada sistem kontrol ini, akan mengatur pola pembagian daya keluaran dari genset dan daya dari pembangkit PLTS. Pengaturan mode operasi dilakukan tanpa memutuskan suplai daya ke beban (Sami Kamel, 2008). Pada sistem hibrid ini, peralatan elektronika daya memegang peranan yang sangat penting. Komponen terpenting dalam hal ini adalah konverter/inverter yang berfungsi untuk menghasilkan keluaran tegangan AC.

Sistem kontrol juga akan mengatur waktu on/off generator sehingga genset bekerja secara efisien. Hal ini dilakukan dengan mengatur proses pengaturan waktu pengisian dan pengosongan media penyimpan. Sistem kontrol dalam sistem hibrid yang digunakan untuk mengatur seluruh proses/mekanisme sub sistem – sub sistem yang ada dalam pembangkit hibrid yaitu :

1. Untuk mengukur kerja paralel antara fotovoltaik-genset jika diperlukan
2. Mencegah pengisian yang lebih (*over charging*) dan pelepasan pengisian baterai yang lebih (*over charging*) dan pelepasan lebih (*over charging*) baterai dan penggunaan fotovoltaik-diesel dalam kondisi yang efisien.
3. Memantau keseimbangan pembangkit sistem hibrid dan beban setiap hari.

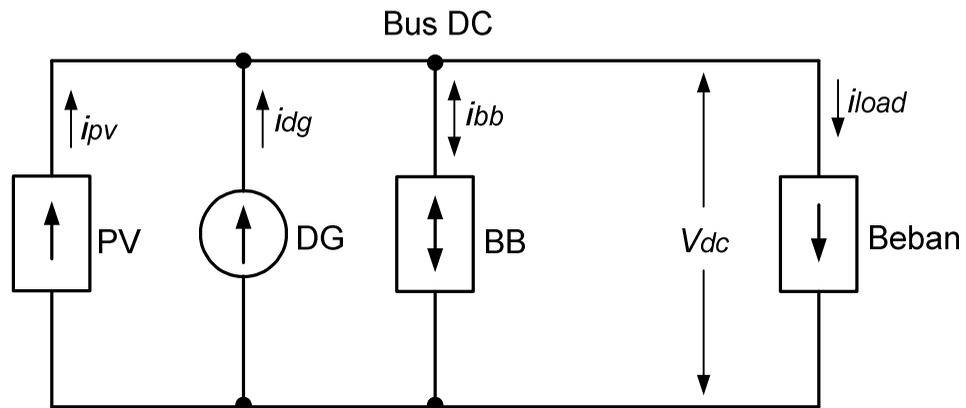
Dalam menjalankan tugasnya sistem kontrol dilengkapi dengan sensor-sensor yang dapat memantau besar tegangan dan besar arus,

kemudian membandingkannya dengan besaran acuan yang diset sesuai dengan kebutuhan.

G. *Power Management Strategies (PMSs)*

Power Management Strategies (PMSs) merupakan model sistem pengaturan antar sumber energi terbarukan dengan sumber energi konvensional seperti generator diesel dan baterai (L.E. Weldermariam, 2010). Hal ini dimungkinkan untuk dapat berkoordinasi oleh pembangkit daya ini, terutama dalam pertukaran daya untuk kontinuitas pasokan daya yang lancar dan terkendali. PMSs dilaksanakan untuk memenuhi persyaratan beban sekaligus memaksimalkan manfaat energi terbarukan dan mengoptimalkan unit penyimpanan. Dengan demikian, PMSs dalam struktur pengendalian hybrid yang penting bagi keseimbangan antara efisiensi dan kinerja sistem hybrid. Namun, variasi permintaan listrik dan profil beban tak terduga adalah ketidakpastian yang tidak dapat dihindari secara menyeluruh.

Berikut (Gambar 2.15) adalah rangkaian kelistrikan dari sistem hybrid bus DC. Daya dari sumber dapat digunakan secara langsung atau melalui baterai.



Gambar 2.15. Rangkaian Kelistrikan Hibrid PV, Genset dan Baterai Bank.

Rangkaian sederhana di atas (Gambar 2.15), pemodelan matematika dilakukan sesuai dengan daya atau mekanisme kontrol antara sisi penawaran dan sisi beban. Keseimbangan daya merupakan peranan yang sangat penting dalam sistem kontrol pada sistem tenaga hibrid. Model matematika dari keseimbangan beban pada pembangkit hibrid adalah: (L.E. Weldermariam, 2010).

$$P_{beban}(t) = P_{pv}(t) + P_{dg}(t) + P_{bb}(t) \quad (2.36)$$

dimana:

P_{beban} = Daya Beban

P_{pv} = Daya PV

P_{dg} = Daya Genset

P_{bb} = Daya Baterai

Ketika baterai sedang diisi, maka daya baterai $P_{bb}(t) = -P_{stor}(t)$ digunakan pada persamaan umum daya di atas (2.36). Karena semua sumber daya terhubung ke bus DC, maka model matematika di atas

(persamaan (2.36)) dapat dibagi dengan tegangan DC pada bus sehingga menjadi:

$$i_{beban}(t) = i_{dc} = i_{pv}(t) + i_{dg}(t) + i_{bb}(t) \quad (2.37)$$

Persyaratan yang harus selalu dipenuhi dalam sistem yang beroperasi pada *Power Management Strategies* adalah: (L.E. Weldermariam, 2010).

1. Daya sesaat dan daya puncak PV dengan baterai harus berada disetidaknya sama dengan daya beban.
2. Pengisian / pemakaian baterai harus tetap dalam batas-batas energi maksimum dan minimum.

Dengan mengambil keseimbangan daya dan tingkat energi baterai ke sistem, pemodelan matematika, dapat diberikan sebagai:

$$P_{pv}(t) + P_{dg}(t) + P_{bb}(t) = P_{beban}(t) \quad (2.38)$$

Baterai hanya dapat mengisi atau digunakan antara kapasitas energi maksimum dan batas kapasitas energi minimum (*State of Charges*) tergantung pada permintaan beban dan persediaan daya pembangkit.

Pada saat pasokan daya lebih besar dari permintaan, bagian dari pasokan daya akan mengisi baterai, dan daya pengisian dapat ditentukan sebagai:

$$P_{stor}(t) = P_{pv}(t) + P_{dg}(t) - P_{beban}(t) \quad (2.39)$$

Dengan demikian, energi yang tersimpan di baterai saat pengisian daya adalah:

$$e_{bb_{stor}}(t) = \int P_{stor}(t) dt \quad \&$$

$$e_{bb}(t) = E_{bb_{awal}}(t) - \int P_{stor}(t) dt \quad (2.40)$$

Bila daya permintaan melebihi pasokan, baterai yang mendukung PV dalam memasok beban dan merupakan bagian dari kontribusi daya dari baterai adalah:

$$P_{bb}(t) = P_{beban}(t) - P_{pv}(t) \quad \&$$

$$e_{bb}(t) > E_{bb_{min}} \quad (2.41)$$

Dengan demikian, energi yang disuplai dari baterai ketika sedang pemakaian adalah:

$$e_{bb_{sup}}(t) = \int P_{bb}(t) dt \quad \&$$

$$e_{bb_{sup}}(t) = E_{bb_{awal}}(t) - \int P_{bb}(t) dt \quad (2.42)$$

H. Edukasi (Pendidikan)

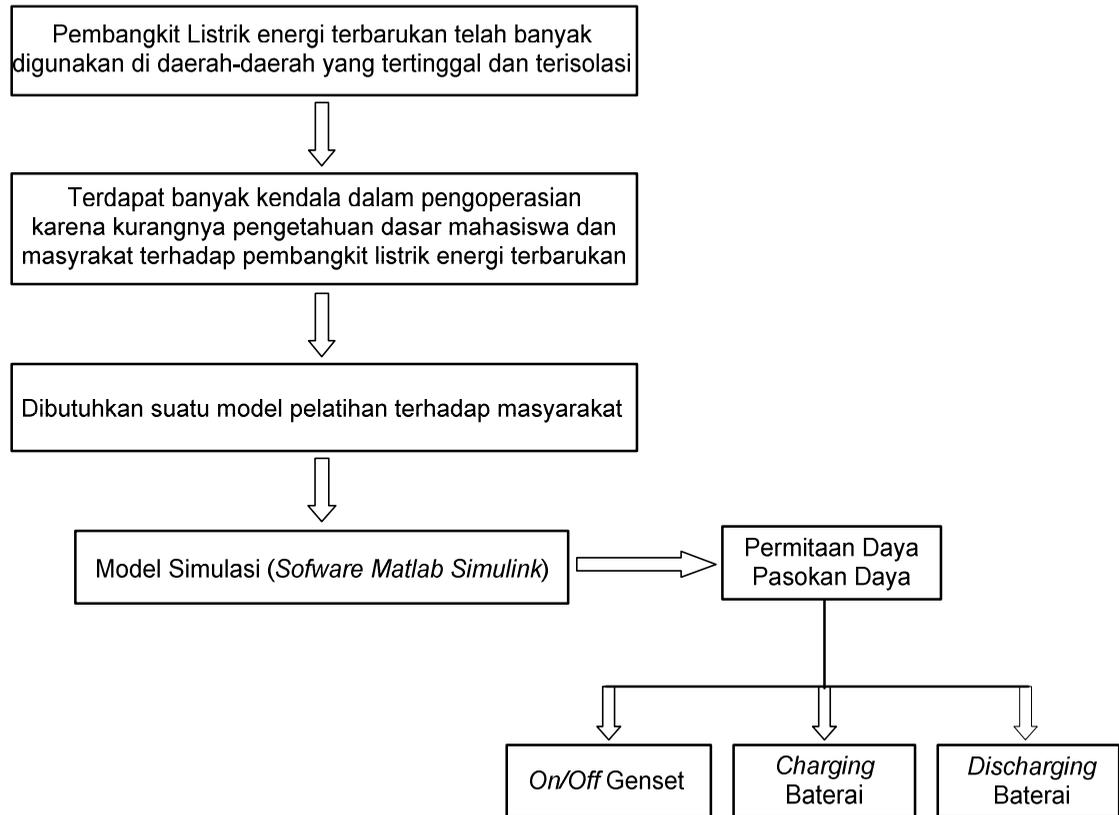
Edukasi atau pendidikan adalah penambahan pengetahuan dan kemampuan seseorang melalui teknik praktik belajar atau instruksi, dengan tujuan untuk mengingat fakta atau kondisi nyata, dengan cara memberi dorongan terhadap pengarahan diri (*self direction*), aktif memberikan informasi-informasi atau ide baru (Craven dan Hirnle, 1996 dalam Suliha, 2002). Edukasi merupakan serangkaian upaya yang ditujukan untuk mempengaruhi orang lain, mulai dari individu, kelompok, keluarga dan masyarakat agar terlaksananya perilaku hidup sehat (Setiawati, 2008).

Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (2008), pendidikan diartikan sebagai proses perubahan sikap dan tata laku seseorang atau kelompok orang dalam usaha mendewasakan manusia melalui upaya pengajaran dan pelatihan.

Menurut Undang-Undang SISDIKNAS No.20 tahun 2003, pendidikan adalah usaha sadar dan terencana untuk mewujudkan suasana belajar dan proses pembelajaran agar peserta didik secara aktif mengembangkan potensi dirinya untuk memiliki kekuatan spiritual keagamaan, pengendalian diri, kepribadian, kecerdasan, akhlak mulia, serta keterampilan yang diperlukan dirinya dan masyarakat.

Definisi di atas menunjukkan bahwa Edukasi atau Pendidikan adalah usaha sadar dan terencana untuk mewujudkan suasana belajar dan proses pembelajaran agar peserta didik secara aktif mengembangkan potensi dirinya untuk memiliki kekuatan spiritual keagamaan, pengendalian diri, kepribadian, kecerdasan, akhlak mulia, serta keterampilan yang diperlukan dirinya dan masyarakat.

I. Kerangka Pikir



Gambar 2.16. Kerangka Pikir