

**STUDI PLTG UNIT 1 ULPL KERAMASAN PALEMBANG
PADA SAAT (BLACK START) PADA SISTEM 150 KV**



LAPORAN AKHIR

Dibuat untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Laporan Akhir

Jurusan Teknik Elektro Program Studi Teknik Listrik

Politeknik Negeri Sriwijaya

Oleh :

Ilham Pratama

061830310190

POLITEKNIK NEGERI SRIWIJAYA

PALEMBANG

2021

**STUDI PLTG UNIT I ULPL KERAMASAN PALEMBANG
PADA SAAT (BLACK START) PADA SISTEM 150 KV**



LAPORAN AKHIR

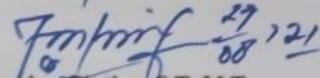
**Dibuat untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Laporan Akhir
Jurusan Teknik Elektro Program Studi Teknik Listrik
Politeknik Negeri Sriwijaya**

Oleh:

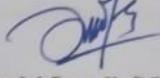
**ILHAM PRATAMA
061830310190**

Menyetujui,

Pembimbing I


**Berniap Ginting, S.T., M.T.
NIP. 196303231989031002**

Pembimbing II

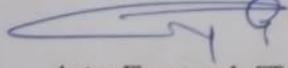

**Andri Suyadi, S.ST., M.T.
NIP. 196510091990031002**

Mengetahui,

**Ketua Jurusan
Teknik Elektro**


**Ir. Iskandar Lutfi, M.T.
NIP. 196510091990031002**

**Koordinator Program Studi
Teknik Listrik**


**Anton Firmansyah, ST., M.T.
NIP. 197509242008121001**

MOTTO :

- *Jika kamu berbuat baik (berarti) kamu berbuat baik bagi dirimu sendiri dan jika kamu berbuat jahat maka (kejahatan) itu bagi dirimu sendiri : Al Isra ayat 7*
- *Sebaik-baiknya ilmu adalah yang diamalkan, sebaik-baiknya orang adalah yang paling bermanfaat untuk orang lain*
- *Hatiku tenang karena mengetahui bahwa apa yang melewatkanmu tidak akan pernah menjadi takdirku, dan apa yang ditakdirkan untukmu tidak akan melewatkanmu (Umar Bin Khattab)*
- *Allah tidak akan membebani seseorang melainkan sesuai dengan kadar kesanggupannya (Q,S Al-Baqarah : 286)*
- *Bekerjalah untuk duniamu seakan-akan engkau akan hidup selamanya. Dan bekerjalah untuk akhiratmu seakan-akan engkau akan mati besok*

Kupersembahkan kepada

- ❖ *Kedua orang tuaku yang telah mendukung dan memotivasi dalam proses penyelesaian penulisan laporan akhir*
- ❖ *Keluargaku*
- ❖ *Dosen Pembimbing Pak Bersiap Ginting, S.T.,M.T dan Pak Andri Suyadi, S.ST.,M.T*
- ❖ *Teman-teeman seperjuangan*
- ❖ *Kabinet Penggerak Perubahan GPM*
- ❖ *Teman-teman sekelasku 6 LB*
- ❖ *Almamater tercinta “ Politeknik Negeri Sriwijaya*

ABSTRAK

STUDI PLTG UNIT 1 ULPL KERAMASAN PALEMBANG PADA SAAT(BLACK START) PADA SISTEM 150 KV

(2021 : 94 hal + daftar tabel + daftar gambar)

Ilham Pratama

061830310190

Program Studi Teknik Listrik

Jurusan Teknik Elektro

Politeknik Negeri Sriwijaya

PLTG Unit 1 sektor keramasan merupakan salah satu pembangkit listrik yang dapat melakukan blackstart secara mandiri tanpa memerlukan bantuan sumber dari pembangkit lain,dalam hal ini seperti pembangkit PLTU dan PLTGU yang masih memerlukan sumber dari pembangkit lain untuk melakukan start awal, dan dalam pengoperasiannya PLTG hanya memerlukan waktu beberapa menit saja untuk dapat melakukan start pada pembangkit seperti biasa. Dalam fungsi dan kegunaan baterai pada saat blackstart adalah dapat menggantikan arus (ac) sementara yang terjadi pada saat gangguan (blackout) untuk dapat melakukan suplai ke diesel emergency (EDG) yang kemudian dapat menghidupkan motor-motor DC dan kemudian bisa men-start PLTG unit 1 untuk dapat kembali beroperasi seperti biasa. Apabila tidak terdapat baterai untuk melakukan start diesel emergency (EDG) maka kemungkinan pembangkit PLTG akan mati dan bisa dapat merusak rotor-rotor pada PLTG, karna sebuah pembangkit tidak boleh berhenti seketika karna pada saat berhenti itu bisa merusak atau membengkokan besi pada rotor.

Kata Kunci : Blackout, Black start, Diesel Emergency (EDG), SOP

ABSTRACT

STUDY OF PLTG UNIT 1 ULPL KERAMASAN PALEMBANG AT THE TIME (BLACK START) IN 150 KV SYSTEM

(2021 : 94 pages + life of tables + list of figure)

Ilham Pratama

061830310190

Electro Engineering Department

Electrical Engineering Study Program

State Polytechnic Of Sriwijaya

PLTG Unit 1 in the keramasan sector is one of the power plants that can perform blackstart independently without the need for source assistance from other generators, in this case such as PLTU and PLTGU plants which still require sources from other generators to perform the initial start, and in operation PLTG only requires it only takes a few minutes to be able to start the generator as usual. In the function and usefulness of the battery at the time of blackstart, it is able to replace the current (ac) temporarily that occurs during a disturbance (blackout) to be able to supply the diesel emergency (EDG) which can then turn on the DC motors and then be able to start the PLTG unit. 1 to be able to return to normal operations. If there is no battery to start the diesel emergency (EDG), it is possible that the PLTG generator will die and can damage the rotors of the PLTG, because a generator cannot stop immediately because when it stops it can damage or bend the iron in the rotor.

Keywords : Blackout, Black start, Diesel Emergency (EDG), SOP

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT karena atas berkat rahmat, nikmat dan karunia-Nya Laporan Akhir ini dapat selesai ditulis dengan baik dan tepat pada waktunya. Sholawat teriring salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, yang telah menghantarkan kita dari zaman kegelapan menuju zaman terang benderang seperti saat ini.

Laporan Akhir ini ditulis untuk memenuhi syarat menyelesaikan pendidikan Diploma III di Politeknik Negeri Sriwijaya pada jurusan Teknik Elektro Program Studi Teknik Listrik. Adapun judul dari Laporan Akhir ini adalah **“STUDI PLTG UNIT 1 ULPL KERAMASAN PALEMBANG PADA SAAT (BLACK START) PADA SISTEM 150 KV”**

Dalam pembuatan Laporan Kerja Praktek ini, penulis banyak mendapat bantuan dan dorongan dari semua pihak, oleh karena itu dalam laporan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ing. Ahmad Taqwa. selaku Direktur Politeknik Negeri Sriwijaya Palembang.
2. Bapak Ir. Iskandar Lutfi, M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Sriwijaya Palembang.
3. Bapak Anton Firmansyah, S.T.,M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Listrik Politeknik Negeri Sriwijaya Palembang.
4. Bapak Bersiap Ginting, S.T.,M.T selaku dosen pembimbing I.
5. Bapak Andri Suyadi, S.ST.,M.T selaku dosen pembimbing II.
6. Bapak Hasymi Irawan selaku Manager ULPL PT. PLN (Persero) UPDK Keramasan Palembang.
7. Bapak Dicky Hermindo selaku Supervisor Pemeliharaan di PT. PLN (Persero) UPDK Keramasan Palembang.
8. Bapak Ismail Marzuki selaku pembimbing kerja praktek di PT. PLN (Persero) UPDK Keramasan Palembang.
9. Bapak Zuhendri, Bapak heri dan Bapak Januar Rizky Aulia selaku pembimbing lapangan di PT.PLN (Persero) UPDK Keramasan Palembang.

10. Karyawan bagian ULPL dan Bengkel Listrik di PT. PLN (Persero) UPDK Keramasan Palembang.
11. Untuk Keluarga dirumah (Ayah dan Ibu) terima kasih selalu memberikan dukungan serta doa
12. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Listrik Tahun Angkatan 2018 khususnya kelas 6 LB dan juga teman-teman satu angkatan Teknik Listrik.
13. Keluarga Besar Kel Mg Kntsl yang telah banyak memberikan dukungan semangat kepada penulis.

Apabila dalam penyusunan laporan ini masih terdapat kekurangan dan kekeliruan baik mengenai isi maupun cara penulisan, penulis memohon kritik dan saran yang bersifat membangun guna perbaikan dimasa yang akan datang. Selain itu penulis berharap Laporan Akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua khususnya bagi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Program Studi Teknik Listrik Politeknik Negeri Sriwijaya.

Palembang, 2021

Penulis

DAFTAR ISI

BAB I	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Batasan Masalah.....	2
1.3 Rumusan Masalah	2
1.4.1 Tujuan	2
1.4.2 Manfaat	2
1.5 Metode Penelitian.....	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II.....	5
TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG).....	5
2.1.1 Prinsip Kerja PLTG	6
2.1.2 Komponen Utama dan Komponen Pendukung PLTG	7
2.1.3 Proses Pengoperasian PLTG.....	14
2.1.4 Prinsip Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)	15
2.1.5 Keunggulan Dan Kelemahan PLTG	16
2.2 Baterai	18
2.2.1 Sistem Baterai	18
2.2.3 Jenis-jenis Baterai	19
2.2.4 Bagian Utama Baterai	22
2.2.5 klasifikasi baterei	28
2.2.6 Rating Kapasitas Baterei.....	33
2.3 Generator Sinkron	35
2.3.1 Konstruksi Generator Sinkron	35
2.3.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron.....	38
2.3.3 Generator Berbeban	40
2.3.4 Sistem Eksitasi Pada Generator Sinkron	42
2.3.5 Paralel Generator Sinkron.....	44
2.3.6 Sistem Kerja Paralel Generator Sinkron	45

2.3.7 Efek Pengaturan Arus Eksitasi	46
2.3.8 Komponen Penunjang Generator Turbin Gas.....	47
2.3.9 Faktor Daya.....	49
2.4 Kehilangan Tegangan Pada Sistem Tenaga Listrik.....	51
2.4.1 Gangguan Besar Penyebab Kehilangan Tegangan	52
2.4.2 Pemulihan Pasca Kehilangan Tegangan Pada Sistem	53
2.4.3 Persiapan Untuk Mengatasi Gangguan Besar.....	54
2.5 Black Start	55
2.6 Kebutuhan Daya Start Pembangkit Listrik (Cranking Power).....	56
2.7 Interkoneksi Sistem Tenaga Listrik.....	57
2.8 Load Shedding.....	58
2.9 Pengaturan Frekuensi	60
2.9.1 Peran Governor Dalam Pengaturan Frekuensi.....	61
2.9.2 Speed Droop Governor	62
2.10 DigSILENT Power Factory 15.1	64
BAB III.....	66
METODE PENELITIAN.....	66
3.1 Data Teknis PLTG Unit I ULPL Keramasan	66
3.2 Gambaran Umum Sistem Interkoneksi Sumbagsel.....	67
3.3 Diagram Alur Penelitian.....	74
BAB IV	75
PEMBAHASAN	75
4.1 Simulasi Aliran Daya PLTG Unit 1	75
4.2 Simulasi Step Response Governor PLTG	78
4.3 Kontribusi Batrei	79
4.4 SOP PLTG.....	79
BAB V.....	93
KESIMPULAN DAN SARAN.....	93
5.1 Kesimpulan.....	93
5.2 Saran.....	93
DAFTAR PUSTAKA	94
DAFTAR LAMPIRAN.....	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem PLTG	6
Gambar 2. 2 Prinsip kerja PLTG.....	6
Gambar 2. 3 Generator AC	12
Gambar 2. 4 Generator DC	13
Gambar 2. 5 Turbin Gas.....	14
Gambar 2. 6 Skema Proses Pembangkitan Generator Turbin Gas.....	15
Gambar 2. 7 Proses Charging dan Discharging	18
Gambar 2. 8 Discharging / Pengosongan	19
Gambar 2. 9 Charging / Pengisian	19
Gambar 2. 10 Baterai Asam	20
Gambar 2. 11 Baterai Alkali	21
Gambar 2. 12 Baterai Kering/ Lithium	22
Gambar 2. 13 a) Plat Grid, b) Material Aktif, c) Grid Rangka Besi, d) Terakit Dalam Plastic Container.....	22
Gambar 2. 14 Plastik Cointainer dan Steel Container.....	23
Gambar 2. 15 Terminal Penghubung Baterai.....	24
Gambar 2. 16 Ruang Baterei	25
Gambar 2. 17 Kontruksi dan bagian-bagian baterei.....	25
Gambar 2. 18 kotak Baterei	26
Gambar 2. 19 Plat Baterei	27
Gambar 2. 20 tutup baterei.....	28
Gambar 2. 21 rangkaian seri baterei	31
Gambar 2. 22 rangkaian paralel baterei	31
Gambar 2. 23 Generator Sinkron	35
Gambar 2. 24 Kontruksi Generator Sinkron	36
Gambar 2. 25 Inti Stator dan Alur Pada Stator	37
Gambar 2. 26 Rotor Kutub Menonjol	38
Gambar 2. 27 Rotor Kutub Silinder	38
Gambar 2. 28 Rangkaian Ekuivalen Generator Berbeban	40
Gambar 2. 29 Hubungan berbagai kondisi beban terhadap arus dan tegangan yang terjadi pada generator : (a). resistif (b). induktif (c).kapasitif	41
Gambar 2. 30 Sistem Eksitasi Statik	43
Gambar 2. 31 Sistem Eksitasi Dinamik	44
Gambar 2. 32 Segitiga daya generator yang terhubung paralel akibat efek pengubahan penguatan	47
Gambar 2. 33 Segitiga daya	50
Gambar 2. 34 Prosedur khas blackout (Goo, dkk, 2016)	52
Gambar 2. 35 Prosedur umum dari black start (Goo, dkk, 2016)	56
Gambar 2. 36 Update rencana pemulihan setelah penambahan unit blackstart	56
Gambar 2. 37 Tampilan Program DIGSILENT 15.1	65
Gambar 2. 38 Tampilan icon program DIGSILENT 15.1	65
Gambar 3. 1 Sistem Interkoneksi Sumatera	71
Gambar 3. 2 One line diagram sistem interkoneksi Sumbagsel.....	72

Gambar 4. 1 Skema Pemulihan Oleh PLTG Unit 1	76
Gambar 4. 2 Grafik Penambahan Beban PLTG Terhadap Waktu	78
Gambar 4. 3 Single Line PLTG Unit 1	79

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Teknik Generator PLTG.....	66
Tabel 3.2 Pembangkit Listrik PT.PLN (Persero) Sektor Dalkit Keramasan.....	67
Tabel 3.3 Unit Pembangkit, Kapasitas Daya, Durasi Keluaran dan Jumlah Pemadaman Sistem Interkoneksi.....	68
Tabel 3.4 Total Daya Pembangkit dan Beban Sumbagsel.....	71
Tabel 4.1 Pembangkit Listrik PT.PLN (Persero) Sektor Dalkin Keramasan.....	75
Tabel 4.2 Crangking Power Pembangkit.....	77
Tabel 4.3 SOP Pengoprasian PLTG Keramasan Apa Bila Terjadi Gangguan.....	80
Tabel 4.4 Prosedur Persiapan.....	84
Tabel 4.5 Prosedur Start.....	85
Tabel 4.6 Prosedur Syncrone ke Sistem Secara AUTO.....	87
Tabel 4.7 Syncrone ke Sistem Secara Manual.....	88
Tabel 4.8 Prosedur Menaikan dan Menurunkan Beban MW.....	90
Tabel 4.9 Prosedur Stop Unit Secara Auto/Manual.....	91

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran Surat Izin Pengambilan Data
Lampiran Lembar Kesepakatan Bimbingan Pembimbing 1
Lampiran Lembar Kesepakatan Bimbingan Pembimbing 2
Lampiran Lembar 1 Konsultasi 1 Bimbingan Pembimbing 1
Lampiran Lembar 1 Konsultasi 2 Bimbingan Pembimbing 1
Lampiran Lembar 1 Konsultasi 1 Bimbingan Pembimbing 2
Lampiran Lembar 1 Konsultasi 2 Bimbingan Pembimbing 2
Lampiran Lembar Rekomendasi Ujian Laporan Akhir
Lampiran Lembar Pelaksanaan Revisi Laporan Akhir



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT. PLN (Persero) merupakan perusahaan BUMN (Badan Usaha Milik Negara) yang bergerak dibidang ketenagalistrikan, dari pembangkit hingga pendistribusian listrik untuk dapat dinikmati seluruh warga Indonesia. Listrik merupakan kebutuhan yang sangat penting bagi kehidupan manusia, selain sebagai sarana penerangan juga mendorong untuk meningkatkan kualitas kehidupan yang lebih baik, dan mendorong kegiatan perekonomian negara.

Blackout (padam total) merupakan keadaan gangguan meluas sistem tenaga listrik dimana seluruh unit pembangkit berhenti bekerja (trip) sehingga seluruh konsumen padam. Blackout memiliki dampak yang sangat merugikan baik secara materi maupun non materi. Untuk menghindarinya, saat ini telah berkembang metode pengaturan preventif dan pengaturan emergensi seperti load shedding dan islanding. Upaya pengaturan tersebut diharapkan mampu mengembalikan keseimbangan sistem setelah mengalami guncangan akibat gangguan. Namun jika gagal maka akan tetap terjadi blackout.

Berdasarkan kebutuhan daya pada proses start-up, unit dapat dibagi menjadi dua kelompok: Black Start unit, misalnya, PLTG dan Baterai, yang bisa melakukan start dengan sumber listrik internal, dan Non Black Start unit, seperti PLTU yang memerlukan sumber listrik eksternal.

Black Start merupakan pengoperasian unit saat keadaan tanpa ada tegangan dari luar yang bertujuan untuk mengisi tegangan ke sistem. Saat ini ketika terjadi blackout di sistem 150 KV ULPL Keramasan maka yang menjadi unit black start adalah Baterai batas minimum untuk melakukan proses start, hal ini tentu akan menjadi suatu masalah ketika terjadi blackout maka Baterai tidak bisa melakukan black start untuk mengisi tegangan ke sistem 150 kV ULPL Keramasan dan harus menunggu sumber tegangan dari sub sistem Sumatera Selatan Memaksimalkan PLTG Unit 1 menjadi black start tentu akan menjadi nilai plus untuk sistem 150 kV ULPL Keramasan yang mana akan bisa melakukan pemulihan sendiri jika Baterai tidak bisa melakukan start selain itu memaksimalkan PLTG Unit 2 menjadi



black start dapat mempercepat pemulihan sistem tenaga listrik pasca terjadi blackout.

1.2 Batasan Masalah

Agar penyusunan laporan akhir ini lebih terarah dan tidak menyimpang dari permasalahan yang ada, maka penulis membatasi ruang lingkup permasalahan yang akan dibahas adalah, data yang dipakai dalam penelitian hanya meliputi data pada simulasi pembangkit *black start* dalam mengalirkan daya hanya untuk ketersediaan daya *start* unit *non black start*. dan Mendapatkan dan membandingkan kontribusi aliran daya PLTG Unit 1 dan Baterai sebagai *black start* dalam mendukung pemulihan sistem pasca gangguan *blackout* total sistem 150 kV ULPL Keramasan.

1.3 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang dapat dikemukakan dalam Laporan Akhir ini antara lain :

1. Bagaimana Simulasi penerapan PLTG Unit 1 menjadi *black start*
2. Bagaimana Mendapatkan kontribusi Baterai dalam skema pemulihan sistem pasca *blackout*

1.4 Tujuan dan Manfaat

1.4.1 Tujuan

Berangkat dari latar belakang seperti yang telah diuraikan tersebut, adapun tujuan penelitian ini di antaranya :

1. Menganalisa Simulasi penerapan PLTG Unit 1 ULPL Keramasan menjadi *black start*
2. Menganalisa kontribusi Baterai dalam skema pemulihan sistem pasca *blackout*

1.4.2 Manfaat

Adapun manfaat penulisan laporan akhir ini sebagai berikut :

1. Mahasiswa memahami simulasi penerapan PLTG Unit 1 ULPL Keramasan menjadi *black start*
2. Mahasiswa memahami baterai dalam skema pemulihan sistem pasca *blackout*

1.5 Metode Penelitian

Perencanaan Penelitian ini terdiri atas beberapa tahapan pelaksanaan, yaitu



sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Tahapan ini mempelajari teori-teori dasar yang menunjang, yaitu tentang PLTG, *blackout*, *black start*, dan metode pemulihan sistem tenaga listrik

2. Pengumpulan Data Materi

- a. Data Primer

1. Melakukan pengamatan langsung dan pengambilan gambar terhadap penelitian yang akan dilaksanakan.

2. Melakukan wawancara dan diskusi secara langsung dengan pihak- pihak yang dapat memberikan masukan data yang berhubungan dengan penelitian yang dibuat.

- b. Data Sekunder

Melakukan pengumpulan referensi dari buku, jurnal, dan skripsi yang berhubungan dengan penelitian ini.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah penyelesaian permasalahan yang diuraikan maka sistematika penulisan laporan akhir ini adalah;

BAB 1 : PENDAHULUAN

Dalam bab ini berisikan tentang latar belakang, tujuan batasan permasalahan, metode pengumpulan data dan sistematika penulisan.

BAB 2 : TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini berisikan tentang teori-teori yang berhubungan dengan PLTG, baterai, *blackout*, *black start*, metode pemulihan sistem, dan pengaturan frekuensi.

BAB 3 : METODE PENELITIAN

Dalam bab ini berisikan data terkini sistem kv ULPL keramasan seperti skema singel Line Diagram sub sistem interkoneksi, load shedding, islanding, daya mampu unit serta data teknik generator

BAB 4 : PEMBAHASAN

Dalam bab ini berisikan pembahasan yakni berupa simulasi aliran daya dan standar operasional presedur (sop) pengoperasian start pltg unit 1



BAB 5 : KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan dari pembahasan serta saran-saran yang akan diutarakan



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)

PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas) merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan gas untuk memutar turbin dan generator. Turbin dan generator adalah dua benda dengan satu poros yang sama, jadi jika turbin berputar secara otomatis maka generator akan ikut berputar. Dan jika generator berputar, maka generator akan menghasilkan beda potensial pada medan magnetnya yang akan menghasilkan energi listrik.

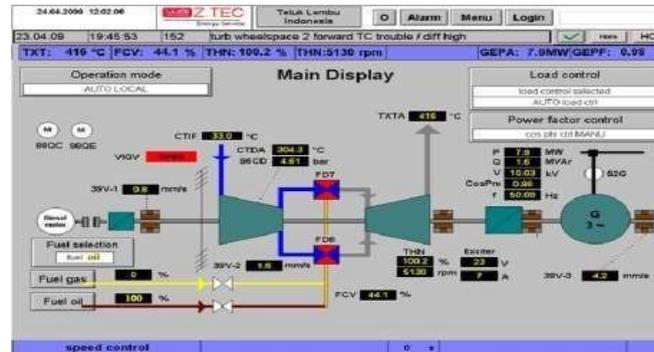
Dalam pengoperasiannya PLTG, secara prinsip hampir sama dengan PLTU. Hanya saja uap yang menjadi bahan bakar di PLTU di ganti dengan gas. Karena karakteristik uap dan gas secara umum berbeda, maka akan ada beberapa prinsip dasar yang berbeda antara turbin uap dan turbin gas. Selain itu, gas yang dipakai dalam PLTG bisa dibilang lebih mudah untuk disiapkan dari uap, sehingga sebuah PLTG bisa mulai berproduksi dari keadaan dingin dalam hitungan menit.

Satu yang menarik pada PLTG adalah gas yang keluar dari turbin biasanya masih cukup panas. Cukup panas` sehingga bila PLTG disebelah PLTU maka gas hasil proses di PLTG masih dapat digunakan untuk memanaskan boiler kepunyaan PLTU. Inilah kemudian dikenal dengan combine cycle, sebuah pembangkit yang terdiri dari komponen utama PLTG terdiri atas beberapa peralatan yang satu dengan yang lainnya terintegrasi sehingga menjadi satu unit lengkap yang dapat dioperasikan sebagaimana mestinya PLTG dan PLTGU.

Sebagai mesin pembangkit, sistem PLTG merupakan gabungan dari beberapa sub sistem yang bekerja secara terpadu sedemikian rupa sehingga PLTG mampu mengonversikan energi yang terkandung dalam bahan bakar dan udara menjadi energi listrik yang akan disalurkan ke konsumen. Pada umumnya PLTG memerlukan alat pemutar awal (*starting device*) untuk menjalankannya. *Starting device* dapat berupa mesin *diesel*, dan motor listrik. Fungsi dari *starting device* adalah untuk memutar kompresor pada saat *start up* untuk menghasilkan udara



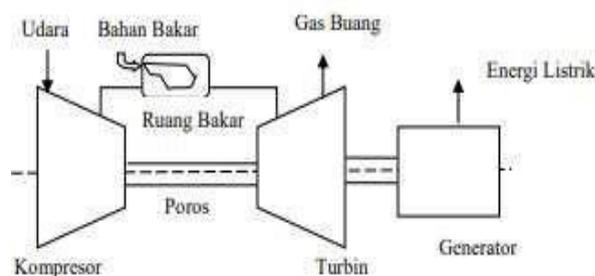
bertekanan sebelum masuk ke ruang pembakaran. Sistem PLTG seperti pada Gambar 2.1



Gambar 2. 1 Sistem PLTG

2.1.1 Prinsip Kerja PLTG

Gambar 2.2 menunjukkan prinsip kerja PLTG. Udara masuk ke kompresor untuk dinaikkan tekanannya menjadi kira-kira 13 kg/cm^2 . Kemudian udara tersebut dialirkan ke ruang bakar. Dalam suatu ruang bakar udara bertekanan tadi dicampur dengan bahan bakar dan dibakar. Apabila digunakan bahan bakar gas (BBG), maka gas dapat langsung dicampur dengan udara untuk dibakar, tetapi apabila digunakan bahan bakar minyak (BBM), maka BBM ini harus dijadikan kabut terlebih kemudian baru dicampur dengan udara untuk dibakar. Teknik mencampurkan bahan bakar dengan udara dalam ruangan bakar sangat mempengaruhi efisiensi pembakaran (Marsudi,2011).¹



Gambar 2. 2 Prinsip kerja PLTG

Pembakaran bahan bakar dalam ruang bakar menghasilkan gas bersuhu

¹ Marsudi, Dijiteng, 2011, pembangkitan Energi Listrik Edisi Kedua Erlangga, Jakarta



tinggi kira-kira 1300° C dengan tekanan 13 kg/cm². Gas hasil pembakaran ini kemudian dialirkan menuju turbin untuk disemprotkan kepada sudu-sudu turbin sehingga energy (*enthalpy*) gas ini dikonversikan menjadi energi mekanik dalam turbin penggerak generator (dan kompresor udara) dan akhirnya generator menghasilkan tenaga listrik. Karena pembakaran yang terjadi pada turbin gas mencapai suhu sekitar 1300° C maka sudu-sudu turbin beserta porosnya perlu didinginkan dengan udara

Selain masalah pendinginan, operasi turbin gas yang menggunakan gas hasil pembakaran dengan suhu 1300° C memberikan resiko korosi tinggi, yaitu bereaksinya logam kalium, vanadium, dan natrium yang terkandung di dalam bahan bakar dengan bagian-bagian turbin seperti sudu dan saluran gas (*hot gas path*). Oleh karena itu, bahan bakar yang digunakan tidak boleh mengandung logam-logam tersebut diatas melebihi batas tertentu. Kebanyakan pabrik pembuat turbin gas mensyaratkan bahan bakar dengan kandungan logam kalium, vanadium, dan natrium tidak boleh melampaui 1 part per mil (ppm). Di indonesia BBM yang bisa memenuhi syarat ini hanya minyak solar (High Speed Diesel) dan BBG gas juga memenuhi persyaratan di atas (Marsudi,2011).¹

2.1.2 Komponen Utama dan Komponen Pendukung PLTG

Turbin gas tersusun atas komponen-komponen utama seperti air inlet section, compressor section, combustion section, turbine section, dan exhaust section. Sedangkan komponen pendukung turbin gas adalah starting equipment, coupling dan accessory gear, fuel system, lube oil system, cooling system, dan beberapa komponen pendukung lainnya (Sumitomo, 1980). Berikut ini penjelasan tentang komponen utama turbin gas:²

1. Air Inlet

¹ Marsudi, Dijiteng, 2011, pembangkitan Energi Listrik Edisi Kedua Erlangga, Jakarta

² Sumitomo, 1980, MS-9000 service manual Inspection and Maintenance Vol. III, General Electric Company, Perpustakaan PT PJB Muara Karang



Salah satu hal yang perlu diperhatikan untuk menjaga *performance* gas turbin adalah menjaga kualitas udara masuk. *Inlet Air Filter* (IAF) pada *inlet air section* memiliki peranan yang sangat penting untuk menjaga kualitas dan kuantitas udara masuk (Puslitbang, 2015)¹.

Air Inlet berfungsi untuk menyaring kotoran dan debu yang terbawa dalam udara sebelum masuk ke kompresor. Bagian ini terdiri dari:

- a. Air Intel Housing, merupakan tempat udara masuk dimana didalamnya terdapat beberapa peralatan pembersih udara seperti inertia separator, filter dan lain-lain.
- b. Inertia Seperator, berfungsi untuk membersihkan debu-debu atau partikel yang terbawa bersama udara masuk.
- c. Pre Filter, merupakan penyaringan udara yang dipasang pada intel house pada bagian luar sebelum memasuki main filter.
- d. Main Filter, merupakan penyaringan utama yang terdapat pada bagian dalam intel house, udara yang telah melewati penyaring ini masuk ke dalam kompresor aksial.
- e. Intel Belmouth, berfungsi untuk membagi udara agar merata pada saat memasuki ruang kompresor.
- f. Intel Guide vane, yaitu blade yang dapat dibuka dan di tutup sehingga jumlah udara yang masuk ruangan kompresor dapat diatur sesuai dengan kebutuhan energi yang diperlukan (Purwanto,2012).²

Salah satu hal yang perlu diperhatikan untuk menjaga *performance* gas turbin adalah menjaga kualitas udara masuk. Intel Air Filter (IAF) pada intel air section memiliki peranan yang sangat penting untuk menjaga kualitas dan kuantitas udara masuk (Puslitbang,2012).³

¹ PT PLN Puslitbang, 2015 Lapangan Teknik Major Inspection & Relokasi PLTG sunyaragi Unit 1 Cirebon Jabar-Duri Riau, Maintenace service, Jakarta Barat

² Purwanto, edi 2012, analisa Vibrasi Turbin Pltg duri uit 2, PT PLN (Persero) Jakarta

³ PT PLN Puslitbang, 2012 Lapangan Teknik Major Inspection & Relokasi PLTG sunyaragi Unit 1 Cirebon Jabar-Duri Riau, Maintenace service, Jakarta Barat



2. Compressor Section

Komponen utama pada bagian ini adalah aksial flow compressor, berfungsi untuk mengkompresikan udara yang berasal dari inlet air section hingga bertekanan tinggi sehingga pada saat terjadi pembakaran dapat menghasilkan gas panas berkecepatan tinggi yang dapat menimbulkan daya output turbin yang besar. Aksial flow compressor terdiri dari dua bagian yaitu:

a. Compressor Rotor Assembly.

Merupakan bagian dari kompresor aksial yang berputar pada porosnya. Rotor ini memiliki 17 tingkat sudu yang mengompresikan aliran udara secara aksial dari 1 atm menjadi 17 kalinya 8 sehingga diperoleh udara yang bertekanan tinggi. Bagian ini tersusun dari wheels, stubshaft, tie bolt dan sudu-sudu yang disusun kosentris di sekeliling sumbu rotor

b. Compressor Stator

Merupakan bagian dari casing gas turbin yang terdiri dari:

- Inlet Casing, merupakan bagian dari casing yang mengarahkan udara masuk ke inlet bellmouth dan selanjutnya masuk ke inlet guide vane.
- Forward Compressor Casing, bagian casing yang didalamnya terdapat empat stage kompresor blade.
- Aft Casing, bagian casing yang didalamnya terdapat compressor blade tingkat 5-10.
- Discharge Casing, merupakan bagian casing yang berfungsi sebagai tempat keluarnya udara yang telah dikompresi

3. Combustion Section

Pada bagian ini terjadi proses pembakaran antara bahan bakar dengan fluida kerja yang berupa udara bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi. Hasil pembakaran ini berupa energi panas yang diubah menjadi energi kinetik dengan mengarahkan udara panas tersebut ke transition pieces yang juga berfungsi sebagai nozzle. Fungsi dari keseluruhan sistem adalah untuk mensuplai energi panas ke siklus turbin. Sistem pembakaran ini terdiri dari komponen-komponen berikut yang jumlahnya bervariasi tergantung besar frame dan penggunaan turbin gas. Komponen-



komponen itu adalah :

- Combustion Chamber, berfungsi sebagai tempat terjadinya pencampuran antara udara yang telah dikompresi dengan bahan bakar yang masuk.
- Combustion Liners, terdapat didalam combustion chamber yang berfungsi sebagai tempat berlangsungnya pembakaran.
- Fuel Nozzle, berfungsi sebagai tempat masuknya bahan bakar ke dalam combustion liner.
- Ignitors (Spark Plug), berfungsi untuk memercikkan bunga api ke dalam combustion chamber sehingga campuran bahan bakar dan udara dapat terbakar.
- Transition Pieces, berfungsi untuk mengarahkan dan membentuk aliran gas panas agar sesuai dengan ukuran nozzle dan sudu-sudu turbin gas.
- Cross Fire Tubes, berfungsi untuk meratakan nyala api pada semua combustion chamber.
- Flame Detector, merupakan alat yang dipasang untuk mendeteksi proses pembakaran terjadi.

4. Turbin Section

Turbin merupakan tempat terjadinya konversi energi kinetik menjadi energi mekanik yang digunakan sebagai penggerak kompresor aksial dan perlengkapan lainnya. Dari daya total yang dihasilkan kira-kira 60% digunakan untuk memutar kompresornya sendiri, dan sisanya digunakan untuk kerja yang dibutuhkan (Purwanto, 2012)¹.

Komponen-komponen pada turbin section adalah sebagai berikut :

- Turbin Rotor Case
- First Stage Nozzle, yang berfungsi untuk mengarahkan gas panas ke first stage turbine wheel.
- First Stage Turbine Wheel, berfungsi untuk mengkonversikan energi kinetik dari aliran udara yang berkecepatan tinggi menjadi energi mekanik berupa

¹ Purwanto, edi 2012, analisa Vibrasi Turbin Pltg dari uit 2, PT PLN (Persero) Jakarta



putaran rotor.

- Second Stage Nozzle dan Diafragma, berfungsi untuk mengatur aliran gas panas ke second stage turbine wheel, sedangkan diafragma berfungsi untuk memisahkan kedua turbin wheel.
- Second Stage Turbine, berfungsi untuk memanfaatkan energi kinetik yang masih cukup besar dari first stage turbine untuk menghasilkan kecepatan putar rotor yang lebih besar.

5. Exhaust Section

Exhaust section adalah bagian akhir turbin gas yang berfungsi sebagai saluran pembuangan gas panas sisa yang keluar dari turbin gas. Exhaust section terdiri dari beberapa bagian yaitu : Exhaust Frame Assembly dan Exhaust gas keluar dari turbin gas melalui exhaust diffuser pada exhaust frame assembly, lalu mengalir ke exhaust plenum dan kemudian didifusikan dan dibuang ke atmosfer melalui exhaust stack, sebelum dibuang ke atmosfer gas panas sisa tersebut diukur dengan exhaust thermocouple dimana hasil pengukuran ini digunakan juga untuk data pengontrolan temperatur dan proteksi temperatur trip. Pada exhaust area terdapat 18 buah termokopel yaitu, 12 buah untuk temperatur kontrol dan 6 buah untuk temperatur trip.

6. Generator

Generator merupakan suatu peralatan yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Energi mekanik di peroleh dari energi mekanik yang dihasilkan oleh putaran turbin, selanjutnya energi mekanik tersebut digunakan untuk memutar poros rotor generator, selanjutnya dari putaran poros rotor generator ini menghasilkan energi listrik.

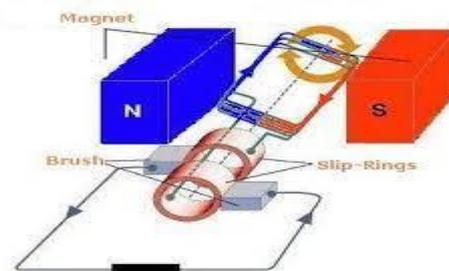
Prinsip kerja dari generator sesuai dengan hukum Lens, yaitu arus listrik yang diberikan pada stator akan menimbulkan momen elektromagnetik yang bersifat melawan putaran rotor sehingga menimbulkan EMF pada kumparan rotor, pada generator terdapat generator ac dan generator dc :

a. Generator AC

Generator arus bolak-balik yang kadang-kadang disebut dengan generator



sinkron atau alternator adalah sebuah peralatan listrik yang berfungsi untuk mengubah energi gerak (mekanis) menjadi energi listrik AC dimana kecepatan putaran medan dan kecepatan putaran rotornya sama atau tidak ada slip. Kumparan medan pada generator sinkron terletak pada rotornya sedangkan kumparan jangkarnya terletak pada stator. Berikut contoh generator AC yang ditunjukkan pada gambar 2.3 di bawah ini:



Gambar 2. 3Generator AC

Pada mesin arus searah, kumparan medan yang berbentuk kutub sepatu merupakan stator (bagian tidak berputar) dan kumparan jangkar merupakan rotor (bagian yang berputar) bila kumparan jangkar berputar dalam medan magnet, akan dibangkitkan tegangan (ggl) yang berubah-ubah arah setiap setengah putaran, sehingga merupakan tegangan arus bolak-balik. Untuk tegangan arus searah diperlukan alat penyearah yang disebut komutator dan sikat.

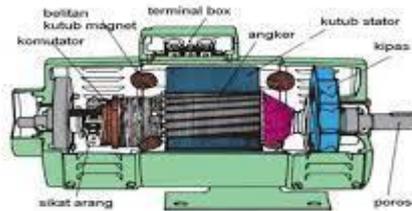
b. Generator DC

Generator DC merupakan sebuah perangkat mesin listrik dinamis yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Prinsip pembangkitan tegangan induksi oleh sebuah generator diperoleh melalui dua cara:

- Dengan menggunakan cincin-seret, menghasilkan tegangan induksi bolak-balik
- Dengan menggunakan komutator, menghasilkan tegangan DC



Generator DC



Gambar 2. 4 Generator DC

7. Sistem Bahan Bakar

Pada PLTG sistem bahan bakar merupakan salah satu sistem yang vital peranannya. Bahan bakar merupakan fluida di samping fluida udara yang nantinya akan diubah energinya sehingga kombinasi antara bahan bakar dan udara akan menghasilkan energi yang mampu memutar turbin. Pada PLTG ada dua jenis bahan bakar yang dapat digunakan yakni bahan bakar cair dan bahan bakar gas.

8. Sistem Pelumasan

Sistem pelumasan pada PLTG merupakan suatu sistem pada PLTG yang mendistribusikan minyak pelumas ke bearing dan untuk supply ke power oil system dan jacking oil system. Adapun minyak pelumas memiliki fungsi sebagai pendingin, perapat, peredam kejut, dan untuk mengurangi korosi.

9. Sistem Air Pendingin

Sistem air pendingin merupakan subsistem PLTG yang mendinginkan beberapa komponen PLTG diantaranya diesel start, lube oil heat exchanger, dan pre cooler. Prinsip kerja sistem air pendingin ini adalah menyirkulasikan air yang berada pada tangki air utama menuju komponen-komponen yang membutuhkan air pendingin seperti yang disebutkan di atas. Air yang telah digunakan untuk mendinginkan komponen-komponen tersebut kemudian didinginkan kembali oleh radiator.

10. Sistem Udara pendingin dan perapat

Di samping menghasilkan udara bertekanan, kompresor juga menghasilkan



udara pendingin dan perapat. Udara tersebut digunakan untuk mendinginkan rotor, poros, komponen ruang pembakaran, perapat pada inlet kompresor, dan perapat pada bearing mencegah udara panas masuk ke bagian dalam bearing.

11. Turbin

Turbin adalah sebuah mesin berputar yang mengambil energi dari aliran fluida. Turbin sederhana memiliki satu bagian yang bergerak, “asembli rotorblade” fluida yang bergerak menjadikan baling-baling berputar dan menghasilkan energi untuk menggerakkan rotor. Contoh turbin awal adalah kincir angin dan roda air.

Turbin gas, uap dan air biasanya memiliki “casing” sekitar baling-baling yang memfokus dan mengontrol fluid. “casing” dan baling-baling mungkin memiliki geometri variabel yang dapat membuat operasi efisien untuk beberapa kondisi aliran fluida, gambaran generator turbin secara umum dapat dilihat pada gambar 2.5 di bawah ini:



Gambar 2. 5 Turbin Gas

2.1.3 Proses Pengoperasian PLTG

Proses yang terjadi pada PLTG saat start up adalah sebagai berikut :

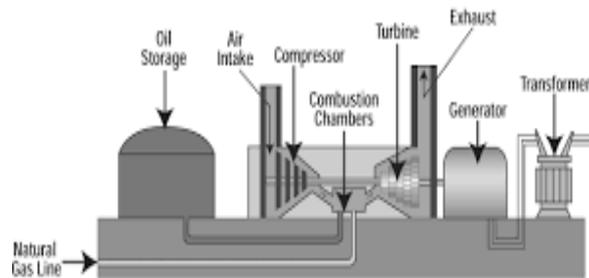
- a. Persiapan dan pemeriksaan sebelum start.
- b. Ready to start
- c. Starting device energized, terhubung ke turbin dan start
- d. Bahan bakar diinjeksikan ke ruang bakar dan terjadi penyalan.
- e. Periode warming up, bahan bakar ditambah dan putaran naik
- f. PLTG mampu berputar sendiri, starting device akan lepas dan berhenti.



- g. Putaran bertambah dan mencapai Full Speed No Load (FSNL)
- h. Sinkronisasi generator
- i. Pembebanan

2.1.4 Prinsip Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG)

Turbin gas suatu PLTG berfungsi untuk mengubah energi yang terkandung di dalam bahan bakar menjadi mekanis. Fluida kerja untuk memutar turbin gas adalah gas panas yang diperoleh dari proses pembakaran. Proses pembakaran memerlukan tiga unsur utama yaitu bahan bakar, udara dan panas. Skema proses pembangkitan generator turbin gas (GTG) dapat dilihat pada gambar 2.6 di bawah ini:



Gambar 2. 6 Skema Proses Pembangkitan Generator Turbin Gas

Udara masuk kedalam kompresor melalui saluran masuk udara (Air Intake). Kompresor berfungsi untuk menghisap dan menaikkan tekanan udara tersebut, sehingga temperatur udara juga meningkat. Kemudian udara bertekanan ini masuk kedalam ruang bakar (Combustion Chamber). Di dalam ruang bakar dilakukan proses pembakaran dengan cara mencampurkan udara bertekanan dan bahan bakar. Dalam proses pembakaran ini bahan bakar disuplai oleh pompa bahan bakar (Fuel Oil pump) apabila digunakan bahan bakar minyak, atau oleh kompresor gas apabila menggunakan bahan bakar gas alam. Pada umumnya kompresor gas disediakan oleh pemasok gas tersebut.

Proses pembakaran tersebut berlangsung dalam keadaan tekanan konstan sehingga dapat dikatakan ruang bakar hanya untuk menaikkan temperatur. Gas hasil



pembakaran tersebut dialirkan ke turbin gas melalui suatu nozel yang berfungsi untuk mengarahkan aliran tersebut ke sudu-sudu turbin. Daya yang dihasilkan oleh turbin gas tersebut digunakan untuk memutar kompresornya sendiri dan memutar beban lainnya seperti generator listrik. Setelah melewati turbin ini gas tersebut akan dibuang keluar melalui saluran buang (exhaust).

Secara umum proses yang terjadi pada suatu sistem turbin gas adalah sebagai berikut:

1. Pemampatan (compression) udara di hisap dan dimampatkan
2. Pembakaran (combustion) bahan bakar dicampurkan ke dalam ruang bakar dengan udara kemudian di bakar.
3. Pemuai (expansion) gas hasil pembakaran memuai dan mengalir ke luar melalui nozel (nozzle).
4. Pembuangan gas (exhaust) gas hasil pembakaran dikeluarkan lewat saluran pembuangan.

Pada kenyataannya, tidak ada proses yang selalu ideal, tetap terjadi kerugian-kerugian yang dapat menyebabkan turunnya daya yang dihasilkan oleh turbin gas dan berakibat pada menurunnya performa turbin gas itu sendiri. Kerugian-kerugian tersebut dapat terjadi pada ketiga komponen sistem turbin gas. Sebab-sebab terjadinya kerugian antara lain:

1. Adanya gesekan fluida yang menyebabkan terjadinya kerugian tekanan (pressure losses) di ruang bakar.
2. Adanya kerja yang berlebih waktu proses kompresi yang menyebabkan terjadinya gesekan antara bantalan turbin dengan angin.
3. Berubahnya nilai C_p dari fluida kerja akibat terjadinya perubahan temperatur dan perubahan komposisi kimia dari fluida kerja.
4. Adanya mechanical loss.

2.1.5 Keunggulan Dan Kelemahan PLTG

Dari segi operasi, unit PLTG tergolong unit yang masa startnya singkat yaitu



sekitar 15 ~ 30 menit dan umumnya dapat distart tanpa pasokan daya listrik dari luar, karena menggunakan mesin diesel sebagai penggerak awalnya. (Diesel engine motor start). Dari segi pemeliharaan, unit PLTG mempunyai selang waktu pemeliharaan (time between overhaul) yang pendek yaitu sekitar 4000 ~ 5000 jam operasi. Selain ukuran jam operasi juga dapat dipakai jumlah start-stop sebagai acuan dalam penentuan waktu overhaul. Jadi walaupun belum mencapai 5000 jam operasi tetapi telah mencapai 300 kali start-stop maka unit PLTG tersebut sudah harus di-inspeksi untuk pemeliharaan. Dalam proses inspeksi, hal-hal yang perlu diperhatikan adalah bagian-bagian yang terkena aliran gas hasil pembakaran yang suhunya bisa mencapai 1.300 oC seperti ruang bakar, saluran gas panas (hot-gas-path) dan juga sudu-sudu turbin. Bagian-bagian ini umumnya mengalami kerusakan (retak) sehingga perlu dilas atau diganti bila perlu.

Proses start-stop akan mempercepat proses kerusakan (keretakan) karena proses start-stop menyebabkan proses pemuaihan dan pengerutan yang tidak kecil pada bagianbagian yang disebutkan di atas. Hal ini disebabkan sewaktu unit PLTG dingin suhunya sama dengan suhu ruangan yaitu sekitar 30 oC namun pada saat beroperasi suhunya dapat mencapai hingga 1.300 oC, demikian pula sebaliknya. Pada saat unit PLTG shutdown, porosnya harus tetap diputar secara perlahan untuk menghindari terjadinya pembengkokan pada poros hingga suhunya dianggap cukup aman untuk itu. Dengan memperhatikan buku petunjuk dari pabrik, ada unit PLTG boleh dibebani lebih tinggi 10% dari ratingnya untuk waktu 2 jam yang diistilahkan sebagai Peak Operation. Pengoperasian dalam kondisi seperti ini perlu diperhitungkan sebagai proses pemendekan selang waktu inspeksi dan pemeliharaan karena peak operation ini menambah keausan yang terjadi pada turbin sebagai akibat kenaikan suhu operasi.

Dari segi aspek lingkungan, yang perlu mendapat perhatian adalah masalah kebisingan, jangan sampai melebihi ambang batas yang diizinkan. Masalah lainnya adalah masalah kebocoran instalasi bahan bakar yang perlu mendapat perhatian khususnya dari bahaya kebakaran.

Unit PLTG umumnya merupakan unit pembangkit dengan efisiensi yang

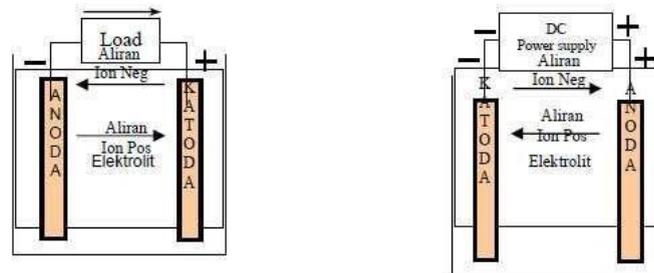


paling rendah, yaitu sekitar 15 ~ 25 % saja. Sementara ini sedang dikembangkan penggunaan Aero Derivative Gas Turbine yaitu turbin gas pesawat terbang yang dimodifikasi menjadi turbin penggerak generator. Hal ini dilakukan karena untuk daya output yang sama diperoleh dimensi yang lebih kecil.

2.2 Baterai

2.2.1 Sistem Baterai

Baterai merupakan suatu sel listrik yang terdiri dari dua macam plat elektroda yaitu elektroda positif dan elektroda negative serta larutan elektrolit sebagai media penghantar didalamnya yang dapat menghasilkan energi listrik dari adanya proses elektrokimia berasal dari ketiga komponen baterai tersebut. Proses elektrokimia yang terjadi pada baterai adalah dapat berkebalikan yang berarti terdapat 2 kondisi yang dialami baterai yaitu proses dimana energi kimia yang dikonversikan menjadi energi listrik (*discharging*) dan proses energi listrik yang dikonversikan menjadi energi kimia (*charging*). Proses *charging* dan *discharging* yang berlangsung dilakukan dengan cara regenerasi dari elektroda-elektroda yang digunakan, dimana arus listrik akan dialirkan pada polaritas yang berlainan..



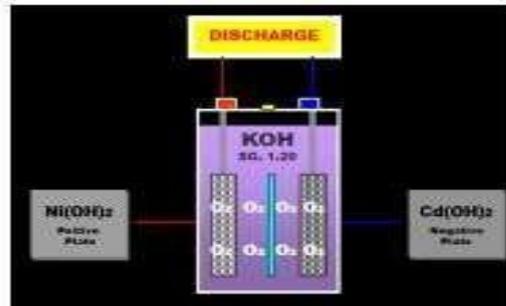
Gambar 2. 7 Proses Charging dan Discharging

2.2.2 Prinsip Kerja Baterai

- a. Elektroda pada baterai terdiri dari elektroda positif dan elektroda negative. Ketika proses pengosongan (*discharging*) seperti yang terlihat pada skema di bawah Saat sel baterai dihubungkan dengan beban maka, elektron akan mengalir dari elektroda negatif (anoda) melewati beban menuju elektroda

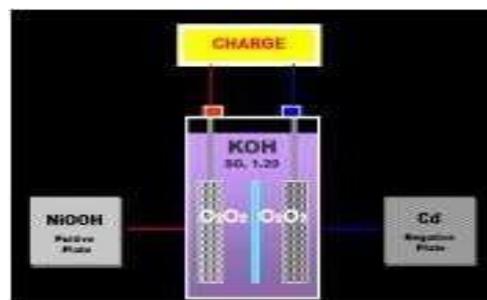


positif (katoda) baterai, kemudian ion-ion negatif mengalir ke elektroda negatif (anoda) dan ion-ion positif mengalir ke elektroda positif (katoda).



Gambar 2. 8 Discharging / Pengosongan

- b. Pada proses pengisian di bawah. Bila sel dihubungkan dengan suplai maka, elektroda positif menjadi anoda dan elektroda negatif menjadi katoda dan proses kimia yang terjadi adalah sebagai berikut:
- Aliran electron menjadi terbalik, mengalir dari anoda melalui power suplai ke katoda.
 - Ion-ion negatif mengalir dari katoda ke anoda.
 - Ion-ion positif mengalir dari anoda ke katoda



Gambar 2. 9 Charging / Pengisian

2.2.3 Jenis-jenis Baterai

a. Baterai Asam

Baterai asam timbal merupakan jenis baterai isi ulang pertama yang ditemukan oleh fisikawan Prancis Gaston Plante pada tahun 1859. Meskipun baterai ini tidak cocok untuk menyimpan banyak energi (karena rasio energi:berat yang



kecil), baterai ini memiliki lonjakan arus yang tinggi ketika pertama kali dinyalakan (*inrush current*). Akibat sifat ini, baterai ini digunakan pada kendaraan bermotor untuk menyediakan arus tinggi saat proses menyalakan mesin (*starter*).

Karena baterai jenis ini lebih murah dibanding dengan baterai yang berteknologi lebih baru, baterai asam timbal banyak digunakan (meskipun *inrush current* tidak terlalu dibutuhkan, ataupun baterai jenis lain memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi). Baterai asam timbal digunakan sebagai sumber listrik cadangan pada tower BTS, rumah sakit, dan pembangkit

Baterai asam bahan elektrolitnya adalah larutan asam belerang (sulfuric acid = H_2SO_4). Didalam baterai asam elektroda-elektrodanya terdiri dari plat-plat timah peroksida PbO_2 (lead peroxide) sebagai anoda (kutub positif) dan timah murni Pb (lead sponge) sebagai katoda (kutubnegatif).



Gambar 2. 10 Baterai Asam

Ciri-ciri umum Baterei Asam (tergantung pabrik pembuat) sebagai berikut:

- Tegangan nominal per sel 2 volt
- Nilai berat jenis elektrolit sebanding dengan kapasitas baterei semakin tinggi suhu elektrolit maka semakin rendah berat jenisnya dan sebaliknya.
- Nilai standar berat jenis elektrolit tergantung pada pabrik pembuatnya.
- Umur tegangan tergantung pada operasi dan pemeliharaan
- Tegangan pengisian per sel
- Tegangan akhir pengosong per sel (discharge) 2,0-1,8 volt.
 - Pengisian secara terapung (floating) 2,10-2,20 volt.
 - Pengisian secara cepat (equalizing) 2,25-2,30 volt.



- Pengisian dengan harga tinggi (boosting) 2,35-2,40 volt.

b. Baterai Alkali

Baterai alkali bahan elektrolitnya adalah larutan alkali (potassium hidroxide) terdiri dari:

- Nickel-Iron Alkaline Baterai (Ni-Fe baterai)
- Nickel Cadium Alkaline Baterai (Ni-Cd baterai)



Gambar 2. 11 Baterai Alkali

Umum yang banyak diinstalasi PLN adalah baterai alkali nickel- cadmium (Ni-Cd). Ciri-ciri umum (tergantung pabrik pembuatnya)

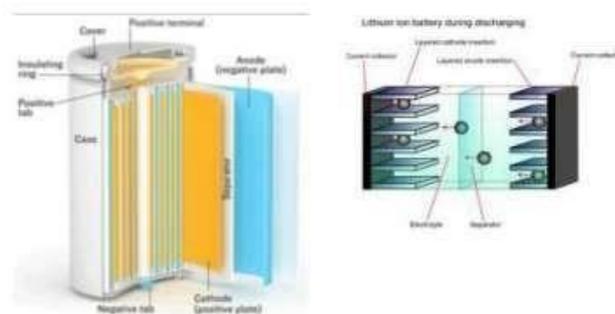
- Tegangan secara terapung (floating) 1,40-1,44 volt
- Nilai berat jenis elektrolitnya tidak sebanding dengan kapasitas baterei
- Umur baterei tergantung pada operasi dan pemeliharaan
- Tegangan pengosongan akhir (end voltage) per sel 1 volt
- Tegangan pengisian
 - Pengisian secara terapung (floating) 1,40-1,44 volt
 - Pengisian secara cepat (equalizing) 1,50-1,60 volt
 - Pengisian dengan harga tinggi (boosting) 1,65-1,70 volt

c. Baterai Kering/ Lithium

Baterai kering / lithium adalah baterai yang digerakan oleh ion lithium. Anoda dan katoda baterai lithium-ion terbuat dari karbon dan oksida lithium. Sedangkan elektrolit terbuat dari garam lithium yang dilarutkan dalam pelarut organik. Bahan pembuat anoda sebagai besar merupakan garfit sedangkan katoda



terbuat dari salah satu bahan berikut: lithium kobalt oksida (LiCoO_2) lithium besi fosfat (LiFePO_4) atau lithium oksida mangan (LiMn_2O_4). Elektrolit yang umum digunakan adalah garam lithium seperti lithium hexafluorophosphate (LiPF_6) lithium tetrafluoroborate (LiBF_4), dan lithium perklorat (LiClO_4) yang dilarutkan dalam pelarut organik seperti etilen karbonat, dimetil karbonat, dan dietil karbonat.



Gambar 2. 12 Baterai Kering/ Lithium

2. 2.4 Bagian Utama Baterai

a. Elektroda

Tiap sel baterai terdiri dari 2 (dua) elektroda, yaitu elektroda positif dan negatif, direndam dalam suatu larutan kimia yang berfungsi sebagai media perpindahan elektron pada saat berlangsung *charge discharge*.

Elektroda positif dan negatif tersusun dari beberapa *Grid* yang berupa rangka besi berfungsi sebagai tempat material aktif. Material aktif berfungsi sebagai material yang bereaksi secara kimia untuk menghasilkan energi listrik.



Gambar 2. 13 a) Plat Grid, b) Material Aktif, c) Grid Rangka Besi, d) Terakit Dalam Plastic Container



b. Elektrolit

Elektrolit adalah cairan atau larutan senyawa kimia yang berfungsi menghantarkan arus listrik, larutan tersebut dapat menghasilkan muatan listrik positif dan negatif. Bagian yang bermuatan positif tersebut ion positif dan bagian yang bermuatan negatif disebut ion negatif. Sel Baterai berfungsi sebagai tempat untuk menyimpan elektrolit dan elektroda. Bahan bejana (*container*) yang digunakan terdiri dari 2 (dua) macam:

1. Larutan asam sulfat (H_2SO_4) digunakan pada baterai asam.
2. Larutan kalium hidroxide (KOH) digunakan pada baterai alkali.

c. Sel Baeterei

Sel baterai berfungsi sebagai tempat untuk menyimpan elektrolit dan elektroda. Bahan bejana (*container*) yang digunakan terdiri dari 2 (dua) macam:

- Steel Container

Sel baterai dengan bejana (*container*) terbuat dari steel ditempatkan dalam rak kayu, hal ini untuk menghindari terjadi hubung singkat antar sel baterai dan hubung tanah.

- Plastik Container

Sel baterai dengan bejana (*container*) terbuat dari plastic ditempatkan dalam rak besi yang diisolasi, hal ini untuk menghindari terjadi hubung singkat antar sel baterai atau hubung tanah apabila terjadi kerusakan/kebocoran elektrolit baterai.



Gambar 2. 14 Plastik Cointainer dan Steel Container

d. Terminal dan Penghubung Baterai



Terminal dan klem pada sel baterai berfungsi untuk menghubungkan kutub-kutub sel baterai, menggunakan bahan *nickel plated steel* atau *cooper* sedangkan penghubung antar unit atau grup baterai menggunakan bahan *nickel plated* atau berupa kabel yang terisolasi (*Insulated Flexible Cable*).



Gambar 2. 15 Terminal Penghubung Baterai

e. Ruang Baterai

Pada pemasangan baterai di ruang tertutup, maka diperlukan adanya sirkulasi udara yang cukup di ruang baterai tersebut. Selain dilengkapi dengan exhaust fan juga membutuhkan ventilasi udara yang masuk. Ventilasi udara masuk ini harus di desain khusus (dilengkapi penyaring udara) agar ruang baterai tidak mudah kotor dan oksigen (eksplosif) yang timbul akibat proses kimia baterai. Untuk ventilasi atau volume udara yang mengalir adalah sebagai berikut:

- Untuk instalasi di darat (Land Instalation)

$$Q = 55 \times n \times I \quad (2.1)$$

- Untuk instalasi di laut (Marine Instalation)

$$Q = 110 \times n \times I \quad (2.2)$$

Keterangan :

Q = Volume udara (Liter/jam)

N = Jumlah sel baterei

I = Arus pengisian pada akhir pengisian atau dalam kondisi pengisian floating (Ampere)



Gambar 2. 16 Ruang Baterei

f. Kontruksi Baterei

Di dalam baterei terdapat elektrolit asam sulfat, elektroda positif dan negatif dalam bentuk plat. Plat-plat dibuat dari timah atau berasal dari timah. Karena itu materi tipe ini sering disebut baterei timah. Ruangan didalamnya dibagi menjadi beberapa bagian sel (biasanya 6 sel, untuk baterei mobil) dan didalam masing-masing sel terdapat beberapa elemen yang terendam didalam elektrolit.

Konstruksi dari baterai terdiri dari beberapa bagian, antara lain elektrolit, plat positif, plat negatif, separator, sel baterai, penghubung sel, pembatas sel, kotak baterai, tutup baterai dan terminal baterai.



Gambar 2. 17 Kontruksi dan bagian-bagian baterei

Baterai terdiri dari beberapa komponen antara lain kotak baterai, terminal baterai, elektrolit baterai, lubang elektrolit baterai, tutup baterai dan sel baterai. dalam satu baterai terdiri dari beberapa sel baterai, tiap sel menghasilkan tegangan 2-2,2 V. Baterai 12 V mempunyai 6 sel baterai dirangkai secara seri.

Tiap sel baterai mempunyai lubang untuk mengisi elektrolit baterai, lubang



tersebut ditutup dengan tutup baterai, pada tutup terdapat lubang ventilasi yang digunakan untuk mengalirkan uap dari elektrolit ke baterai. Tiap sel baterai terdapat plat positif, separator dan plat negatif, plat positif berwarna coklat gelap (dark brown) dan plat negatif berwarna abu-abu metalik (metallic gray).

g. Kotak Baterai

Kotak baterai merupakan bagian yang berfungsi untuk menampung elektrolit dan elemen baterai. Pada baterai, ruangan di dalam kotak baterai dibagi menjadi 6 bagian atau 6 sel.

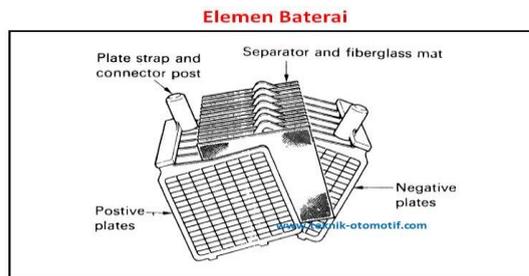
Pada kotak baterai juga terdapat tanda batas permukaan atas (upper level) dan tanda permukaan bawah (lower level). Selain itu, juga terdapat spesifikasi baterai yang ditulis pada kotak baterai.



Gambar 2. 18 kotak Baterai

h. Plat Baterai

Di dalam baterai terdapat dua jenis plat yaitu plat positif dan plat negatif. Kedua plat ini memiliki grid yang terbuat dari antimoni dan paduan timah. Bahan yang digunakan untuk membuat plat positif adalah antimoni yang dilapisi dengan lapisan aktif oksida timah (lead dioxide, PbO_2) yang memiliki warna coklat. Sedangkan plat negatif terbuat dari sponge lead (Pb) yang memiliki warna abu-abu. Salah satu hal yang mempengaruhi kemampuan dari baterai untuk dapat mengalirkan arus adalah jumlah dan ukuran dari plat-plat baterai. Semakin besar plat-plat baterai dan semakin banyak plat-plat baterai maka semakin besar pula arus yang dapat dihasilkan.



Gambar 2. 19 Plat Baterai

i. Separator

Separator atau penyekat merupakan komponen yang berada di dalam kotak baterai. Separator ini terletak di antara plat positif dan plat negatif. Pada separator terdapat pori-pori yang dapat memungkinkan elektrolit dapat melewatinya. Bagian separator ini juga berfungsi untuk mencegah terjadinya hubungan singkat antara plat positif dengan plat negatif.

j. Sel baterai

Sel baterai atau elemen baterai terdiri dari plat positif dan plat negatif dan diantara kedua plat tersebut dibatasi dengan separator. Sel-sel yang terdapat dalam baterai saling dihubungkan secara seri sehingga jumlah dari sel-sel baterai akan menentukan besar tegangan dari baterai tersebut. Satu buah sel dapat menghasilkan tegangan sekitar 2,1 volt sehingga pada baterai yang memiliki 6 buah sel, maka tegangan pada baterai tersebut sekitar 12,6 volt.

k. Penghubung sel

Penghubung sel atau cell connector merupakan bagian yang menghubungkan plat-plat yang ada di dalam baterai. Penghubung antara plat-plat negati dan positif dihubungkan secara seri.

l. Pemisah sel

Pemisah sel atau cell partition merupakan bagian di dalam baterai yang berfungsi untuk memisahkan tiap-tiap sel yang ada di dalam baterai.

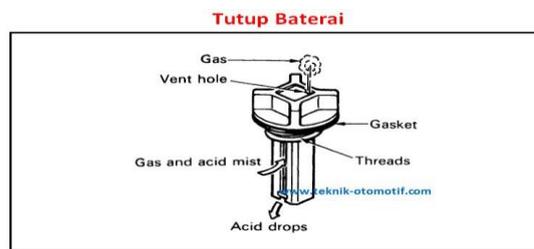
m. Terminal baterai

Terminal baterai terdiri dari dua buah terminal yaitu terminal positif dan terminal negatif. Terminal-terminal ini terletak pada bagian atas baterai.



n. Tutup baterai

Tutup baterai berfungsi untuk menutup lubang pengisian elektrolit baterai. Selain itu, pada tutup baterai terdapat lubang ventilasi yang berfungsi untuk keluarnya gas hidrogen yang terbentuk saat proses pengisian sehingga gas tersebut tidak berada di dalam baterai. Bila gas hidrogen tidak dikeluarkan maka dapat berakibat baterai meledak.



Gambar 2. 20 tutup baterei

2.2.5 klasifikasi baterei

2.2.5.1 Menurut kapasitas baterei

Kapasitas baterei dinyatakan sebagai kemampuan baterei untuk memberikan energi listrik, dengan tegangan waktu tertentu yang dinyatakan pada Amper- hour (AH) kapasitas baterei dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$C = I \times t \quad (2.3)$$

C = Kapasitas baterei (ah)

I = Arus pengujian (A)

T = Waktu pengujian (hour)

Kapasitas baterei ditentukan dengan menghitung semua faktor yang menyangkut penurunannya selama dipakai, perubahannya terhadap perubahan suhu dan jatuh tegangan, keperluan kapasitas yang diperlukan dengan memperkirakan beban terus-menerus dan beban terputus-putus (continous and intermitten load) yang harus dilayani selama terputusnya pelayanan normal, serta lama nya pemutusan pelayanan.



1. Berdasarkan kapasitasnya suatu baterai dibedakan menjadi 2 macam, yaitu Kapasitas dengan harga rendah/menengah.

Besarnya kapasitas baterai sampai 235Ah, dengan lama pengosongan selama 8 jam pada suhu 25°C. Baterai ini dapat digunakan sebagai sumber searah DC untuk :

- Alat kontrol, tanda-tanda isyarat
- Telekomunikasi
- Proteksi
- Penerangan darurat
- Sumber tenaga DC motor PMT,PMS

2. Kapasitas dengan harga tinggi.

Baterai ini mempunyai kapasitas 235 Ah sampai 450 Ah dengan lama pengosongan 5 jam pada suhu 25°C. Baterai ini juga dapat digunakan sebagai sumber DC untuk :

- Menjalankan motor listrik
- Penerangan darurat

2.2.5.2 Rangkaian baterai dan pengisian baterai

Untuk memberikan arus listrik pengisian (charging current) pada baterai diperlukan suatu sumber listrik arus searah (DC) Sumber arus-searah ini didapatkan dari penyearah (rectifier) atau pengisian baterai (baterai charger). Alat pengisi baterai ini harus dihubungkan ke baterai dengan hubungan kutub-kutub yang sama. Pada rangkaian kerja baterai ini penyearah (rectifier) digunakan pada rangkaian normal yang dihubungkan ke beban, sedangkan pengisi baterai (battery charger) digunakan untuk mengisi baterai dan juga mensupply beban. Macam kerja rangkaian baterai dengan penyearah (rectifier), dapat dibagi dalam beberapa bagian :

- a. Sistem sederhana

Baterai selalau dihubungkan dengan pengisi baterai (charger) dalam



pengisian pemeliharaan. Baterai hanya sewaktu-waktu dihubungkan ke beban, misalnya untuk start motor listrik (engine starting)

b. Sistem cadangan (standby system)

Pada operasi kerja normal beban langsung dihubungkan dengan penyearah (rectifier), dan baterai dihubungkan dengan pengisi baterai (battery charger) dalam pengisian pemeliharaan, maka bila sumber AC terganggu, secara otomatis beban akan terhubung ke baterai. Sistem ini umumnya digunakan untuk lampu-lampu darurat.

c. Sistem terapung (floating system)

Pada operasi kerja normal beban terhubung ke pengisi baterai (battery charger) dan baterai, maka bila sumber arus-searah (DC) dari pengisi baterai terganggu, beban langsung akan di-supply dari baterai

d. Sistem ganda (duplicate system)

Pada sistem ganda ini terdapat 2 (dua) buah pengisi baterai (battery charger) yang dihubungkan dengan ke-2 (dua) unit baterai. Disini beban baterai dapat disupply dengan menggunakan 2 (dua) unit baterai atau salah satu unit baterai.

2.2.5.3 Rangkaian Baterai

Suatu sel baterai memiliki tegangan yang terbatas sehingga dibutuhkan suatu cara agar baterai mampu memenuhi kebutuhan tegangan kerja peralatan sebagaimana yang diharapkan meningkatkan kapasitas serta keandalan penggunaan baterai dengan cara merangkai baterai dalam beberapa hubungan salah satunya yaitu :

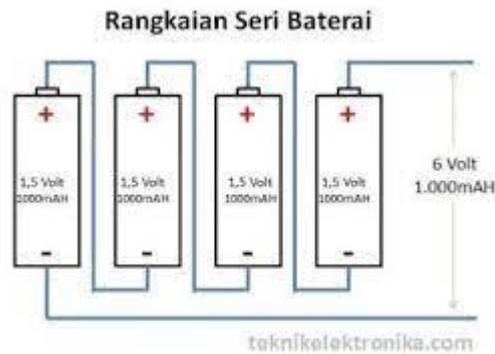
2.2.5.4 Hubungan Seri

Baterai dihubungkan secara seri berfungsi untuk dapat meningkatkan jumlah tegangan baterai sesuai dengan kebutuhan tegangan kerja peralatan. Apabila suatu peralatan membutuhkan tegangan sebesar 110 volt dengan tegangan sel baterai sebesar 1,4 volt maka diperlukan sejumlah ± 84 sel baterai yang terhubung seri untuk dapat memenuhi kebutuhan peralatan tersebut.

Namun ketika hubungan seri pada baterai memiliki kekurangan yaitu



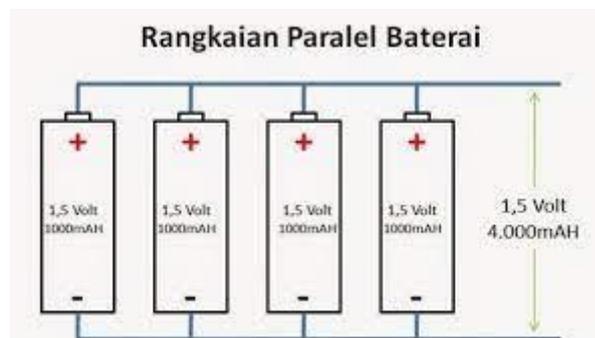
apabila salah satu sel baterai mengalami kelainan maka akan berdampak pada keseluruhan baterai sehingga dapat menyebabkan suplai DC ke beban terputus.



Gambar 2. 21 rangkaian seri baterai

2.2.5.5 Hubungan Paralel

Baterai dihubungkan secara paralel berfungsi untuk meningkatkan arus baterai dan menjaga keandalan beban DC pada sistem. Dimana apabila salah satu sel baterai mengalami anomali maka tidak berdampak pada sel baterai yang lainnya sehingga baterai tetap mampu mensuplai tenaga ke peralatan, dalam arti lain tidak berdampak pada baterai secara keseluruhan. Namun baterai hubungan paralel memiliki kekurangan yaitu dapat menurunkan kapasitas daya.



Gambar 2. 22 rangkaian paralel baterai

2.2.5.6 Pengisian baterai yang beroperasi

Setelah terjadi pengosongan baterai/pemakaian (discharge) baterai perlu pengisian ulang adapun beberapa macam pengisian ulang baterai adalah :



a. Cycle charging

Pengisian dengan cara cycle-charging adalah mengisi (charging) kembali baterai setelah pengosongan (discharge) sebagian atau pengosongan secara normal. Untuk pengisian cara ini biasanya dibutuhkan waktu antara 5 sampai 10 jam. Jika pengisian sudah penuh kemudian pengisian dihentikan, umumnya secara otomatis. Cara cycle-charging umumnya banyak digunakan pada baterai diesel (electric industrial truck service).

b. Boost & quick charging

Pengisian dengan cara boost & quick charging adalah untuk pengisian baterai yang dipakai di pabrik-pabrik, juga untuk baterai diesel (industrial truck service) dimana diperlukan tambahan pengisian dalam periode yang singkat misalnya pada jam-jam istirahat. Pengisian cara ini cukup untuk pelayanan satu hari. Arus yang diberikan ke baterai tidak boleh melebihi harga ampere-jamnya. Untuk menjaga pengisian yang berlebihan dan arus yang terlalu besar, biasanya alat pengisi ini mempunyai automatic out-off yang mana memberhentikan pengisian pada waktu baterai mencapai suhu tinggi.

c. Floating charging

Pengisian dengan cara ini, dimana baterai secara terus-menerus tersambung pada rangkain luar (sumber AC), alat pengisi baterai (battery charge) dan beban. Alat pengisi baterai ini direncanakan untuk menjaga suatu tegangan konstan dari baterai yang tersambung ke beban. Biasanya tegangan yang diberikan untuk mengalirkan arus untuk mengatasi kerugian dalam baterai dan menjaga baterai selalu dalam keadaan pengisian penuh (full-charge) adalah tetap (konstan) untuk :

- Baterei timah :2,18 volt/sel
- Baterei alkali : 1,40-1,42 volt/sel

Pengoperasian baterai secara pengisian terapung (floating charging) umumnya digunakan di gardu induk dan pusat-pusat pembangkit tenaga



listrik, dimana baterai dan alat pengisian baterai dihubungkan paralel dengan busbar umum dari supply arus searah (DC)

d. Equalizing charging

Dalam sel-sel dari suatu baterai yang beroperasi dengan pengisian terapung (floating charge) akan selalu terjadi sedikit perbedaan (yang tidak dapat dihindarkan) dalam kondisi kimia (chemical condition) antara satu sel dengan sel yang lainnya. Equalizing charge dilaksanakan dengan cara menaikkan tegangan baterai sesuai dengan yang ditentukan dalam buku petunjuk masing-masing pabrik. Pengisian ini berlangsung sampai semua sel berhenti mengeluarkan gas (gas freely) dan pembacaan tegangan serta berat jenis elektrolitnya menunjukkan bahwa baterai telah diisi penuh (full charge) sesuai dengan harga yang ditentukan dalam petunjuk masing-masing pabrik.

2.2.6 Rating Kapasitas Baterei

Energi yang tersimpan dalam baterei harus cukup kuat untuk stater, untuk itu baterei harus terisi penuh. Kapasitas baterei menunjukkan jumlah listrik yang disimpan baterei yang dapat dilepaskan sebagai sumber listrik. Kapasitas baterei dipengaruhi oleh ukuran plat, jumlah plat, jumlah sel dan jumlah elektrolit baterei terdapat 3 ukuran yang sering menunjukkan kapasitas baterei yaitu:

- 1) Cranking Current Ampere (CCA)
- 2) Reserve Capacity
- 3) Ampere Hour

2.2.6.1 Cold Cranking Ampere (CCA)

Pada baterei terdapat istilah CCA yang menunjukkan kemampuan baterei saat masih terisi penuh untuk mengeluarkan arus listrik (dalam satuan ampere) pada saat kondisi dingin (-17,8 derajat celcius) selama 30 detik. Tegangan pada tiap-tiap sel baterei akan dipertahankan sebesar 1,2 volt atau lebih dan apabila pada baterei terdapat 6 buah sel maka tegangan keseluruhan minimum yang



dipertahankan adalah 7,2 volt. Atau lebih mudahnya dapat diartikan sebagai kemampuan baterai saat terisi penuh untuk mengeluarkan arus listrik yang digunakan untuk menghidupkan mesin dalam kondisi dingin selama 30 detik.

2.2.6.2 Reserve capacity

Reserve capacity atau kapasitas cadangan untuk mensuplai kebutuhan arus listrik ke sistem pengapian dan kelistrikan body apabila sistem pengisian tidak bekerja. Reserve capacity merupakan banyaknya waktu (dalam satuan menit) pada baterai saat terisi penuh dapat memberikan arus listrik sebesar 25 Ampere pada suhu 27 derajat celcius.

Tegangan tiap sel baterai tidak boleh turun dibawah 1,75 volt atau apabila baterai tersebut memiliki 6 sel maka tegangan minimumnya adalah 10,3 volt.

Rumus menentukan kapasitas baterai adalah :

$$AH = A \text{ (amper)} \times H \text{ (jam)} \quad (2.4)$$

2.2.6.3 Ampere Hour

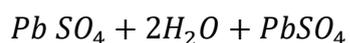
Ampere Hour menyatakan kapasitas baterai, kapasitas baterai merupakan seberapa lama aki tersebut dapat bertahan mensuplai arus untuk beban/load. Amper Hour menyatakan besarnya arus yang dapat mengalir dalam waktu 20 jam pada temperatur 27 derajat celcius tanpa adanya penuruna tegangan tiap sel dibawah 1,75 volt.

2.2.6.4 Reaksi Kimia pada Baterai

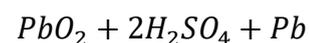
Baterai merupakan pembangkitan listrik secara kimia. Listrik dibangkitkan akibat reaksi kimia antara plat positif dan plat negatif. Saat baterai dihubungkan dengan sumber listrik arus searah maka akan terjadi proses pengisian (charge).

Proses tersebut secara kimia dapat dirumuskan sebagai berikut :

Plat (+) Elektrolit + Plat (-)



Plat (+) Elektrolit + Plat (-)



Pada saat sistem starter berfungsi maka energi listrik yang tersimpan di baterai akan mengalir ke beban, proses ini sering disebut proses pengosongan



(discharge), proses pengosongan secara kimia dapat dirumuskan sebagai berikut.



Dari reaksi kimia tersebut terdapat perbedaan dimana pada saat baterai penuh elektrolit terdiri dari $2\text{H}_2\text{SO}_4$, sedangkan saat kosong elektrolit baterai adalah $2\text{H}_2\text{O}$.

2.3 Generator Sinkron

Generator arus bolak-balik (AC) atau disebut dengan alternator adalah suatu peralatan yang berfungsi untuk mengkonversi energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik (elektrik) dengan perantara induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi karena adanya perubahan medan magnet pada kumparan jangkar (tempat terbangkitnya tegangan pada generator).

Dikatakan generator sinkron karena jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator.



Gambar 2. 23 Generator Sinkron

2.3.1 Konstruksi Generator Sinkron

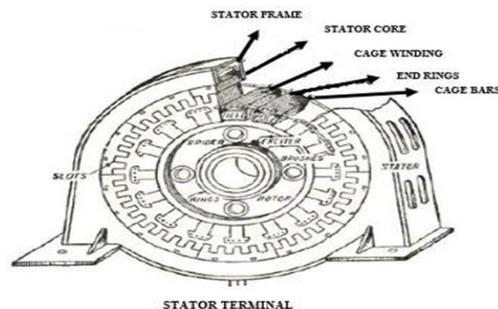
Secara umum konstruksi generator sinkron terdiri dari stator (bagian yang diam) dan rotor (bagian yang bergerak). Keduanya merupakan rangkaian magnetik yang berbentuk simetris dan silindris. Selain itu generator sinkron memiliki celah udara ruang antara stator dan rotor yang berfungsi sebagai tempat terjadinya fluksi



atau induksi energi listrik dari rotor ke stator seperti gambar (Marsudi, 2005).

Konstruksi generator AC adalah sebagai berikut :

1. Rangka stator merupakan rumah stator tersebut.
2. Stator, Stator adalah bagian yang diam. Memiliki alur-alur sebagai tempat meletakkan lilitan stator. Lilitan stator berfungsi sebagai tempat Gaya Gerak Listrik (GGL) induksi.
3. Rotor, Rotor adalah bagian yang berputar, pada bagian ini terdapat kutub-kutub magnet dengan lilitannya yang dialiri arus searah, melewati cincin geser dan sikat-sikat.
4. Cincin geser, terbuat dari bahan kuningan atau tembaga yang dipasang pada poros dengan memakai bahan isolasi. *Slip ring* ini berputar bersama-sama dengan poros dan rotor.
5. Generator penguat, Generator penguat merupakan generator arus searah yang dipakai sebagai sumber arus.



Gambar 2. 24 Kontruksi Generator Sinkron

2.3.1.1 Stator

Stator merupakan bagian yang diam (statis) dan merupakan gulungan kawat penghantar yang disusun sedemikian rupa dan ditempatkan pada alur-alur inti besi yang disebut dengan belitan jangkar. Pada penghantar tersebut adalah tempat terbentuknya GGL induksi yang diakibatkan dari medan magnet putar dari rotor yang memotong kumparan penghantar stator.



Gambar 2. 25 Inti Stator dan Alur Pada Stator

2.3.1.2 Rotor

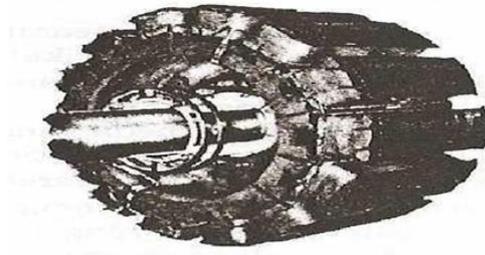
Rotor merupakan bagian yang bergerak (dinamis). Rotor berfungsi untuk membangkitkan medan magnet sehingga menghasilkan tegangan kemudian akan diinduksikan ke stator. Rotor pada generator juga berfungsi sebagai tempat belitan medan (eksitasi). Dimana kumparan medan magnet disusun pada alur-alur inti besi rotor, sehingga apabila pada kumparan tersebut dialirkan arus searah (DC) maka akan membentuk kutub-kutub magnet Utara dan Selatan pada inti rotor.

Generator sinkron memiliki dua tipe rotor, yaitu :

a. Rotor Kutub Sepatu Atau Menonjol (Salient Pole Rotor)

Pada rotor kutub menonjol ini mempunyai kutub yang jumlahnya banyak. Pada kumparannya dibelitkan pada tangkai kutub, dimana kutub-kutub diberi laminasi untuk mengurangi panas yang ditimbulkan oleh eddy current. Pada belitan-belitan medannya dihubung seri, sehingga ketika belitan medan ini disupply oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub yang berlawanan.

Rotor kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putaran rendah dibawah 700 rpm dan putaran menengah dari 750-1500 rpm, sehingga kutub menonjol akan mengalami rugi-rugi yang besar dan mengeluarkan suara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi.



Gambar 2. 26 Rotor Kutub Menonjol

b. Rotor Kutub Silindris (Non Salient Pole Rotor)

Rotor kutub silindris umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putaran tinggi diantara 1500-3000 rpm. Rotor kutub tak menonjol ini dibuat dari plat baja berbentuk silinder yang mempunyai sejumlah slot sebagai tempat kumparan. Karena adanya slot-slot dan juga kumparan medan pada rotor maka mengakibatkan jumlah kutub pun sedikit terbentuk. Konstruksi ini memberikan keseimbangan mekanis yang lebih baik karena rugi-rugi anginnya lebih kecil dibandingkan rotor kutub menonjol.

Rotor silinder umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putaran tinggi karena distribusi disekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus sehingga lebih baik dari kutub menonjol dan juga konstruksinya memiliki kekuatan mekanik pada kecepatan putar tinggi .

Gambar bentuk kutub silinder generator sinkron tampak seperti pada gambar 2.27



Gambar 2. 27 Rotor Kutub Silinder

2.3.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber



eksitasi yang akan disuplai oleh arus searah sehingga menimbulkan fluks yang besarnya tetap terhadap waktu. Kemudian penggerak mula (prime mover) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya.

$$n = \frac{120.f}{p} \quad (2.6)$$

Keterangan:

n = Kecepatan putar rotor (rpm)

p = Jumlah kutub rotor

f = Frekuensi (Hz)

Perputaran rotor tersebut sekaligus akan memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Medan putar yang dihasilkan pada rotor akan menginduksikan tegangan tiga fasa pada kumparan jangkar sehingga akan menimbulkan medan putar pada stator. Perputaran tersebut menghasilkan fluks magnetik yang berubah-ubah besarnya terhadap waktu. Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan GGL induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut.

GGL induksi (E_a) pada alternator akan terinduksi pada kumparan jangkar alternator bila rotor diputar di sekitar stator. Besarnya kuat medan pada rotor dapat diatur dengan cara mengatur arus medan (I_f) yang diberikan pada rotor. Besarnya GGL induksi (E) rata-rata yang dihasilkan kumparan jangkar alternator ini dapat dilihat dalam persamaan sebagai berikut (Marsudi, 2005).

$$E = 4,44 . f . \Phi . T \quad (2.7)$$

Jika, $n = \frac{120.f}{p}$, maka :

$$E = 4,44 . \frac{np}{120} . \Phi . T$$

Bila, $C = \frac{4,44.p.T}{120}$, maka :

$$E = Cn\Phi$$

Keterangan :



E = GGL induksi (Volt)

C = Konstanta

p = Jumlah kutub

n = Putaran (rpm) = Fluks magnetik (weber)

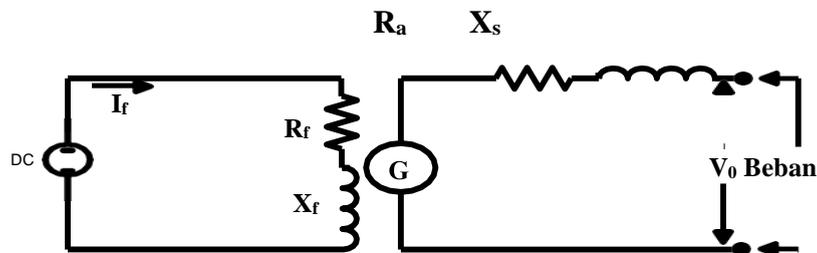
T = Banyaknya lilitan /fase = $1/2 Z$

Z = Banyak sisi kumparan

2.3.3 Generator Berbeban

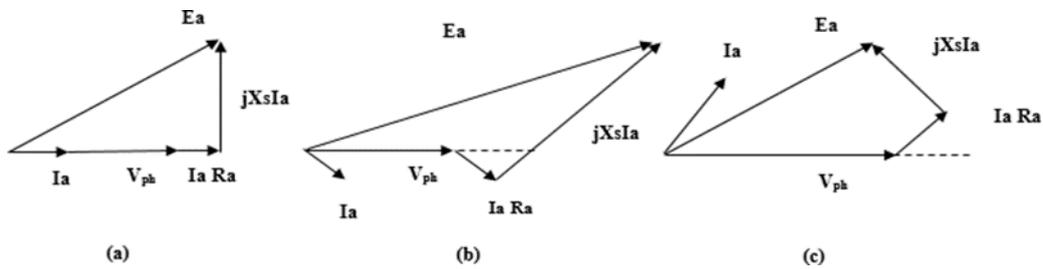
Pada keadaan berbeban arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaktansi jangkar bersifat reaktif dan disebut juga sebagai reaktansi permanen (X_m). Reaktansi permanen ini bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor (X_a) sebagai reaktansi sinkron (X_s) (Marsudi, 2005).

$$X_s = X_m + X_a$$



Gambar 2. 28 Rangkaian Ekuivalen Generator Berbeban

Secara umum sifat beban yang dipikul oleh alternator dapat bersifat resistif, induktif dan kapasitif. Bentuk hubungan beban ini akan mempengaruhi arus yang mengalir pada alternator. Arus ini bisa menjadi sefasa, tertinggal, atau mendahului dari tegangan, tergantung dari jenis beban yang diberikan pada terminal generator. Adapun diagram fasor generator pada faktor daya satu, terbelakang dan mendahului adalah seperti gambar 2.29.



Gambar 2. 29 Hubungan berbagai kondisi beban terhadap arus dan tegangan yang terjadi pada generator : (a). resistif (b). induktif (c).kapasitif

Dengan memisalkan generator dihubungkan ke sistem besar (busbar), pada gambar 2.29 bagian (a) merupakan diagram vektor dari generator dengan faktor daya satu (sefasa) dapat terlihat jatuh tegangan $I_a.R_a$ sefasa dengan I_a dan $I_a.X_s$ mendahului I_a sejauh 90°. Seperti persamaan sebagai berikut :

$$I_a \cdot Z_S = I_a \cdot R_a + I_a \cdot jX_S$$

(2.8)

$$E_a = V + I_a \cdot Z_S$$

Keterangan :

V = Tegangan konstan sistem

I_a = Arus alternator

R_a = Tahanan alternator

Z_s = Impedansi sistem

Jika arus eksitasi alternator dinaikkan dari eksitasi normal pada faktor daya satu (sefasa), maka E_a akan bertambah sedangkan jumlah vektor antara V dan $I_a \cdot Z_S$ tetap tidak berubah ($E_a \neq V + I_a \cdot Z_S$). Perbedaan ini timbul akibat arus reaktif terbelakang dimana daya keluaran pada generator tidak berpengaruh sehingga menimbulkan jatuh tegangan $I_r.Z_s$ yang terbelakang 90° dari $I_a.Z_s$.

Pada gambar 2.29 bagian (b) terdapat diagram vektor, dimana bila diberi penguatan yang lebih (over excited) maka generator bekerja pada faktor daya terbelakang (lagging) sehingga menyebabkan arus akan terbelakang dari tegangan yang mengakibatkan generator sinkron membangkitkan daya reaktif induktif.



Namun bila arus penguatan dikurangi (under excited), E_a tentukan akan menjadi kecil, sehingga terdapat perbedaan jumlah vektor V dan $I_a.Z_s$ tetap tidak berubah. Perbedaan ini timbul akibat arus reaktif terbelakang, sehingga menimbulkan jatuh tegangan $I_r.Z_s$ yang mendahului 90° dari $I_a.Z_s$.

Pada gambar 2.23 bagian (c) terdapat diagram vektor, dimana bila arus penguatan dikurangi, maka alternator bekerja pada faktor daya mendahului (leading) sehingga menyebabkan arus akan mendahului dari tegangan yang mengakibatkan daya reaktif kapasitif. Pada alternator dengan daya keluaran konstan, maka jatuh tegangan $I_a.Z_s$ akan konstan pula. Jika arus penguatannya dibuat bervariasi, maka I_a tetap tidak akan berubah, tetapi I_r dan $I_r.Z_s$ akan berubah nilainya.

2.3.4 Sistem Eksitasi Pada Generator Sinkron

Eksitasi atau biasa disebut sistem penguatan adalah suatu perangkat yang memberikan arus penguat (I_f) kepada kumparan medan arus bolak-balik (*alternating current*) yang dijalankan dengan cara membangkitkan medan magnetnya dengan bantuan arus searah. Arus eksitasi adalah pemberian arus listrik pada kutub magnetik. Dengan mengatur besar kecilnya arus listrik tersebut kita dapat mengatur besar tegangan output generator atau dapat juga mengatur besar daya reaktif yang diinginkan pada generator yang sedang paralel dengan sistem jaringan besar (*infinite bus*).

Sistem eksitasi dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu sistem eksitasi dengan menggunakan sikat dan sistem eksitasi tanpa sikat (Marsudi, 2005).

2.3.4.1 Sistem Eksitasi Menggunakan Sikat

Sistem eksitasi dengan menggunakan sikat terdiri dari:

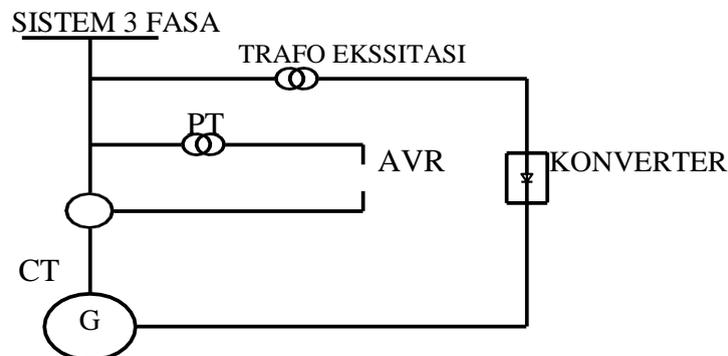
1. Sistem Eksitasi Statis

Sistem eksitasi statis adalah sistem eksitasi generator dengan menggunakan menggunakan peralatan eksitasi yang tidak bergerak, yang berarti bahwa peralatan



eksitasi tidak ikut berputaran bersama rotor generator sinkron. Sistem eksitasi ini disebut juga dengan *self excitation* merupakan sistem eksitasi yang tidak memerlukan generator tambahan sebagai sumber eksitasi generator sinkron dan sebagai gantinya sumber eksitasi berasal dari keluaran generator sinkron itu sendiri yang diserahkan terlebih dahulu dengan menggunakan *rectifier*.

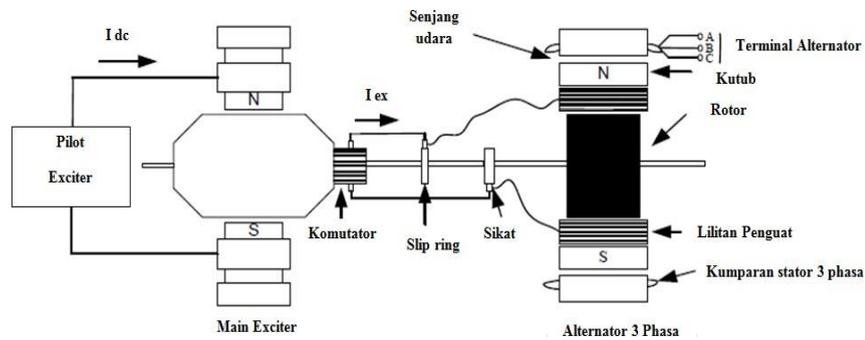
Awalnya pada rotor ada sedikit magnet yang tersisa, magnet yang sisa ini akan menimbulkan tegangan pada stator, tegangan ini kemudian masuk dalam penyearah dan dimasukkan kembali pada rotor, akibatnya medan magnet yang dihasilkan makin besar dan tegangan AC naik demikian seterusnya sampai dicapai tegangan nominal dari generator AC tersebut. Biasanya penyearah itu mempunyai pengatur sehingga tegangan generator dapat diatur konstan menggunakan AVR Rangkaian sistem eksitasi statik seperti gambar 2.30 berikut :



Gambar 2. 30 Sistem Eksitasi Statik

2. Sistem Eksitasi Dinamik

Sistem eksitasi dinamik adalah sistem eksitasi generator tersebut disuplai dari eksiter yang merupakan mesin bergerak seperti gambar 2.24. Sebagai eksiternya menggunakan generator DC atau menggunakan generator AC yang diserahkan menggunakan *rectifier*. *Slip ring* digunakan untuk menyalurkan arus dari generator penguat pertama ke medan penguat generator penguat kedua (marsudi, 2005).



Gambar 2. 31 Sistem Eksitasi Dinamik

2.3.4.2 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (Brushless Excitation)

Sistem eksitasi tanpa sikat sama sekali tidak bergantung pada sumber listrik eksternal, melainkan dengan menggunakan *pilot exciter* dan sistem penyaluran arus eksitasi ke rotor generator utama, maupun untuk eksitasi eksiter tanpa melalui media sikat arang. *Pilot exciter* terdiri dari sebuah generator arus bolak-balik dengan magnet permanen yang terpasang pada poros rotor dan kumparan tiga fasa pada stator. Pendeteksian kejadian pada rotor berputar dilakukan dengan cara khusus seperti efek *hall*, *efek hall* merupakan suatu peristiwa berbeloknya aliran listrik (Elektron) dalam plat konduktor karena pengaruh medan magnet.

2.3.5 Paralel Generator Sinkron

Bila suatu generator bekerja dan mendapatkan pembebanan yang melebihi dari kapasitasnya, maka dapat mengakibatkan generator tersebut tidak dapat bekerja atau bahkan akan mengalami kerusakan. Dalam hal ini dapat diatasi dengan menjalankan generator lain yang kemudian dioperasikan secara paralel dengan generator utama yang telah bekerja sebelumnya pada satu jaringan listrik yang sama. Keuntungan dari dilakukannya paralel generator ialah.

1. Mendapatkan daya yang lebih besar.
2. Untuk memudahkan penentuan kapasitas generator.
3. Untuk menjamin kontinuitas ketersediaan daya listrik.
4. Untuk melayani beban yang berkembang.



Syarat yang harus dipenuhi dalam melakukan sinkronisasi generator ini ialah (Marsudi, 2005) :

- a. Tegangan kedua generator harus sama

Dimana tegangan generator (yang akan diparalel) dengan tegangan sistem jaringan harus diatur dengan mengatur arus eksitasinya. Pada saat generator bekerja paralel, perubahan arus eksitasi akan merubah faktor daya.

- b. Frekuensi kedua generator harus sama

Frekuensi generator dan frekuensi sistem harus sama. Untuk menyamakannya, maka putaran generator harus diatur, yaitu dengan cara mengatur katup *governor* (aliran uap masuk turbin).

- c. Mempunyai urutan dan sudut fasa yang sama

Urutan fasa dan sudut fasa generator sinkron yang akan di paralelkan harus sama, sebab jika adanya perbedaan fasa maka akan tidak dapat dilakukan penyinkronan. Mempunyai sudut fasa yang sama bisa diartikan, kedua fasa dari 2 generator mempunyai sudut fasa yang berhimpit sama atau 0 derajat. Dengan kata lain urutan fasa dari generator yang diparalelkan harus sama dengan fasa pada sistem (*busbar*).

2.3.6 Sistem Kerja Paralel Generator Sinkron

Apabila generator dihubungkan dengan sistem jaringan yang kapasitasnya besar (*infinite bus*), maka dengan mengatur putaran (n) dan arus eksitasi (I_f) maka tidak akan mempengaruhi frekuensi sistem jaringan tersebut. Pada kondisi tersebut pengaturan putaran adalah hanya mengatur pembebanan daya aktif sedangkan pengaturan arus eksitasi hanya mengatur aliran daya reaktif atau faktor daya generator tersebut

Untuk menyuplai beban yang ada pada kedua generator yang bekerja paralel, maka jumlah daya aktif dan reaktif yang disuplai generator tersebut harus sama dengan daya aktif dan reaktif yang ada pada beban. Adapun rumus daya aktif dan reaktif yang harus disuplai oleh kedua generator adalah (Marsudi, 2005):



$$\begin{aligned}
 P_{Load} &= P_{G1} + P_{G2} \\
 Q_{Load} &= Q_{G1} + Q_{G2}
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

Keterangan : Pload = Beban Aktif Generator

Qload = Beban Reaktif Generator

P_{G1} = Daya Aktif Generator 1

P_{G2} = Daya Aktif Generator 2

2.3.7 Efek Pengaturan Arus Eksitasi

Dalam pengaturan arus eksitasi tersebut maka besar nilai dari fluks magnetik (Φ) akan berubah seiring dengan perubahan arus eksitasi.

Jika generator beroperasi secara paralel, dimana dengan diaturnya arus eksitasi sedangkan nilai putaran (n) tetap, maka akan mengakibatkan kenaikan nilai dari fluks magnetik sehingga mengubah daya reaktif yang dibutuhkan namun besar daya aktifnya tidak akan berubah sehingga akan merubah nilai faktor daya.

Jika generator G_1 dan G_2 bekerja paralel maka masing-masing alternator akan memasok beban setengah dari daya aktif dan setengah dari daya reaktif. Masing-masing alternator memasok arus sebesar I , sehingga arus beban yang di pasok sebesar 2 kali dari I .

Bila penguatan eksitasi G_1 dinaikkan maka besarnya E_1 akan lebih dari besaran awalnya sehingga $\bar{E}_1 > \bar{E}_2$. Hal ini menyebabkan adanya arus sirkulasi. Dimana arus sirkulasi (Marsudi, 2005) :

$$I_s = \frac{E_1 - E_2}{Z_1 - Z_2}
 \tag{2.10}$$

Keterangan :

I_s = Arus sirkulasi

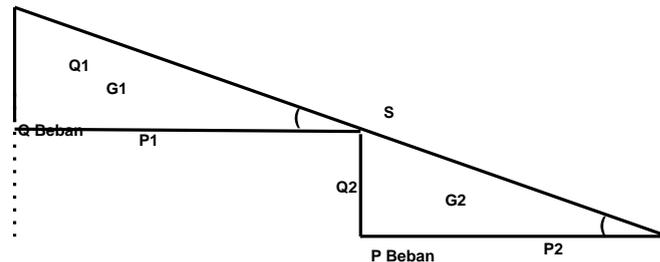
E_{12} = Tegangan induksi generator

Z_{12} = Impedansi generator

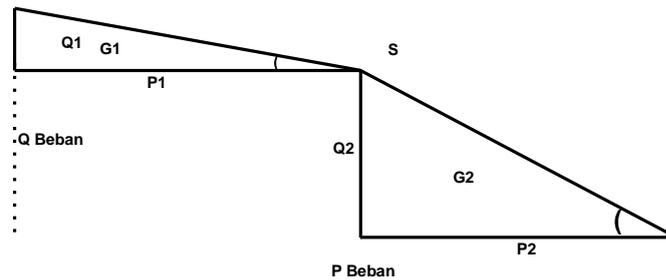
Arus I_s ini akan mempengaruhi arus beban pada G_1 dan G_2 secara vektoris, sehingga besarnya arus pada G_1 sebesar I_1 dengan $\cos \theta_1$ dan arus pada G_2 sebesar



I_2 dengan $\cos \theta_2$. Perubahan ini hampir tidak mempengaruhi pada besarnya daya aktif beban, tapi berpengaruh pada perubahan daya reaktif yang di pikul oleh alternator. Gambar 2.32 berikut ini segitiga daya akibat perubahan eksitasi pada alternator yang bekerja secara paralel :



a. Kondisi 1



b. Kondisi 2

2. 32 Segitiga daya generator yang terhubung paralel akibat efek pengubahan penguatan

Pada kondisi 1, beban yang di pikul G_1 dan G_2 sama besarnya, sehingga beban daya aktif dan daya reaktif di bagi rata memberikan segitiga daya aktif yang sama tetapi jika penguatan G_1 dinaikkan, dan arus penguatan G_2 maka akan merubah pembagian daya reaktif pada masing-masing alternator sehingga berpengaruh terhadap faktor daya pada masing-masing alternator. Hal ini dapat di lihat pada kondisi 2.

2.3.8 Komponen Penunjang Generator Turbin Gas

Adapun beberapa komponen penunjang dalam sistem turbin gas adalah sebagai berikut:



a. Starting Equipment

Berfungsi untuk melakukan start up sebelum turbin bekerja. Jenis-jenis starting equipment yang digunakan di unit-unit turbin gas pada umumnya seperti diesel engine (PG-9001 A/B), induction motor (PG901 C/H dan KGT 4X01, 4X02 dan 4X03), dan gas expansion turbine.

b. Coupling dan Accessory Gear.

Berfungsi untuk memindahkan daya dan putaran dari poros yang bergerak ke poros yang akan digerakkan. Ada tiga jenis coupling yang digunakan, yaitu:

- Jaw Cluth, menghubungkan starting turbine dengan accessory gear dan HP turbin rotor.
- Accessory Gear Coupling, menghubungkan accessory gear dengan HP turbin rotor
- Load Coupling, menghubungkan LP turbin rotor dengan kompressor beban.

c. Fuel System.

Bahan bakar yang digunakan berasal dari fuel gas system dengan tekanan sekitar 15 kg/cm². Fuel gas yang digunakan sebagai bahan bakar harus bebas dari cairan kondensat dan partikel-partikel padat. Untuk mendapatkan kondisi tersebut diatas maka sistem ini dilengkapi dengan knock out drum yang berfungsi untuk memisahkan cairan-cairan yang masih terdapat pada fuel gas

d. Lube Oil System

Lube oil system berfungsi untuk melakukan pelumasan secara kontinu pada setiap komponen sistem turbin gas. Lube oil disirkulasikan pada bagian-bagian utama turbin gas dan trush bearing juga untuk accessory gear dan yang lainnya. Lube oil system terdiri dari:

- Oil Tank (Lube Oil Reservoir)
- Oil Quantity
- Pompa
- Filter System



- Valving System
- Piping System
- Instrumen untuk oil

Pada turbin gas terdapat tiga buah pompa yang digunakan untuk mensuplai lube oil guna keperluan lubrikasi, yaitu:

- Main Lube Oil Pump, merupakan pompa utama yang digerakkan oleh HP shaft pada gear box yang mengatur tekanan discharge lube oil.
- Auxiliary Lube Oil Pump, merupakan pompa lube oil yang digerakkan oleh tenaga listrik, beroperasi apabila tekanan dari main pump turun.
- Emergency Lube Oil Pump, merupakan pompa yang beroperasi jika kedua pompa diatas tidak mampu menyediakan lube oil.

e. Cooling System

Sistem pendingin yang digunakan pada turbin gas adalah air dan udara. Udara dipakai untuk mendinginkan berbagai komponen pada section dan bearing. Komponen-komponen utama dari cooling system adalah:

- Off base Water Cooling Unit
- Lube Oil Cooler
- Main Cooling Water Pump
- Temperatur Regulation Valve
- Auxiliary Water Pump

2.3.9 Faktor Daya

Faktor daya yang sering disebut sebagai $\cos \phi$ didefinisikan sebagai perbandingan daya aktif (W) dan daya semu (V.A). Atau sebagai perbandingan antara arus yang dapat menghasilkan kerja didalam suatu rangkaian terhadap arus total yang masuk kedalam rangkaian.

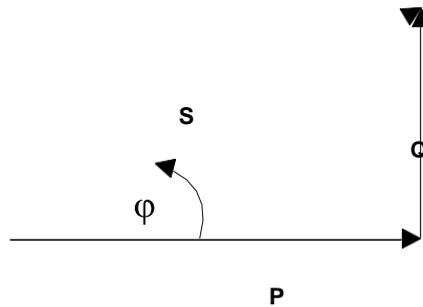


$$\text{Faktor daya} = \cos\phi = \frac{P(W)}{S(V.A)} \quad (2.11)$$

Keterangan :

P = Daya aktif (Watt)

S = Daya semu (Volt Ampere)



Gambar 2. 33 Segitiga daya

Faktor daya mempunyai pengertian sebagai besaran yang menunjukkan seberapa efisien jaringan yang dimiliki dalam menyalurkan daya yang bisa dimanfaatkan. Faktor daya rendah juga merugikan karena mengakibatkan arus beban akan menjadi lebih tinggi.

Dalam sistem tenaga listrik, daya merupakan jumlah energi listrik yang digunakan untuk melakukan usaha. Untuk sistem arus AC tiga fasa, dikenal 3 daya yaitu :

- a. Daya semu (*apparent power*)

Daya semu dikatakan daya total dari kapasitas daya maksimal generator atau dapat diartikan sebagai penjumlahan daya aktif dan daya reaktif.

$$S = V.I$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.12)$$

- b. Daya aktif (*Active Power*)

Daya aktif disebut juga daya nyata memiliki satuan Watt yang mempunyai pengertian merupakan daya yang terpakai untuk melakukan energi sebenarnya. Daya ini sering digunakan secara umum oleh konsumen dan sebagai satuan yang digunakan untuk daya listrik dan dikonversikan dalam bentuk kerja.

Persamaan dalam perhitungan fasa :



$$P = V.I. \cos\phi \text{ (1 Fasa)}$$

$$P = \sqrt{3}.V.I. \cos\phi \text{ (3 Fasa)} \quad (2.13)$$

c. Daya Reaktif (*reactive power*)

Daya reaktif dengan satuan VAR, memiliki pengertian daya yang di *supply* oleh komponen reaktif, atau disebut juga jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan magnet.

Persamaan dalam perhitungan phasa :

$$Q = V.I. \sin\phi \text{ (1 Fasa)} \quad (2.14)$$

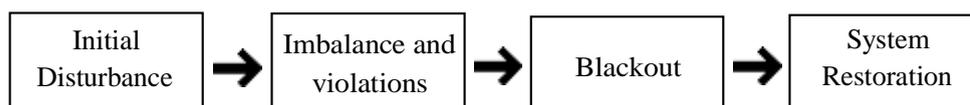
$$Q = \sqrt{3}.V.I. \sin\phi \text{ (3 Fasa)}$$

Daya reaktif yang tinggi mengakibatkan meningkatnya sudut segitiga daya sehingga menghasilkan faktor daya rendah, begitu juga daya reaktif yang kecil menghasilkan faktor daya yang tinggi.

2. 4 Kehilangan Tegangan Pada Sistem Tenaga Listrik

Kehilangan tegangan pada sistem tenaga listrik dapat diistilahkan dengan *blackout*. *Blackout* merupakan keadaan pemadaman meluas sistem tenaga listrik dengan dampak yang merugikan baik materi maupun non materi (Hudah, 2014).

Blackout dapat dideskripsikan sebagai gangguan kaskade atau gangguan besar, proses terjadinya *blackout* dapat dilihat pada gambar 2.35, terlihat pada gambar bahwa penyebab awal *blackout* adalah adanya pemicu gangguan. Pemicu munculnya gangguan dapat berupa bencana alam, kejadian tak terduga, misoperasi fasilitas dan ketidakseimbangan sistem. Hal ini lah yang menyebabkan trip nya fasilitas sistem seperti transmisi, transformator dan generator. Setelah pemadaman telah terjadi, pemulihan sistem dengan cara yang tepat harus segera dilaksanakan (Goo, dkk, 2016).





Gambar 2. 34 Prosedur khas blackout (Goo, dkk, 2016)

Sebagian besar *blackout* yang sering terjadi adalah *blackout* sistem sebagian, *blackout* sistem sebagian berarti dapat dipulihkan dengan bantuan sistem lain (sistem tetangga) yang sudah terinterkoneksi dengan sistem yang *blackout* tadi. Namun jika *blackout* total terjadi, seluruh sistem akan padam, sistem dari tetangga tersebut tentu tidak bisa membantu sistem lainnya karena di sana juga terjadi *blackout*. Ketika hal itu terjadi, pemulihan dapat dilakukan dengan cara membagi sistem menjadi beberapa subsistem, setelah masing-masing subsistem telah pulih maka semua subsistem akan diparalelkan. Sehingga dengan metode seperti itu diharapkan sistem dapat pulih secepat mungkin. Dengan demikian jika *blackout* total terjadi setiap sub sistem setidaknya harus memiliki sekurang nya 1 unit *black start*, agar subsistem tersebut dapat segera pulih tanpa menunggu daya listrik dari sub sistem lain.

2.4.1 Gangguan Besar Penyebab Kehilangan Tegangan

Yang dimaksud dengan gangguan besar adalah gangguan yang meliputi sebagian besar dari sistem, termasuk pula gangguan total yaitu gangguan yang menyebabkan seluruh sistem padam. Gangguan besar pada umumnya gangguan kaskade, yaitu gangguan yang menyebabkan *tripnya* sebuah atau dua buah PMT kemudian disusul dengan *tripnya* banyak PMT dalam sistem. Gangguan besar pada umumnya disebabkan oleh (Marsudi, 2015) :

- a. *Trip* unit pembangkit yang besar

Tripnya unit pembangkit yang besar menyebabkan beban yang sebelumnya diambil oleh unit yang *trip* beralih ke unit pembangkit yang lain sehingga menyebabkan unit pembangkit lain mengalami beban lebih dan ikut *trip*. Hal ini terutama terjadi apabila cadangan berputar dalam sistem lebih kecil dibandingkan dengan daya yang dibangkitkan oleh unit pembangkit yang mengalami gangguan.



Proses pemindahan beban ini mungkin juga menyebabkan ada saluran transmisi mengalami beban lebih dan ikut *trip*, tergantung situasi aliran daya dalam sistem.

b. *Tripnya* saluran transmisi yang tinggi bebannya

Tripnya saluran transmisi yang tinggi bebannya mempunyai dampak yang serupa seperti *tripnya* unit pembangkit yang besar, khususnya untuk bagian sistem yang menerima daya dari saluran transmisi tersebut.

Sehubungan dengan uraian di atas mengenai sebab-sebab gangguan besar, di dalam sistem perlu dipasang *Under Frequency Relay* sebanyak mungkin. *Under Frequency Relay* sebaiknya dipasang sebanyak mungkin untuk melepas penyulang distribusi terlebih dahulu sehingga diharapkan tidak ada unit pembangkit yang ikut *trip*. Hal ini akan mempercepat proses menormalkan sistem setelah terjadinya gangguan.

Di samping memasang *Under Frequency Relay* juga perlu diusahakan agar cadangan berputar selalu cukup dan diusahakan agar aliran daya dalam sistem menunggu daya listrik dari sub sistem lain (Goo, dkk, 2016). tidak menimbulkan *trip* kaskade apabila ada unit pembangkit atau saluran transmisi mengalami gangguan.

Gangguan kaskade, menyusul *tripnya* PMT unit pembangkit atau *tripnya* PMT saluran transmisi dapat disebabkan karena terjadi ayunan daya dalam sistem sebagai akibat kurang stabilnya sistem. Untuk mencegah *tripnya* PMT dalam kondisi ayunan daya dapat dilakukan dengan memasang *blocking relay* atau *anti hunting relay* yang bekerja selama masa ayunan daya.

2.4.2 Pemulihan Pasca Kehilangan Tegangan Pada Sistem

“Kontinuitas Penyaluran” adalah tujuan dari pemulihan sistem tenaga listrik, yang berarti memasok beban dalam waktu sesingkat mungkin. Namun, prosedur itu sendiri memiliki kemungkinan kegagalan intrinsik yang harus diminimalkan. Selain itu, *blackout* adalah peristiwa langka sehingga operator pengatur sistem tenaga tidak terlatih secara efektif untuk mengatur sistem dalam



fase pemulihan. Oleh karena itu sangat penting bahwa operator pengatur sistem tenaga listrik mengembangkan rencana pemulihan sistem tenaga listrik terperinci yang harus diikuti sehingga proses pemulihan dapat berjalan dengan cepat dan efektif (Barsali, dkk, 2008).

Dua strategi dasar telah dipakai secara luas dalam prosedur pemulihan sistem tenaga listrik yaitu metode *restoration by path* dan metode *restoration by zones*. Metode *restoration by path* mengutamakan pengisian tegangan dari satu unit ke unit lain. Tujuan utama dari metode *restoration by path* adalah untuk memparalelkan sebanyak mungkin pembangkit tenaga listrik sebelum menormalkan kembali beban secara keseluruhan. Sebuah teknik yang berbeda jika menggunakan metode *restoration by zones*, sistem tenaga listrik akan dibagi menjadi beberapa zona (*island*) pemulihan. Setiap zona pemulihan memiliki minimal satu unit *black start*. Nantinya zona-zona yang telah pulih akan diparalelkan seluruhnya. Kriteria untuk memilih salah satu metode pemulihan dari keduanya sangat dipengaruhi jenis pembangkit dari sistem tenaga listrik yang *blackout* dan juga dipengaruhi oleh jumlah unit *black start* nya. Pemulihan dengan metode *restoration by zones* lebih cocok untuk sistem yang memiliki beberapa unit *black start*, sementara pemulihan dengan metode *restoration by path* cocok untuk kasus di mana unit *black start* nya hanya berada pada daerah tertentu saja. (Barsali, dkk, 2008).

2.4.3 Persiapan Untuk Mengatasi Gangguan Besar

2.4.3.1 Menyusun SOP (Standing Operation Procedures)

Dalam SOP (Standing Operation Procedures) harus disebutkan unit-unit pembangkit yang harus blackstart. Harus diperhatikan dalam penyusunan jadwal pemeliharaan, agar selalu ada unit yang bisa blackstart yang siap operasi atau bekerja.

2.4.3.2 Menyusun Ketentuan Konfigurasi Jaringan

Di setiap busbar pusat listrik maupun busbar gardu induk yang menyangkut



posisi saluran transmisi, dalam kaitannya dengan pengiriman dengan penerima tegangan.

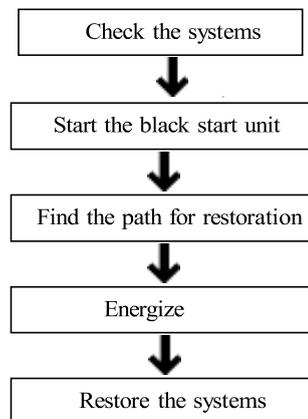
2.4.3.1 Ketentuan PMT Yang dibuka Saat Terjadi Blackout

Dalam persiapan mengatasi blackout harus ada ketentuan PMT yang harus bekerja duluan dalam mengatasi blackout agar dapat menghindari kerusakan sistem yang lebih parah lagi.

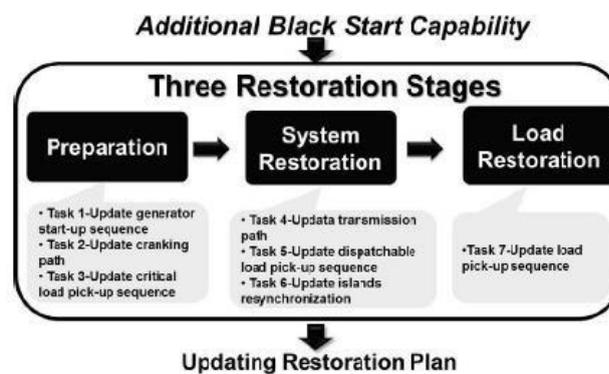
2.5 Black Start

Berdasarkan kebutuhan daya pada proses start-up, unit dapat dibagi menjadi dua kelompok: Black Start Unit, misalnya PLTA dan PLTG, yang dapat melakukan start dengan sumber listrik internal, dan Non Black Start Unit, seperti PLTU yang memerlukan sumber listrik eksternal (sun, dkk, 2011)

Untuk mencapai waktu pemulihan sistem tenaga listrik yang lebih cepat setelah gangguan blackout, penambahan unit black start mungkin berguna untuk mempercepat proses pemulihan. Untuk prosedur umum black start dapat dilihat pada gambar 2.17. setelah penambatan black start unit langkah-langkah pemulihan sistem tenaga listrik seperti urutan start unit-unit pembangkit, pemelihan jalur transmisi, dan urutan pemulihan beban, akan berubah. Kemudian masing-masing tahap pemulihan akan menyesuaikan langkah-langkah pemulihan untuk mengakomodasi unit black start yang baru dipasang. Ada tujuh tugas dalam tiga tahap restorasi dapat dilakukan untuk memperbaiki rencana pemulihan dengan pemasangan unit black start baru (sun, dkk, 2011) sebagaimana gambar 2.28



Gambar 2. 35 Prosedur umum dari black start (Goo, dkk, 2016)



Gambar 2. 36 Update rencana pemulihan setelah penambahan unit blackstart

Selain itu, pemulihan sistem pasca blackout juga tergantung dari lama start unit pembangkit. Proses start PLTA memerlukan waktu sekitar 4 menit, PLTG membutuhkan waktu sekitar 8-15 menit sementara turbin uap dapat membutuhkan waktu beberapa puluhan menit hingga hitungan jam (Sun, dkk, 2011).

$$\text{Kemampuan Pembangkit (\%)} = \frac{\text{Daya Terbaca (MW)}}{\text{Daya Maksimal (MW)}} \times 100\% \quad (2.15)$$

2. 6 Kebutuhan Daya Start Pembangkit Listrik (Cranking Power)

Semua unit pembangkit membutuhkan daya listrik untuk dapat melakukan



proses *start*, daya ini sering diistilahkan dengan *cranking power*. Daya ini digunakan untuk mengoperasikan peralatan bantu unit pembangkit sehingga unit tersebut mampu memunculkan sinyal *ready to start*. Karena belum adanya data yang valid mengenai cranking power unit pembangkit maka cranking power unit pembangkit dalam sistem 150 kv PLN Sektor Keramasan Palembang mengacu pada penelitian-penelitian sebelumnya, menurut jurnal penelitian IEEE “Black Start Capability Assesment in Power System Restoration” yang ditulis oleh Wei Sun, Chen Chiung Liu dan Shanshan Liu serta dari jurnal penelitian Electric power system research “Restoration Island Supplied by Gas Turbines” yang ditulis oleh S.Barsali,D. Poli dan A. Pratico jumlah daya yang dibutuhkan tergantung pada jenis unit pembangkit yakni:

- a. Kurang 1% dari daya terpasang pembangkit hidro, hanya beberapa ratus kilowatt untuk 100 MW pembangkit hidro
- b. 1% - 2% dari daya terpasang pembangkit turbin gas dan pembangkit geothermal
- c. 3% sampai 10% dari daya terpasang pembangkit turbin uap.
- d. Untuk cranking power unit PLTMG disamakan dengan persentasi unit turbin gas

sehingga kebutuhan cdaya start atau cranking power (CP) pembangkit listrik dapat dinyatakan dengan persamaan

$$CP = n\% \times \text{Daya Terpasang Pembangkit} \quad (2.16)$$

Keterangan :

CP = Cranking Power

n% = Nilai persentase tergantung jenis pembangkit yang akan dicari nilai cranking powernya

2.7 Interkoneksi Sistem Tenaga Listrik

Pusat listrik yang besar umumnya beroperasi dalam sistem interkoneksi. Pada sistem interkoneksi terdapat banyak pusat listrik dan banyak pusat beban yang



disebut Gardu Induk yang dihubungkan satu sama lain oleh saluran transmisi. Di setiap GI terdapat beban berupa jaringan distribusi yang melayani para konsumen tenaga listrik. Jaringan distribusi berta konsumen ini merupakan suatu subsistem distribusi. Sub sistem dari setiap GI umumnya tidak mempunyai hubungan listrik satu sama lain, Karena operasi pusat-pusat listrik dalam sistem interkoneksi saling mempengaruhi satu sama lain, maka perlu ada koordinasi. Koordinasi operasi ini dilakukan oleh pusat pengatur beban. Koordinasi terutama meliputi :

- a. Koordinasi pemeliharaan
- b. Pembagian beban yang ekonomis
- c. Pengaturan frekuensi
- d. Pengaturan tegangan
- e. Prosedur mengatasi gangguan

Pengaturan tegangan yang dilakukan tidak terlepas dari adanya potensi jatuh tegangan atau drop tegangan (ΔV) yang terjadi. Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu pengantar. Jatuh tegangan pada transmisi tenaga listrik berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban. Jatuh tegangan merupakan selisih antara tegangan kirim (V_K) dengan tegangan terima (V_T) yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{Jatuh Tegangan} = \Delta V = V_K - V_T \quad (2.17)$$

2. 8 Load Shedding

Load shedding atau pelepasan beban merupakan suatu skenario yang dilakukan untuk pengendalian dampak gangguan yang berpotensi menyebabkan gangguan *blackout*. Pelepasan beban dilakukan secara bertahap sesuai dengan tingkat turunnya frekuensi sistem tenaga listrik (Nugraheni, 2011).

Terjadinya pelepasan beban pada umumnya disebabkan oleh adanya beban lebih pada sistem, agar sistem menjadi seimbang kembali yakni seimbang antara *supply* daya oleh pembangkit dan permintaan beban oleh pelanggan maka dilakukanlah pelepasan beberapa beban. Sistem tenaga listrik yang bekerja stabil memiliki daya yang dihasilkan pembangkit memiliki besar yang sama dengan



jumlah daya permintaan beban.

Suatu generator akan berputar dengan frekuensi yang semakin menurun jika kopel penggerak mekanik generator besarnya kurang dari torsi beban. Ketika suatu generator pembangkit yang berada dalam suatu interkoneksi lepas sistem, secara otomatis beban yang awalnya menjadi tanggungan pembangkit yang lepas sistem akan menjadi tanggungan generator yang masih bekerja dalam sistem. Dengan demikian torsi beban pada generator yang masih mampu bekerja akan bertambah. Peningkatan torsi beban pada generator ini akan diimbangi dengan kopel mekanik penggerak generator dengan melakukan pengaturan pada governor untuk mempetahankan frekuensi kerja sistem tetap konstan. Namun ada saat ketika governor telah dibuka maksimal, kopel penggerak mekanik generator besarnya masih kurang dari torsi beban. Hal inilah yang menjadikan frekuensi generator menjadi turun. Untuk mengatasi hal tersebut tentu diperlukan suatu pengurangan torsi beban dengan beberapa cara diantaranya adalah pelepasan beban (Nugraheni, 2011).

Ketika akan dilakukan pelepasan beban yang bertujuan untuk pemulihan frekuensi, hendaknya memenuhi beberapa syarat antara lain :

- a. Pelepasan beban dilakukan secara bertahap yang bertujuan apabila pada pelepasan pada tahap pertama frekuensi yang normal belum juga pulih masih dapat dilakukan pelepasan beban tahap berikutnya untuk menormalkan frekuensi.
- b. Jumlah beban yang dilepas hendaknya seminimal mungkin sesuai dengan kebutuhan sistem dalam memperbaiki frekuensi.
- c. Beban yang dilepas adalah beban yang prioritasnya paling rendah dibandingkan beban lain dalam suatu sistem. Oleh sebab itu seluruh beban terlebih dahulu diklasifikasikan menurut kriteria-kriteria tertentu.
- d. Pelepasan beban harus dilakukan tepat guna. Oleh karenanya harus ditentukan waktu tunda minimum relai untuk mendeteksi apakah penurunan frekuensi generator akibat beban lebih atau pengaruh lain seperti masuknya beban yang sangat besar ke dalam sistem secara tiba-



tiba (Nugraheni, 2011).

Pelepasan beban akibat penurunan frekuensi diklasifikasikan menjadi 2 macam berdasarkan laju penurunannya yaitu :

a. Pelepasan beban manual

Pelepasan secara manual dilakukan apabila laju penurunan frekuensi sangat rendah. Sehingga untuk memperbaiki frekuensi tidak membutuhkan waktu cepat karena sistem dirasa aman untuk jangka waktu yang cukup lama. Pelepasan beban secara manual ini akan membutuhkan beberapa operator yang cukup banyak, waktu yang dibutuhkan pun cukup lama bila dibandingkan dengan pelepasan beban otomatis.

b. Pelepasan beban otomatis

Pelepasan beban otomatis dilakukan ketika laju penurunan frekuensi cukup tinggi. Dengan adanya pelepasan beban otomatis maka sistem secara keseluruhan dapat diselamatkan dengan cepat tanpa harus menunggu operator bekerja. Pelepasan beban otomatis biasanya didukung dengan beberapa komponen, seperti misalnya penggunaan rele frekuensi (Nugraheni, 2011).

2.9 Pengaturan Frekuensi

Dalam pemulihan sistem tenaga listrik pengaturan frekuensi sangat perlu diperhatikan karena beban yang dipulihkan harus seimbang dengan daya mampu unit *black start*. Penyimpangan frekuensi dari nilai nominal harus selalu dalam batas toleransi yang diperbolehkan. Daya aktif mempunyai hubungan erat dengan nilai frekuensi dalam sistem.

Menurut hukum Newton ada hubungan antara kopel mekanis penggerak generator dengan perputaran generator (Marsudi, 2015), yaitu :

$$T_G - T_B = Hx \frac{d\omega}{dt} \quad (2.18)$$

T_G = Kopel penggerak generator (N.m)

T_B = Kopel beban yang membebani generator (N.m)

H = Momen inersia dari generator beserta mesin penggeraknya (kg.m^2)



ω = Kecepatan sudut perputaran generator (rad/s) Sedangkan frekuensi yang dihasilkan generator adalah :

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

Hal ini berarti bahwa pengaturan frekuensi dalam sistem berarti pula pengaturan kopel penggerak generator atau juga berarti pengaturan daya aktif generator.

2.9.1 Peran Governor Dalam Pengaturan Frekuensi

Dalam pembangkit listrik, pengaturan putaran penggerak generator adalah menggunakan turbin. Pengaturan turbin ketika mulai bergerak hingga mencapai kondisi stabil dilakukan oleh governor. Governor merupakan suatu katup yang berfungsi mengatur banyak sedikitnya jumlah (debit) air ke turbin air, jumlah (entalpi) uap/gas ke turbin uap/gas atau bahan bakar solar yang dialirkan ke ruang bakar mesin diesel. Bila tidak ada governor maka mesin-mesin penggerak utama generator akan mengalami *overspeed* bila beban turun mendadak dan akan mengalami *overload* bila beban listrik naik.

Governor bekerja secara hidrolis/mekanis, sedangkan sinyal masukan dari keluaran arus generator berupa listrik, sehingga masukan ini perlu diubah ke mekanis dengan menggunakan elektrik *actuator* untuk menggerakkan motor listrik yang menghasilkan gerakan mekanis yang diperlukan oleh governor.

Pada beberapa generator yang beroperasi paralel, setelah sebelumnya disamakan tegangan, frekuensi, beda fasa dan urutan phasanya, perubahan beban listrik tidak akan dirasakan oleh masing-masing generator pada besaran tegangan dan frekuensinya selama beban masih dibawah kapasitas total paralelnya, sehingga tegangan dan frekuensi ini tidak digunakan sebagai sumber sinyal bagi governor. Untuk itu digunakan arus keluaran dari masing-masing generator sebagai sumber sinyal pembagian beban sistem paralel generator-generator tersebut. Mode kerja governor menurut karakteristik tanggapan governor terhadap penambahan beban yang *disupply* terbagi menjadi dua yaitu :



a. *Governor Droop*

Merupakan suatu mode governor yang mengatur kecepatan turbin pada berbagai variasi beban dapat menghasilkan daya aktif keluaran generator tetap. Ketika terjadi gangguan yang menyebabkan lepasnya beberapa beban, agar tidak terjadi pemborosan daya yang dikeluarkan pengaturan kembali sistem *droop* generator harus diatur oleh operator.

b. *Isochronous*

Merupakan suatu mode governor yang mengatur kecepatan turbin agar dapat menghasilkan daya aktif keluaran sesuai permintaan beban. Dengan begitu daya yang dihasilkan generator sesuai dengan kondisi beban. Sehingga apabila terjadi perubahan beban, maka governor akan memelihara putaran turbin agar frekuensinya tetap berada di dalam rentang yang diizinkan.

Pada saat terjadi penambahan beban secara mendadak dalam masa pemulihan, governor pada unit black start akan merespon secara otomatis menstabilkan putaran generator, putaran generator mempengaruhi frekuensi sistem. Untuk membaca frekuensi simulasi dalam bentuk satuan hertz dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut :

$$\text{Frekuensi (HZ)} = \text{Frekuensi terbaca (pun)} \times \text{Frekuensi Nominal (Hz)}$$

2.9.2 Speed Droop Governor

Speed droop adalah bilangan presentase yang menyatakan kepekaan turbin merespon perubahan frekuensi. Semakin kecil nilai presentase speed droop maka semakin peka terhadap perubahan frekuensi. Speed droop merupakan salah satu karakteristik governor yang perlu diperhatikan dalam pengaturan frekuensi. Sistem yang terdiri dari banyak unit pembangkit apabila terjadi perubahan beban maka unit pembangkit yang mempunyai speed droop kecil yang mengalami penambahan beban yang lebih besar daripada unit pembangkit yang mempunyai speed droop besar. Sistem yang terdiri dari banyak unit pembangkit sesungguhnya dapat



dianalogikan dengan sebuah unit pembangkit besar yang mempunyai speed droop tertentu. Dalam hal ini sering dipergunakan istilah statisme dari sistem yaitu suatu angka yang menggambarkan berapa MW yang diperlukan untuk menurunkan frekuensi sistem satu hertz. Statisme ini tergantung kepada banyaknya unit pembangkit yang beroperasi dalam sistem serta penyetelan speed droop-nya, statisme dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$\frac{F1-F2}{F2-F3} = \frac{-(P1-P2)}{-(P2-P3)} \quad (2.19)$$

Dimana $F1-F2$ = turunnya frekuensi karena beban naik dari $P1$ menjadi $P2$ dan $F2-F3$ = turunnya frekuensi karena beban naik dari $P2$ menjadi $P3$. Tanda negatif menunjukkan frekuensi F turun apabila beban P naik.

Jika statisme kita beri tanda k sedangkan $F1-F2 = \Delta F1$ dan $F2-F3 = \Delta F2$ sedangkan $P1-P2 = \Delta P1$ dan $P2-P3 = \Delta P2$, maka persamaan dapat ditulis :

$$K = \frac{\Delta F1}{\Delta F2} = \frac{-\Delta P1}{-\Delta P2} \quad (2.20)$$

Secara umum persamaan :

$$K = \frac{\Delta F}{-\Delta p} \text{ atau } \Delta P + \frac{\Delta F}{k} = 0 \quad (2.21)$$

Kebalikan dari statisme adalah $\frac{1}{k}$ dapat ditulis K_f sehingga didapat :

$$\Delta P + K_f \Delta F = 0$$

$$\text{Dimana } K_f = \frac{1}{k} = -\frac{\Delta P1}{-\Delta P2}$$

Konstanta K_f disebut energi pengaturan dari sistem dan dinyatakan dalam MW/Hertz. Apabila suatu pembangkit atau sistem diinterkoneksi dengan pembangkit atau sistem lain maka akan konstanta K_f dari masing-masing pembangkit atau sistem yang diinterkoneksi dapat ditinjau sebagai berikut.

Untuk masing-masing sistem berlaku persamaan :

$$\Delta P = -(K_f \Delta F) \quad (2.22)$$



Sedangkan ΔP untuk sistem interkoneksi adalah jumlah dari ΔP yang terjadi pada setiap sistem atau :

$$\Delta P \text{ interkoneksi} = \sum \Delta P_1 \quad (2.23)$$

Karena frekuensi dalam seluruh sistem yang diinterkoneksi adalah sama, menjadi :

$$\begin{aligned} \Delta P \text{ interkoneksi} &= K_f \text{ interkoneksi} \Delta F \\ &= \sum \Delta P_1 = \sum -K_f \Delta F \end{aligned}$$

Jadi didapat :

$$K_f \text{ interkoneksi} = \sum K_f$$

Dari persamaan bahwa energi pengaturan sistem interkoneksi merupakan jumlah energi pengaturan dari masing-masing pembangkit atau sistem terkoneksi. Persamaan () memiliki arti fisik bahwa pada sistem interkoneksi perubahan frekuensi lebih sukar terjadi, memerlukan perubahan beban yang lebih besar daripada sistem yang tidak diinterkoneksi. Konstanta K_f tergantung kepada penyetelan speed droop masing-masing governor yang ada dalam sistem, kalau speed droop-nya kecil, peka terhadap perubahan beban, maka K_f menjadi besar begitupun sebaliknya apabila speed droop disetel besar akan menghasilkan K_f yang kecil (Marsudi, 2015)

2.10 DigSILENT Power Factory 15.1

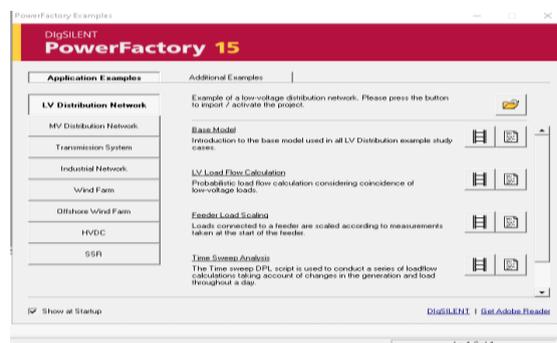
DIGSILENT Power Factory merupakan software engineering tool yang digunakan untuk analisis industri, utilitas, dan analisa sistem tenaga listrik. Perangkat lunak ini dirancang sebagai paket perangkat lunak canggih yang terintegrasi dan interaktif yang didedikasikan untuk sistem tenaga listrik dan analisis kontrol dalam rangka mencapai tujuan utama perencanaan dan optimasi operasi.

DIGSILENT atau Digital Simulation and Electrical Network Calculation Program. DIGSILENT dirancang dan dikembangkan oleh para insinyur berkualitas

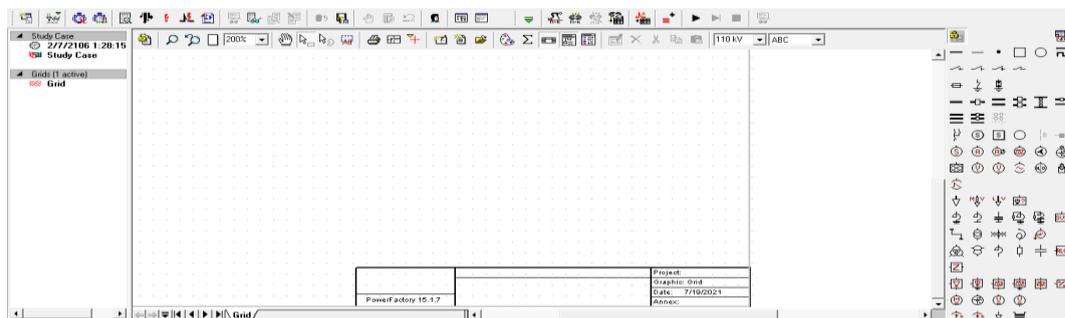


dan programmer dengan pengalaman bertahun-tahun di kedua bidang analisis sistem tenaga listrik dan bidang pemrograman. Akurasi dan validitas dari hasil yang diperoleh dengan perangkat lunak ini telah dikonfirmasi dalam sejumlah besar dan diimplementasikan oleh organisasi-organisasi yang terlibat dalam perencanaan dan operasi sistem tenaga.

Dalam rangka memenuhi kebutuhan analisis sistem tenaga listrik saat ini, kekuatan sistem paket perhitungan DIgSILENT dirancang sebagai alat rekayasa terpadu yang menyediakan teknik lengkap “walk-around” melalui semua fungsi yang tersedia. Dengan hanya menggunakan satu database, yang berisi semua data yang dibutuhkan untuk semua peralatan dalam sistem tenaga (misalnya data busbar, data generator, data proteksi, data controller), DIgSILENT dapat dengan mudah mengeksekusi salah satu atau semua fungsi yang tersedia, semua dalam lingkup program yang sama. Pada penelitian ini digunakan software DIgSILENT 15.1



Gambar 2. 37 Tampilan Program DIgSILENT 15.1



Gambar 2. 38 Tampilan icon program DIgSILENT 15.1



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Data Teknis PLTG Unit I ULPL Keramasan

PLTG Unit 1 ULPL Keramasan merupakan pembangkit yang sama berada di bawah naungan PT PLN (Persero) Pembangkitan Keramasan. PLTG unit 1 memiliki kapasitas daya terpasang *Base* 20100 kW, *Peak* 21650 kW akan tetapi mengingat untuk menjaga peralatan pembangkit dan mengingat kondisi pembangkit yang sudah tua maka PLTG ULPL Keramasan unit 1 penyaluran dayanya dibatasi maksimal 16 MW. PLTG Unit 1 masuk ke dalam sistem dan diinterkoneksi ke sistem 150 kV melalui Gardu Induk (GI) Keramasan. Spesifikasi generator pada PLTG Unit 1 adalah sebagai berikut :

Tabel 3.1 Spesifikasi Teknik Generator PLTG

Parameter	Spesifikasi
Merk	ALSHTOM
Type	T190-240
Power	25.125 Kva
Tegangan	10,5 kV \pm 5 %
Arus	1.382 A
Power factor	0,8 at 15 °C
Reaktansi	$X_d' = 203,1 \% X_d''$ $= 20,8 \%$
Rpm	3.000
Frekuensi	50 Hz
Resistansi Rotor	0,314
Sistem Pendinginan	Udara
Eksitasi	Vdc = 173 V, I = 410 A Tegangan control 24 Vdc Tegangan supply 110 Vdc

PLTG Unit 1 ULPL Keramasan memiliki daya mampu 21,35 MW. PLTG mempunyai waktu start yang relatif lebih singkat dibandingkan dengan PLTGU ULPL Keramasan.



3.2 Gambaran Umum Sistem Interkoneksi Sumbagsel

Kebijakan Direksi PT. PLN (Persero) untuk memisahkan pengelola unit pembangkit dan penyaluran dalam satuan organisasi yang berbeda, yaitu PT. PLN (Persero) Pembangkitan Sumatera Bagian Selatan dan PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban Wilayah Sumatera, maka tanggal 27 Januari 2005, PT. PLN (Persero) Kitlur Sumbagsel Sektor Keramasan berubah menjadi PT. PLN (Persero) Pembangkitan Sumbagsel Sektor Pembangkitan Keramasan.

Sekitar tahun 2006, PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) berencana untuk membangun pembangkit listrik yang menerapkan prinsip siklus kombinasi Brayton dan Rankine. Tujuan penggunaan siklus kombinasi adalah untuk memanfaatkan panas buang dari siklus Brayton yang dimanfaatkan untuk pemanasan awal pembuatan steam sehingga konsumsi bahan bakar lebih ekonomis. Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap Indralaya diharapkan dapat mengimbangi peningkatan kebutuhan listrik di Sumbagsel. Maka, pada tahun 2008 dilakukan peresmian Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap Indralaya. Sekitar tahun 2012, PT. Perusahaan Listrik Negara Persero Keramasan membangun Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap. Pada tanggal 10 Februari 2014 Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap diresmikan dan dioperasikan untuk pertama kalinya. Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap Sektor Keramasan diharapkan dapat mengimbangi peningkatan kebutuhan listrik di daerah Sumbagsel.

Adapun pembangkit yang beroperasi pada PT. PLN (Persero) Pembangkitan Sumbagsel Sektor Dalkit Keramasan dapat dilihat pada tabel 3.2

Tabel 3.2 Pembangkit Listrik PT. PLN (Persero) Sektor Dalkit Keramasan

Pembangkit Listrik	Jumlah Unit	Kapasitas Daya	Bahan Bakar	Mulai Beroperasi
PLTU Keramasan	2	12,5 MW	Gas	1974



PLTG Wescan Keramasan	2	11,75 MW	Gas	1976 (unit 1); 1978 (unit 2)
PLTG Alshom Keramasan	1	21,35 MW	Gas	1976
PLTGU Keramasan	2	80 MW	Gas	2013

(Sumber: PT. PLN (Persero) Pembangkitan Sumbagsel Sektor
Pembangkitan Keramasan)

a. Kondisi Terkini

Sistem interkoneksi Sumatra Bagian Selatan (Sumbagsel) terdiri dari 3 UPT yaitu : wilayah Sumatra Selatan, Wilayah Bengkulu dan Wilayah Lampung, Sistem Sumbagsel terdiri dari 200 bus, 94 saluran dan 156 transformator, 66 generator dan 77 beban. Adapun daftar unit pembangkit yang berada di Sumbagsel dapat dilihat di tabel 3.3

Tabel 3.3 Unit Pembangkit, Kapasitas Daya, Durasi Keluran dan Jumlah Pemadaman Sistem Sumbagsel

No	UNIT PEMBANGKIT	DAYA MAMPU (MW)	DURASI KELUARAN (JAM)	JUMLAH PEMADAMAN (KALI)
1	PLTA BATUTEGI 1	10	12	4
2	PL TA BATUTEGI 2	13	9	4
3	PLTA BESAI 1	45	20	18
4	PLTA BESAI 2	45	18	16
5	PLTA MUSI 1	70	11,25	2
6	PLTA MUSI 2	70	25,12	2
7	PLTA MUSI 3	70	9,05	2
8	PLTA TES 1	0,53	95,64	12
9	PLTA TES 2	0,53	18,05	10



10	PLTA TES 3	4	11,14	11
11	PLTA TES 4	4	23	9
12	PLTA TES 5	4	8	3
13	PLTA TES 6	4	40,07	22
14	PLTD BUKIT ASAM 1	5	0	0
15	PLTD BUKIT ASAM 2	5	Tidak Beroperasi	Tidak Beroperasi
16	PLTD SUNGAI JUARO 1	11,34	65	4
17	PLTD SUNGAI JUARO 2	10,68	77	6
18	PLTD SUKA MERINDU 1	4,3	0	0
19	PLTD SUKA MERINDU 2	4,3	0	0
20	PLTD SUKA MERINDU 3	4,3	0	0
21	PLTD TEGINENENG 1	6,33	301,42	36
22	PLTD TEGINENENG 2	6,33	Tidak Beroperasi	Tidak Beroperasi
23	PLTD TEGINENENG 3	6,33	583,29	40
24	PLTD TELUK BETUNG 1	0,9	48	3
25	PLTD TELUK BETUNG 2	0,9	48	5
26	PLTD TELUK BETUNG 3	0,9	48	5
27	PLTD TELUK BETUNG 8	3,25	130,94	17
28	PLTD TELUK BETUNG 10	3,95	99,22	16
29	PLTD INDRALAYA GT 1.1	45	115,79	22
30	PLTD INDRALAYA GT 1.2	38,379	40	17
31	PLTD INDRALAYA ST 1.0	37,999	256,44	26
32	PLTD TM 1 BORANG	17,46	222,12	49
33	PLTD TM 2 BORANG	18	2263,41	188
34	PLTD GUNUNG MEGANG 1	40	1784,93	163
35	PLTD GUNUNG MEGANG 2	40	639,3	75
36	PLTG KERAMASAN 1	11,75	131,06	20



37	PLTG KERAMASAN 2	11,75	616,15	15
38	PLTG KERAMASAN 3	21,35	96,92	8
39	PLTG TALANG DUKU 1	13,6	Tidak Beroperasi	Tidak Beroperasi
40	PLTG TALANG DUKU 2	13,6	0	0
41	PLTGU AGP BORANG 1	100	500	1
42	PLTGU AGP BORANG 2	50	600,06	22
43	PLTU NEW TARAHAH 1	50	680,2	22
44	PLTU NEW TARAHAH 2	50	531,01	28
45	PLTU BUKIT ASAM 1	37,184	524,61	28
46	PLTU BUKIT ASAM 2	40	168,71	25
47	PLTU BUKIT ASAM 3	39,999	179,92	18
48	PLTU BUKIT ASAM 4	59,939	35,05	18
49	PLTU KERAMASAN 1	12,5	221,36	29
50	PLTU KERAMASAN 2	12,5	224,86	21
51	PLTD PULAU BAAI 1	5	0	0
52	PLTD PULAU BAAI 2	4	Tidak Beroperasi	Tidak Beroperasi
53	PLTD PULAU BAA 3	1,5	0	0
54	PLTD PULAU BAA 4	1,5	0	0
55	PLTD PULAU BAA 5	3	0	0
56	PLTD TARAHAH 1	5	25,78	3
57	PLTD TARAHAH 2	4,71	515,00	15
58	PLTD TARAGAN 3	3,5	8,75	2
59	PLTD TARAHAH 4	6	450,08	30
60	PLTD TARAHAH 5	4,67	Tidak Beroperasi	Tidak Beroperasi
61	PLTD TARAHAH 6	4,67	5,60	5
62	PLTD TARAHAH 7	6,62	0	0



63	PLTG TARAHAH	16	27,55	13
64	PLTD TALANG PADANG 1	1	0	0
65	PLTD TALANG PADANG 2	1	0	0
66	PLTD TALANG PADANG 3	1	0	0
67	PLTD TALANG PADANG 4	0,119	0	0
68	PLTD TALANG PADANG 5	0,2	0	0
69	PLTD TALANG PADANG 6	0,2	0	0
70	PLTD TALANG PADANG 7	0,2	0	0

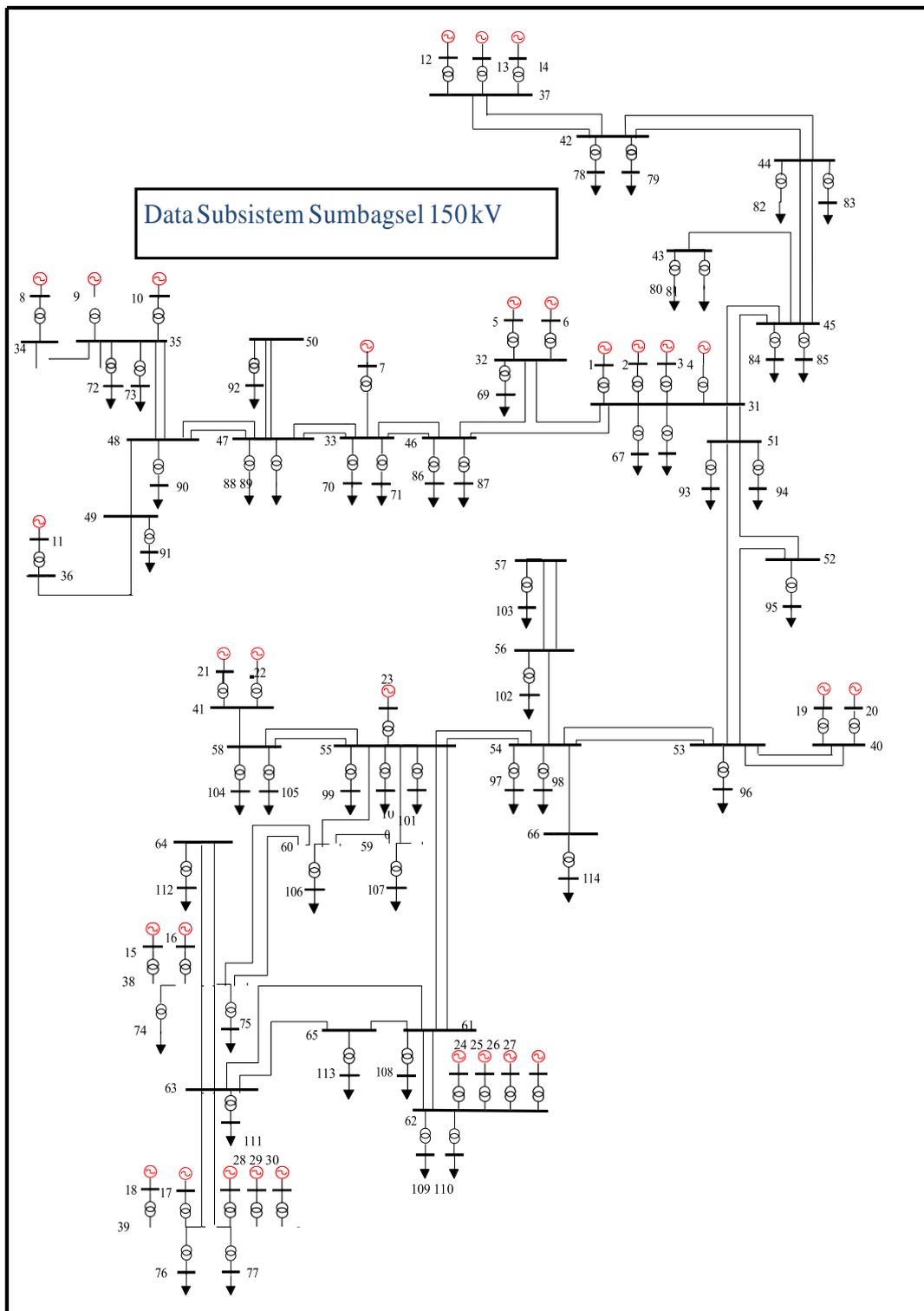
(Sumber: PT. PLN (Persero) UPB Sumbagsel)

Tabel 3.4 Total Daya Pembangkitan dan Beban Sumbagsel

No	Wilayah Kerja	Pembangkit (MW)	LWBP (MW)	WBP (MW)
1	Sumatera Selatan	1004	362,925	568,338
2	Bengkulu	226	64,439	99,148
3	Lampung	470,6	381,052	562,628
Total		1700,6	808,416	1230,114



Gambar 3. 1 Sistem Interkoneksi Sumatera



Gambar 3. 2 One line diagram sistem interkoneksi Sumbagsel



b. Load Shedding

Load Shedding adalah skenario pengendalian impact gangguan yang berpotensi menimbulkan hilangnya tegangan pada sistem (blackout) dengan pembuangan sebagian beban melalui skema relay proteksi Under Frequency Relay (Hudah, 2014). Pada sub sistem interkoneksi 150 kV ULPL Keramasan, load shedding terlaksana melalui beberapa tahapan mengikuti penurunan frekuensi. Karena sub sistem Palembang merupakan bagian i nterkoneksi dari sistem Sumatera Bagian Selatan (Sumbagsel) maka data load shedding sub sistem Keramasan akan disajikan berdampingan dengan data load shedding sistem Sumbagsel.

c. Skema Islanding

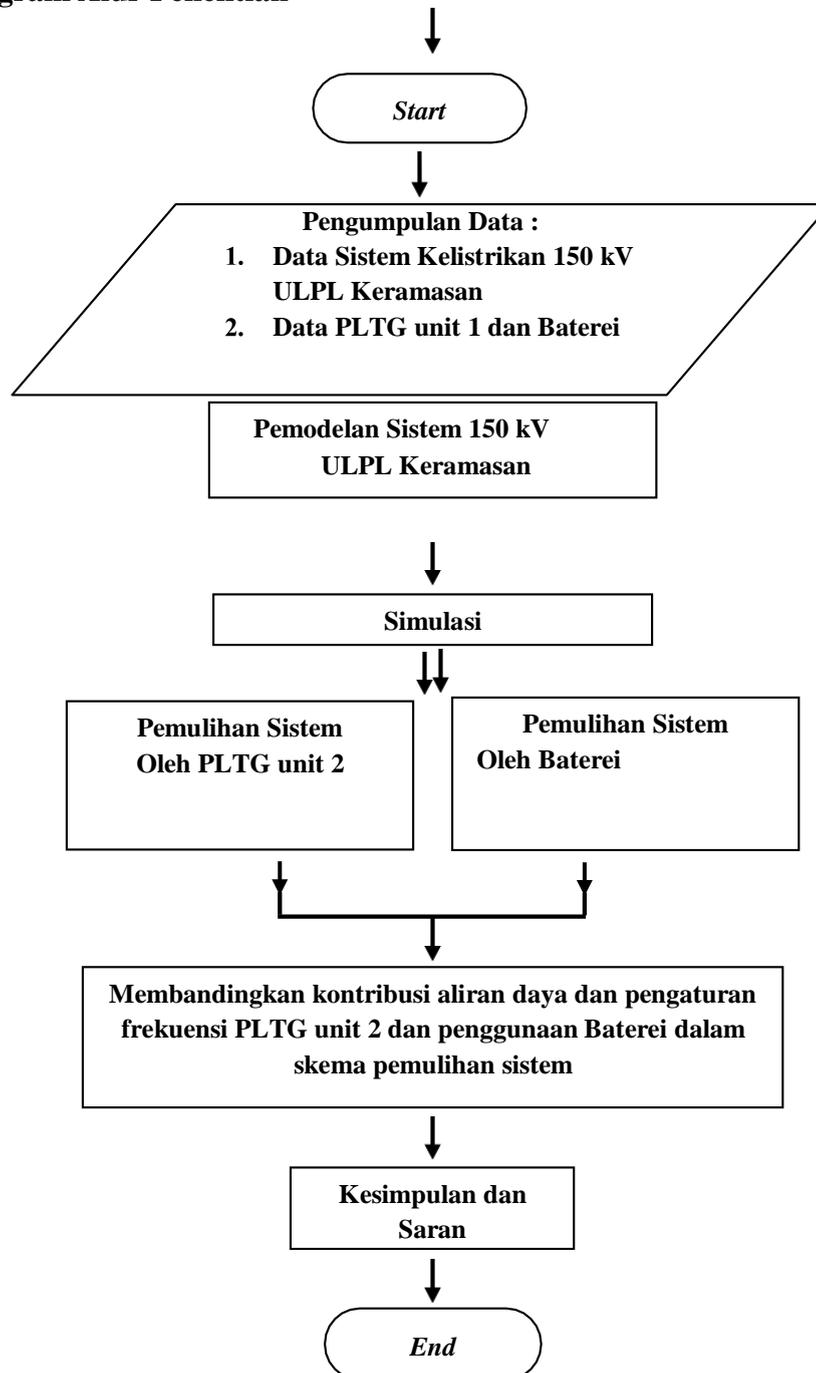
Islanding merupakan bagian dari strategi pengendalian impact gangguan berupa proses pemisahan sistem interkoneksi sesuai skenario area pembangkit dan beban. Skema islanding merupakan skenario lanjutan dari skenario load shedding yang juga memanfaatkan Under Frequency Relay (UFR) sebagai skenario kerjanya (Hudah, 2014). Islanding sub sistem Palembang akan mengikuti ketetapan islanding sistem sumbangsel

Under Frequency Relay load shedding tahap 0 hingga V. Tujuan islanding adalah sebagai berikut (PLN P3BS, 2014) :

1. Menghindari terjadinya sistem blackout atau padam total,
2. Mempermudah proses pemulihan jika terjadi gangguan sistem yang meluas,
3. Mempercepat waktu pemulihan ke kondisi normal.



3.3 Diagram Alur Penelitian





BAB IV PEMBAHASAN

4.1 Simulasi Aliran Daya PLTG Unit 1

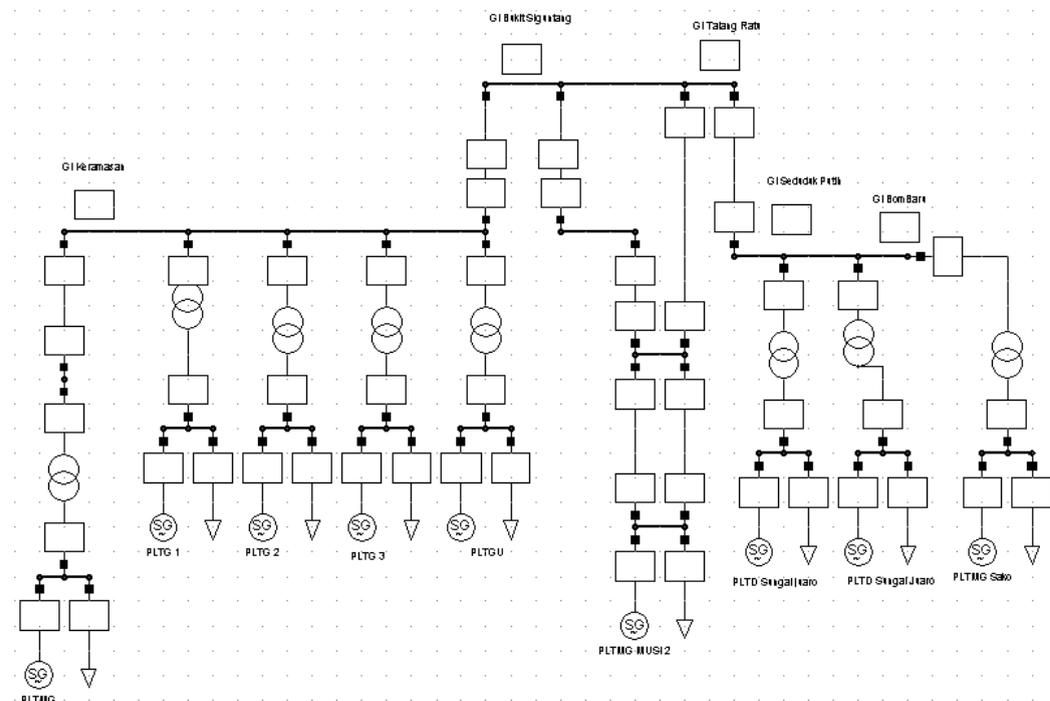
Dalam mendukung proses pemulihan sistem pasca gangguan blackout PLTG unit 1 sektor keramasan berperan sebagai unit blackstart dalam mensuplai pembangkit non black start yang berada di sistem interkoneksi Sumbagsel. Adapun daya mampu yang dihasilkan dari PLTG unit 1 sektor keramasan adalah sebesar 16 MW, maka tidak semua pembangkit yang berada di sistem interkoneksi Sumbagsel dapat di suplai oleh sistem black start PLTG keramasan. Berikut merupakan pembangkit yang beroperasi pada PT.PLN (Persero) sektor keramasan dapat dilihat pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Pembangkit Listrik PT.PLN (Perero) Sektor Dalkin Keramasan

Pembangkit Listrik	Jumlah Unit	Kapasitas Daya	Bahan Bakar
PLTU Keramasan	2	12,5 MW	Gas
PLTG Wescan Keramasan	2	11,75 MW	Gas
PLTG Alshtom Keramasan	1	16 MW	Gas
PLTGU Keramasan	2	80 MW	Gas

(Sumber: PT. PLN (Persero) *Pembangkitan Sumbagsel Sektor Pembangkitan Keramasan*)

Adapun pembangkit yang mendapat daya dari PLTG keramasan adalah PLTGU Keramasan, PLTMG Musi 2, PLTMG Sewa Keramasan, PLTD Sungai Juaro, PLTMG Sako, adapun topologi sistem yang akan dipulihkan dapat dilihat seperti gambar 4.1



Gambar 4. 1 Skema Pemulihan Oleh PLTG Unit 1

Gambar 4.1 Skema Pemulihan Oleh PLTG Unit 1

Adapun Dalam pemodelan sistem setiap unit pembangkit dikopel dengan komponen beban. Komponen beban yang berada di samping tiap unit pembangkit mewakili peralatan bantu yang berarti membutuhkan daya (cranking power).

Fokus pemulihan oleh pembangkit black start adalah melakukan suplai daya menuju peralatan bantu pembangkit non black start. Kebutuhan cranking power unit pembangkit non black start yang harus di suplai dapat di hitung dengan perhitungan menggunakan persamaan 2.16 :

- a. Cranking power PLTU sektor keramasan 12,5 MW
 $10\% \times 12,5 \text{ MW} = 1,25 \text{ MW}$
- b. PLTG Wescan Keramasan 11,75 MW
 $1\% \times 11,75 = 0,1175 \text{ MW}$
- c. PLTG Alshatom Keramasan 16 MW



- 1% x 21,35 MW = 0,16 MW
- d. PLTGU Keramasan 80 MW
1% x 80 MW = 0,8 MW
- e. PLTMG Sewa Keramasan 20 MW
1% x 20 MW = 0,2 MW
- f. PLTMG Musi II 1,2,3. 19,2 MW
1% x 19,2 MW = 0,192
- g. PLTMG Musi II ST 7 MW
1% x 7 MW = 0,07 MW
- h. PLTMG Sako 12 MW
1% x 12 MW = 0,12 MW

Dari perhitungan di atas dapat dilihat pembangkit PLTG Alshtom dan Wescan keramasan membutuhkan total cranking power 0,27 MW, PLTU keramasan memerlukan 1,25 MW, PLTGU memerlukan 0,8 MW, PLTMG sewa keramasan 0,2 MW, PLTMG Musi II ST 0.07 MW, PLTMG Sako 0,12 MW dan PLTMG Musi II 1,2,3 dengan keperluan cranking power 0,192 MW. Hasil perhitungan cranking power unit pembangkit dirangkum dalam tabel 4.2

Tabel 4.2 Cranking power pembangkit

No	Nama Pembangkit	Daya Terpasang (MW)	Cranking Power (MW)
1	PLTU KERAMASAN	12 ,5 MW	1,25 MW
2	PLTG WESCAN KERAMASAN	11,75 MW	0,1175 MW
3	PLTG ALSHTOM KERAMASAN	16 MW	0,16 MW
4	PLTGU KERAMASAN	80 MW	0,8 MW
5	PLTMG SEWA KERAMASAN	20 MW	0,2 MW
6	PLTMG MUSI II 1,2,3	19,2 MW	0,192 MW

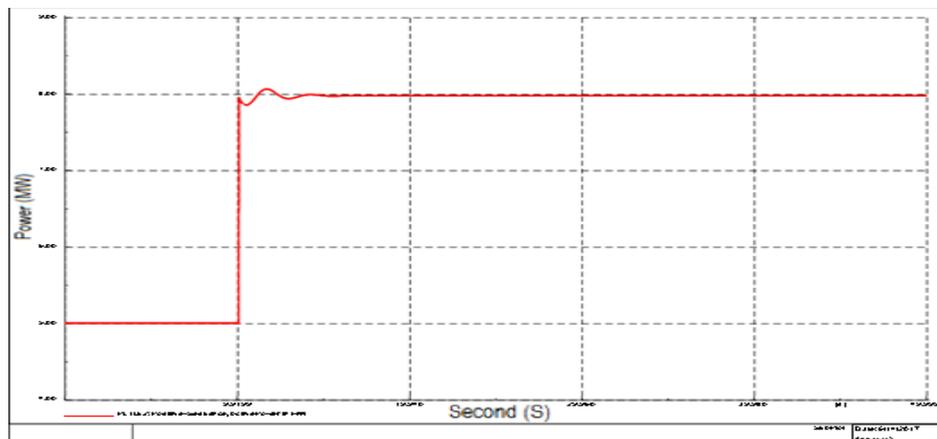


7	PLTMG MUSI II ST	7 MW	0,07
8	PLTMG SAKO	12 MW	0,12 MW
Total		178,45	2,9095

Berdasarkan skema pemulihan diatas dapat dilihat aliran transfer daya sistem 70 kv Palembang yang meliputi sembilan gardu induk, semua di suplai dari sistem 150 kv dari gardu induk keramasan dan gardu induk borang, dimana gardu induk keramasan mentransfer ke gardu induk bungaran dan gardu induk bukit siguntang dan gardu induk talang ratu. Sementara gardu induk borang menstrafer ke gardu induk seduduk putih dan sungai juaro gardu induk kedukan dan gardu induk bom baru.

4.2 Simulasi Step Response Governor PLTG

Dalam perannya sebagai blackstart pembebanan pada PLTG dilakukan secara bertahap sesuai kemampuan governornya dalam mempertahankan putaran (frekuensi) sesuai dengan skema pengaturan frekuensi load shedding sistem. Skema Grafik Step Response Governor PLTG apabila (initial load) 5 MW dan beban maksimal yang bisa ditambah sebesar 3 MW, adapun grafik skema simulasi step governor dapat dilihat pada gambar 4.2



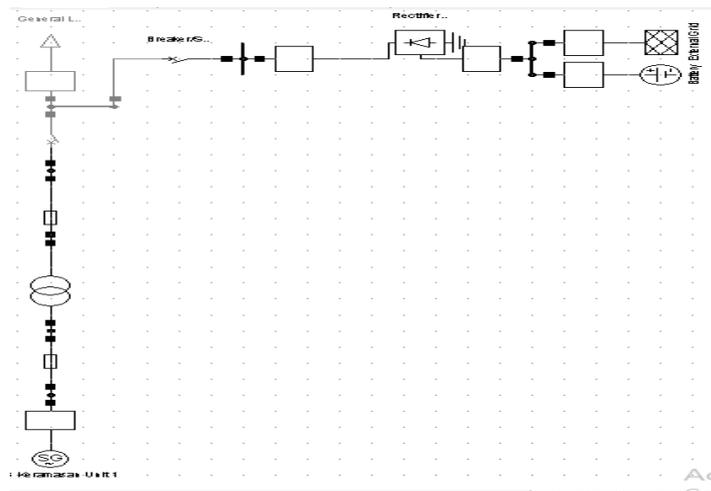
Gambar 4.2 Grafik Penambahan Beban PLTG Terhadap Waktu



Pada grafik di atas pada sumbu x menyatakan waktu simulasi (detik) dan sumbu y menyatakan beban (MW). Pada simulasi kali ini dilakukan dengan 2 tahap yaitu ketika PLTG terhubung dengan initial load dan saat PLTG menahan beban additional load. PLTG terhubung dengan beban initial load 5 MW pada detik ke-0 dan menahan beban (additional load) pada detik ke 10 dan waktu maksimal ke 50 detik.

4.3 Kontribusi Batrei

Pada saat melakukan black start PLTG unit sektor keramasan sangat memerlukan baterai sebagai penggerak awal diesel emergency (EDG) ketika diesel emergency dapat di hidupkan dengan memanfaatkan daya dari baterai, kemudian diesel emergency akan menggerakkan motor-motor dc lalu kemudian memutar turning gear 64 rpm, lalu proses cranking oleh diesel start di 1050 rpm kemudian lanjut purging dan firing sehingga terjadi pembakaran di combustor dan gas hasil pembakaran melalui nozzle menuju sudut-sudut turbin dan accelerating putaran mulai naik menuju full speed no load 4820 rpm



Gambar 4.3 Single Line PLTG Unit 1

4.4 SOP PLTG

Untuk pengoprasian Start PLTG di PT.PLN(Persero) UPDK Keramasan



dilakukan oleh petugas operator control room dan operator lokal. Tugas operator control room adalah mengontrol start unit yang dilakukan dari ruang kontrol dalam hal ini melakukan start unit secara otomatis agar unit mudah dioperasikan, apabila terjadi gangguan atau kegagalan maka operator control room menginstruksikan kepada operator lokal untuk mengecek keadaan dilokasi unit. Tugas dari operator lokal adalah memonitor peralatan yang berada dilokasi, apabila terjadi kesalahan atau kegagalan yang terjadi dilokasi maka operator lokal menginstruksikan kepada operator kontrol room untuk dicek diperbaiki ataupun dilakukan start secara manual, dalam hal ini operator lokal dan operator control room saling bersinergi agar terlaksananya pengoprasian PLTG yang aman dan lancar sesuai SOP.

Tabel 4.3 SOP Pengoprasian PLTG Keramasan Apa Bila Terjadi Gangguan

No	Kegiatan Operator CCR/HMI	No	Kegiatan Operator Lokal
1	Saat terjadi blackout, OFF kan Breaker 52 TAM / Supply PS	1	Posisikan handle dilokal ke posisi emergency kemudian start Diesel Emergency/ EDG sesuai SOP lalu ON kan breaker EDG
2	Pastikan Turning gear dan lube oil pump pada HMI Posisi operasi.	2	Pastikan Turning Gear dan lube oil pump operasi normal.
3	Pastikan start permissive di HMI complete	3	Pastikan breaker fan cooling dll posisi auto.
4	Start unit sesuai SOP hingga Full speed No Load Amati vibrasi Turbin , Kompresor dan generator. Pastikan vibrasi normal.	4	Monitoring kondisi Peralatan Lokal



	Apabila diatas 3 mills alarm, 7 mills setting trip vibrasi.		
5	Setelah vibrasi normal dan aman,klik Generator Control Panel pada HMI : -DECS MODE Posisikan FCR (MAN) -DEAD BUS Posisikan ENABLE	5	Monitoring kondisi Peralatan Lokal
6	Pada panel sinkron di ruang control, posisikan switch selector ke posisi Manual.	6	Monitoring kondisi Peralatan Lokal
7	Klik pada HMI menu Generator Control Panel, atur tegangan generator di 10.8 s/d 11 KV, klik raise/ lower untuk menaikkan dan menurunkan tegangan generator pada voltage regulator.	7	Monitoring kondisi Peralatan Lokal
8	Klik pada HMI menu speed/load Control, klik enable control dan klik raise/ lower untuk mengatur frekuensi generator di 50.0 – 50.10 HZ	8	Monitoring kondisi Peralatan Lokal



9	Komunikasikan ke UPB untuk sinkron 52 G.	9	Monitoring kondisi Peralatan Lokal
10	Lakukan Sinkronisasi dengan : a. mengubah selector menjadi Auto Synchron. b. Pastikan Generator breaker (52GX) dalam kondisi CLOSE .	10	Ubah selector mode sinkron dari OFF menjadi AUTO.
11	Setelah PMT 52G “Close” pindahkan mode control ke posisi “ISOCH” . -Atur tegangan dengan “voltage regulator” dan mengatur frekuensi dengan “speed/load control/ set poin.	11	Monitoring kondisi Peralatan Lokal
12	Komunikasikan secara kontinyue pengaturan tegangan dan frekuensi dengan upb.	12	Monitoring kondisi Peralatan Lokal
13	Saat sinkron trafo IBT 70 KV keramasan segera posisikan mode control “ISOCH” Ke “DROOP”. Naikan beban ke 2.5 MW dengan setpoin.	13	Monitoring kondisi Peralatan Lokal
14	Saat beban 2,5 MW koordinasi dengan operator lokal untuk memposisikan handle dari emergency ke normal dan breaker edg off baru setelah itu ON kan PS dari common aux	14	Off kan breaker EDG di local dan posisikan handle ke normal



	diruang kontrol		
--	-----------------	--	--

SOP ini digunakan sebagai panduan dalam melakukan start pada PLTG WESCAN 1 keramasan pada saat terjadi padam total (Blackout) pada sistem sumbagsel dan juga untuk line charging pada sistem 70 KV. Pada saat sistem pengoprasian gas turbin beroperasi mulai dari putaran turning gear 64 rpm lalu proses cranking oleh diesel start di 1050 rpm kemudian lanjut purging dan firing sehingga mulai terjadi pembakaran di combustor dan gas hasil pembakaran melalui nozzle menuju sudut-sudut turbin dan accelerating putaran mulai naik menuju full seep no load 4820 Rpm.

Spesifikasi Peralatan

Merk/Model	:	WESTINGHOUSE CANADA.LTD/W-191-G
No SER	:	66S6028
Daya	:	14.779 MW
Putaran	:	4830 RPM
Bahan Bakar	:	Natural Gas
Tahun Operasi	:	April 1976

Instruksi Kerja

1. Mempersiapkan APD dan alat kerja berupa :

- Helm pengaman
- Sepatu safety
- Sarung Tangan
- Kacamata pelindung
- Majun
- Masker
- Ear Plug
- Radio komunikasi
- Alat tulis



2. Pelaksana/personal terkait
 - Operator CCR
 - Operator lokal
 - Teknisi pemeliharaan
3. Memastikan peralatan auxiliary DC dalam posisi AUTO. Apabila selector switch dalam LOCAL, ubah selector ke posisi AUTO
4. Memeriksa peralatan system DC (Lube Oil Pump DC, Turning Gear,dll) meliputi : pemeriksaan tegangan dan arus baterai di area GT Compartment dan ruang Baterai gedung CCR
5. Memastikan EDG dalam kondisi AUTO dan beroperasi normal (sesuai dengan SOP EDG)
6. Memastikan 52G dalam posisi open dan 52L dalam posisi close (apabila 52G dalam kondisi close, maka ubah posisi 52G dengan cara menekan tombol open)
7. Koordinasi dengan P3BS untuk energize Trafo
8. Koordinasi dengan P3BS untuk persiapan start unit

Prosedur Persiapan

- Operator lokall melakukan pengecekan level bahan bakar, jaket water, level pelumas pada diesel start dan diesel emeergency, breaker fan cooling, pompa pelumas posisi ON
- Operator control room melakukan pengecekan pada HMI permissive ready to start.

Tabel 4.4 Prosedur Persiapan

No	Kegiatan Operator Control Room	No	Kegiatan Operator Lokal
1	Pastikan komputer HMI operasi normal	1	Pastikan Diesel start posisi standby <ul style="list-style-type: none"> - Check kondisi pelumas - Check air radiator



			- Check level bahan bakar
2	Pastikan program Graphics Ovation sudah terbuka	2	Pastikan sistem pelumas operasi normal
3	Pastikan <ul style="list-style-type: none"> - Primary lube oil pump dan Turning Gear beroperasi - Bleed valve posisi terbuka - Valve gas posisi open 	3	Pastikan air compressor operasi normal.
4	Pastikan TRIP CONDITION tidak ada alarm.	4	Pastikan valve gas posisi open dan pressure gas di batas normal
5	Pastikan START PERMISSIVES terpenuhi dan unit ready to start	5	Pastikan cooling tower fan, building fan, compartement fan operasi normal
		6	Pastikan MCC (Motor Control Central) kondisi normal
		7	Pastikan di lokal tidak ditemukan di temukan kebocoran oil, bahan bakar solar serta gas



Tabel 4.5 Prosedur Start

No	Kegiatan Operator Control Room	No	Kegiatan Operator Lokal
1	Klik Menu Turbine Control Klik Operation Select Pilih Auoto Klik Load Select Pilih Presel Klik Master Control Pilih Start	1	Monitoring kondisi peralatan lokal, pengecekan kebocoran, memantau parameter dilokal, serta berkomunikasi dengan operator room
2	Klik Menu DIESEL ENG STATUS Pastikan DIESEL ENGINE STATUS RUNNING	2	
3	Klik Menu START-UP SUMMARY Pastikan Kenaikan SPEED TURBINE	3	
4	Perhatikan Kenaikan Vibrasi Turbin Compresor dan generator	4	
5	Pastikan SPEED + 1060 RPM (22%) Turbine Fire, ditandai dengan tampilnta bunga api pada turbin	5	



6	Pastikan SPEED + 2460 RPM (51%) Putaran DIESEL ENGINE Lepas dari turbine, ditandai dengan speed diesel menurun hingga Idie speed untuk cooldown	6	
7	Pastikan SPEED + 4636 RPM (96%) Bleed Valve CLOSE	7	
8	Pastikan SPEED + 4830 RPM (100%) full speed no load (FSNL)		

Tabel 4.6 Prosedur Syncrone ke Sistem Secara AUTO

No	Kegiatan Operator Control Room	No	Kegiatan Operator Lokal
1	Klik Menu Generator Control tunggu +/-12 Menit saat FSNL EXITASI akan masuk, ditandai dengan munculnya atau dengan naiknya tegangan. Jika diperlukan masuk sistem lebih cepat dengan kondisi unitnya aman, dapat langsung Klik EMERGENCY	1	Mentoring kondisi peralatan lokal, pengecekan kebocoran, memantau parameter dilokal, serta berkomunikasi dengan operator control room



	EXICITATION Pilih ON		
2	Berkordinasi dengan Dispatcher UPB, minta izin agar dapat masuk sistem	2	
3	Pengecekan alarm pada panel control syncrone, Tekan Reset	3	
4	Posisikan Syncronnizing di Auto, pastikan lampu indikasi syncrone berputar	4	
5	Saat posisi lamp u indikasi di tengah 52G akan close dan unit sudah masuk system dengan ditandai kenaikan beban menuju 2,5 MW	5	
6	Berkoordinasi kembali dengan dispatcher UPB, infokan dengan unit sudah masuk system dan naikan beban (MW) secara bertahap sesuai permintaan UPB	6	



Tabel 4.7 Syncrone ke Sistem Secara Manual

No	Kegiatan Operator Control Room	No	Kegiatan Operator Lokal
1	Klik Menu Generator Control tunggu +-12 Menit saat FSNL EXITASI akan masuk, ditandai dengan munculnya atau dengan naiknya tegangan di menu Generator dat.jik a diperlukan masuk ke system lebih cepat dengan kondisi unitnya aman, dapat lamgsung Klik EMERGENCY EXICITATION Pilih ON	1	Mentoring kondisi peralatan lokal, pengecekan kebocoran, memantau parameter dilokal, serta berkomunikasi dengan operator control room
2	Berkordinasi dengan Dispatcher UPB, minta izin agar dapat masuk sistem	2	
3	Pengecekan alarm pada panel control syncrone, Tekan Reset	3	
4	Posisikan Syncronnizing di manual, pastikan lampu indikasi syncrone bergerak	4	
5	Atur voltage control dan governor pada panel control atau dapat juga di atur melalui Generator control panel klik voltage regulator pilih raise atau lower Klik SPEED/Load Control,	5	



	Klik Enable Control pilih Raise atau Lower		
6	Saat lampu indikasi ditengah putar circuit breaker ke posisi cloese, 52G akan close dan unit sudah masuk system dengan ditandai kenaikan beban menuju 2,5 MW	6	
7	Berkoordinasi kembali UPB, Infokan unitsudah masuk system dan naikan beban MW secara bertahap sesuai permintaan UPB		

Tabel 4.8 Prosedur Menaikkan dan Menurunkan Beban MW

No	Kegiatan Operator Control Room	No	Kegiatan Operator Lokal
1	Klik Menu Generator Control Panel Pilih MEGAWATT Control Klik ENABLE Control Klik RAISE untuk Menaikkan Beban MW Klik LOWER untuk menurunkan beban MW atau pakai SETPOINT Target Masukkan nilai MW yang diinginkan atau yang diminta Dispatcher UPB	1	Menotoring kondisi peralatan lokal, pengecekan kebocoran, memantau parameter di lokal, serta berkomunikasi dengan operator control room



	kemudian Enter. Secara bertahap beban akan naik atau turun sesuai yang diminta		
--	--------------------------------------------------------------------------------	--	--

Tabel 4.9 Presedur Stop Unit Secara Auto/Manual

No	Kegiatan Operator Control Room	No	Kegiatan Operator Lokal
1	Lakukan koordinasi dengan Dispatcher UPB, unit siap di stop	1	Mentoring kondisi peralatan lokal, pengecekan kebocoran, memantau parameter dilokal, serta berkomunikasi dengan operator control room
2	Klik Menu Turbine Control pilih Master Control Klik Stop Beban MW secara bertahap akan tururn hingga 0 MW dan secara auto akan melepas 52G, ditandai dengan lampu indikasi hijau menyala	2	
3	Berkoordinasi kembali dengan Dispatcher UPB, infokan bahwa unit telah lepas system	3	
4	Pilih Operation Select klik off	4	
5	Putaran atau speed turbine	5	



	akan bertahap turun hingga 0 RPM		
6	Pastikan primary lube oil pump operasi 4200 Rpm Pastikan Turning Gear Operasi 470 Rpm pastikan unit standby	6	

*(Sumber: PT. PLN (Persero) Pembangkitan Sumbagsel Sektor
Pembangkitan Keramasan)*



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. PLTG unit 1 sektor keramasan dapat menghasilkan daya sebesar 16 MW untuk melakukan suplai daya menuju pembangkit yang berada di sistem interkoneksi sumbagsel
2. PLTG unit 1 sektor keramasan mampu berperan dalam melakukan black start dan mengirim suplai pada pembangkit non black start unit, dalam hal ini seperti : PLTGU dan PLTU keramasan yang masih memerlukan sumber listrik dari eksternal. Dalam pengoprasian nya PLTG keramasan memiliki waktu start yang relatif lebih singkat dibandingkan PLTGU dan PLTU yang lebih memerlukan waktu lebih lama untuk beroperasi
3. Dalam pengoprasian black start pada PLTG sektor keramasan, fungsi dari baterai sangat berperan penting dalam mensuplai dan melakukan start Diesel Emergency/ EDG, karna apabila tidak terdapat peran baterai yang mampu men-start diesel emergency maka peralatan dan mesin pada PLTG akan mengalami kerusakan di karekan apabila suatu pembangkit yang sedang beroperasi padam (blackout) maka rotor pada pembangkit akan patah atau rusak akibat pembangkit yang padam seketika

5.2 Saran

1. Bisa menambahkan data load shedding atau skenario pengendalian impact gangguan dan data skema islanding atau bagian strategi pengendalian impact gangguan berupa proses pemisahan sistem interkoneksi sesuai skenario area pembangkit dan beban.
2. Untuk pengambilan data mengenai sistem interkoneksi sumbagsel, blackout, black start unit PLTG unit 1 keramasan sangat sulit sekali, karna pada saat pengambilan data berlangsung sedang terjadi wabah covid 19 serta minim nya pertemuan saat kerja praktek berlangsung di PT.PLN (Persero) UPDK Keramasan.

DAFTAR PUSTAKA

- Asdian, L. H. (t.thn.). Studi Kemampuan Pembebanan Maksimum Sistem Interkoneksi Sumbagsel .
- Bersali, R. G. (2008). *Restoration Islands Supplied By Gas Turbine* . Electric Power Systems Research, Vol 78 ISSN 0378-7796.
- Cirebon, P. S. (1976). *Petunjuk Operasi Unit Alsthom PLTG Sunyaragi*. Cirebon: Perusahaan Umum Listrik Negara Sektor Cirebon.
- Hakim, L. (1 Januari 2013). Studi Keamanan Pengiriman Daya Pada Sistem Interkoneksi Sumsel Lampung Dengan Dua Tahap Optimasi. *ELECTRICIAN - Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, Hal : 18.
- Hudah, M. A. (2014). *strategi Pemulihan Gangguan Blackout Sistem Sulserbarteng Dengan Restorasi Pembangkit Hidro*. Makassar: Tesis Teknik Elektro Universitas Hasanuddin Makassar.
- Ir. rudyanto Thayib, M. (Palembang, 26-27 Oktober 2011). Perhitungan Indeks Keandalan Sistem Tenaga Listrik Interkoneksi Sumatera Bagian Selatan. *Prosiding Seminar Nasional AAVoER ke-3* , 467-468.
- Jeremies Leda, S. (2010). *Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) Ujung Pandang*.Makassar: 24-26.
- Keramasan, P. P. (September 2020). *SOP Pengoprasian Wescan #2Palembang:1-7*
- Marsudi, D. (2011). *Pembangkit Energi Listrik Edisi Kedua* . Jakarta: Erlangga .
- Marsudi, D. (2015). *Operasi Sistem Tenaga Listrik Edisi 3*. Jakarta: Graha Ilmu.
- Nugraheni, A. (2011). *Simulasi Pelepasan Beban Dengan Menggunakan Rele Frekuensi Pada Sistem Tenaga Listrik CNOOC SES Ltd*. Depok: Skripsi Teknik Elektro Universitas Indonesia.
- Purwanto, E. (2012). *Analisa Perbandingan Efisiensi Turbin Sebelum dan Sesudah Combustion Inspection di PLTG Muara karang Blok 1.2 Dengan Menggunakan Bahan Bakar HSD*. Jakarta: Tugas Akhir Teknik Elektro Universitas Negeri Jakarta.
- Puslitbang, P. P. (2015). *Analisa Vibrasi Turbine PLTG Duri Uit 2*. Jakarta: PT PLN (Persero).
- Rendy Abdullah. (Oktober 2017). *Studi PLTG Unit 2 Pusat Listrik Balai Pungut Sebagai Black start Saat Kehilangan Tegangan Pada Sistem 150 KV*. Universitas Lancar Kuning Pekanbaru .
- Sofiah, A. N. (September 2017). Studi Skema Pelepasan Beban Secara Otomatis Pada Saat Sistem 70 KV Kehilangan Suplai Dari Sistem 150 KV Di Keramasan Menggunakan Relay (UFR). *Jurnal Surya Energy Vol. 2 No. 1*, 130-132.
- Sun, W. C. (2011). *Black Start Capability Assessment in Power System Restoration, IEEE Power and Energy Society General Meeting*. Detroit, ISSN 1932- 5517.

