

# **TUGAS AKHIR**

## **ANALISIS SISTEM PEMBEBANAN PADA GENERATOR DI PT. PLN (PERSERO) PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA DIESEL TITI KUNING**

*Diajukan Untuk Melengkapi Tugas–Tugas dan Sebagai Persyaratan  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik (S.T) Pada Program Studi Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Oleh :

**NURCHOLIS NAJIB SANUBARI MATONDANG**

**NPM : 1407220041**



# **UMSU**

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA**

**MEDAN**

**2018**

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

ANALISIS SISTEM PEMBEBANAN PADA GENERATOR DI PT. PLN  
(PERSERO) PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA DIESEL TITI KUNING

*Diajukan Guna Melengkapi Tugas – Tugas dan Sebagai Persyaratan Untuk  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik (S.T) Program Studi Teknik Elektro  
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

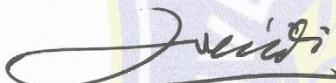
Telah Diuji dan Disidangkan Pada Tanggal :  
(Sabtu, 22 September 2018)

Oleh :

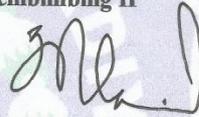
Nurcholis Najib Sanubari Matondang

1407220041

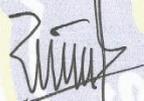
Pembimbing I

  
( Ir. Yusniati, M.T )

Pembimbing II

  
( Ir. Zul Arsil Siregar )

Penguji I

  
( Rohana, S.T, M.T )

Penguji II

  
( Muhammad Safril, S.T, M.T )

Diketahui dan Disahkan  
Ketua Jurusan Teknik Elektro

  
(Faisal Irsan P, S.T, M.T)

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA  
MEDAN  
2018

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama Lengkap : Nurcholis Najib Sanubari Matondang

NPM : 1407220041

Tempat / Tgl Lahir : Hutagodang / 06 Mei 1994

Fakultas : Teknik

Program Studi : Teknik Elektro



Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan tugas akhir (skripsi) saya ini yang berjudul :

### **“ANALISIS SISTEM PEMBEBANAN PADA GENERATOR DI PT. PLN (PERSERO) PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA DIESEL TITI KUNING”**

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena berhubungan material maupun non material, ataupun segala kemungkinan lain yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis tugas akhir saya secara orisinal dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia di proses oleh tim fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas Akademik di Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, September 2018

Saya yang menyatakan



**Nurcholis Najib Sanubari Matondang**

**NPM : 1407220041**

## ABSTRAK

*Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Titi Kuning adalah salah satu unit pembangkit listrik PT.PLN (Persero) di sektor Medan yang digunakan sebagai pembangkit cadangan apabila terjadi peningkatan pada beban atau pada saat beban puncak pada PT.PLN (Persero). Jika terjadi peningkatan beban dan pembangkit –pembangkit lain tidak sanggup untuk memikulnya, maka PLTD Titi Kuning dioperasikan, untuk membuat PLTD bekerja sama dengan sistem maka dilakukan pemparalelan setiap generator ke sistem untuk menambah kapasitas daya sistem dan untuk menjaga keandalan sistem tersebut. Pemparalelan dilakukan secara manual dengan mengatur parameter- parameter keluaran generator berupa penyesuaian tegangan running pada 6500 Volt dengan memutar Procentage Voltage Regulator pada posisi 30 % dan penyesuaian frekuensi dengan sistem dengan mengatur speed control mesin diesel untuk penyesuaian masukan bahan bakar oleh governor, dan memasukkan Circuit Breaker secara manual jika posisi jarum sinkronoskop pada posisi counter dan lampu indikatornya gelap (mati). Setelah dilakukan analisa pembagian beban pada tiap generator terdapat selisih nilai perhitungan dengan nilai yang terbaca oleh alat ukur sebesar 3.2 %, nilai yang terbaca pada alat ukur sebesar 3.2 MW sedangkan hasil nilai perhitungan manual adalah 3.1 MW. Maka, untuk mendapatkan nilai akurasi alat ukur yang lebih tinggi harusnya digunakan alat ukur berupa digital.*

**Kata kunci :** pemparalelan, generator, pembebanan

## KATA PENGANTAR



*Assalamu'alaikum wr.wb*

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan Rahmat, Hidayat, dan Karunia-Nya. Shalawat berangkaikan salam kita panjatkan kepada junjungan kita Nabi besar Muhammad SAW yang mana beliau adalah suri tauladan bagi kita semua dan telah membawa kita dari zaman kebodohan menuju zaman yang penuh dengan ilmu pengetahuan.

Sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini dengan sebatas ilmu dan kemampuan yang penulis miliki sebagai tahap akhir dalam menyelesaikan studi pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU). Dengan perjuangan yang berat dan memerlukan waktu yang tidak sedikit, akhirnya penulis dapat menyelesaikan penelitian ini dengan judul “**ANALISIS SISTEM PEMBEBANAN PADA GENERATOR DI PT PLN (PERSERO) PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA DIESEL TITI KUNING**”.

Dalam penulisan dan penyusunan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bantuan, bimbingan, petunjuk serta saran dari berbagai pihak. Maka dalam kesempatan ini penulis dengan setulus hati mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Untuk yang teristimewa, buat Ayahanda **Iswar Matondang** dan Ibunda **Nurlaila Lubis** yang mana telah memberikan do'a maupun dukungan yang sebesar-besarnya baik moril maupu materil sehingga saya mampu untuk tetap tegar dan kuat dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak **Munawar Alfansury SGR. S.T, M.T** selaku dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Bapak **Faisal Irsan Pasaribu, S.T, M.T** selaku ketua Program Studi Teknik Elektro.

4. Bapak **Partaonan Harahap, S.T** selaku sekretaris Program Studi Teknik Elektro.
5. Ibu **Ir.Yusniati, M.T** selaku dosen pembimbing I yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikirannya di dalam mengarahkan penulisan dalam penyusunan skripsi ini.
6. Bapak **Ir.Zul Arsil Siregar** selaku dosen pembimbing II yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikirannya di dalam mengarahkan penulisan dalam penyusunan skripsi ini.
7. Seluruh **Staf Administrasi** dan **Dosen – Dosen Prodi Teknik Elektro Fakultas Teknik UMSU**, yang telah membantu dalam memberikan informasi sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Teman-teman Seperjuangan Fakultas Teknik, Khususnya **TEKNIK ELEKTRO A1–Pagi 2014** yang selalu memberi dukungan dan motivasi kepada penulis.

Akhirnya penulis mengharapkan semoga tugas akhir ini akan dapat bermanfaat bagi penulis sendiri dan juga orang lain yang membacanya serta dapat menjadi referensi dan memberikan kontribusi yang positif dalam penambahan ilmu pengetahuan yang lebih baik lagi.

Medan, Oktober 2018

Penulis,

**Nurcholis Najib Sanubari Matondang**

NPM : 1407220041

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK .....</b>	<b>i</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>ii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>ix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Metode Penulisan .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
2.1 Tinjauan Pustaka Relevan.....	5
2.2 Mesin Diesel .....	9
2.2.1 Cara Kerja Mesin Diesel .....	11
2.3 Governor .....	13
2.4 Generator Sinkron.....	15
2.4.1 Prinsip Kerja Generator Sinkron.....	16
2.4.2 Kontruksi Generator Sinkron .....	20
2.4.3 Jangkar Kumpan Generator Sinkron.....	25
2.4.3.1 Reaksi Jangkar .....	28
2.5 Pemilihan Putaran .....	29
2.6 Eksitasi Generator Sinkron .....	29
2.6.1 Penguatan Sendiri ( <i>Self-Excited</i> ) .....	30
2.6.2 Penguatan Terpisah .....	31
2.6.2.1 Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan Sikat ( <i>Brush Excitation</i> ).....	33
2.6.2.2 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat ( <i>Brushless Excitation</i> ) .....	35
2.7 <i>Automatic Voltage Regulator</i> (AVR) .....	38

2.8 Pengaturan Tegangan Generator ( <i>voltage regulator</i> ).....	39
2.9 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron.....	40
2.10 Menentukan Parameter Generator Sinkron.....	41
2.11 Genarator Tanpa Beban .....	43
2.12 Generator Berbeban .....	44
2.13 Kerja Paralel Generator.....	45
2.13.1 Prinsip Kerja Pemparalelan Generator .....	52
2.13.2 Metode Pemparalelan Generator.....	54
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>56</b>
3.1 Waktu Dan Tempat Penelitian .....	56
3.2 Peralatan Penelitian.....	56
3.3 Data Penelitian .....	57
3.3.1 Data Generator.....	57
3.3.2 Data Eksiter .....	58
3.3.3 Data <i>Battery Charger</i> .....	59
3.3.4 Data <i>Circuit Breaker</i> .....	59
3.3.5 Instalasi Teknis Untuk Memparalelkan Generator .....	60
3.4 Jalannya Penelitian.....	62
<b>BAB IV HASIL PEMBAHASAN .....</b>	<b>64</b>
4.1 Operasi Paralel Enam Generator.....	64
4.2 Operasi Paralel Generator Dengan Sistem.....	66
4.3 Perhitungan Pembagian Beban Pada Generator Setelah Paralel Dengan Sistem .....	71
4.4 Perhitungan Daya Keluaran Generator Setelah Paralel Ke Sistem .....	74
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>105</b>
5.1 Kesimpulan .....	105
5.2 Saran .....	106
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>107</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>109</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Cara Kerja Mesin Diesel .....	12
Gambar 2. 2 Flywheel Pada Governor.....	15
Gambar 2. 3 Gambaran Sederhana (a) Perbedaan Gelombang Sinus Yang Berbeda 120 Derajat Listrik, dan (b) Perbedaan Fasa Tiap Fasa.....	18
Gambar 2. 4 Kontruksi Generator Sinkron Kutub Menonjol ( <i>Salient Pole</i> ).....	22
Gambar 2. 5 Rotor <i>Salient</i> (Kutub Sepatu) Pada Generator Sinkron.....	23
Gambar 2. 6 Gambaran Bentuk (a) Rotor <i>Non-Salient</i> (Rotor Silinder) (b)Penampang Rotor Pada Generator Sinkron.....	25
Gambar 2. 7 Bentuk Alur Stator .....	26
Gambar 2. 8 Belitan Satu Lapis Generator Sinkron Tiga Fasa Hubungan bintang .....	26
Gambar 2. 9 Belitan Lapis Ganda Generator Sinkron Hubungan Delta .....	27
Gambar 2. 10 Reaksi Jangkar Generator Sinkron.....	28
Gambar 2. 11 Kurva Pengaturan Generator Penguatan Sendiri.....	31
Gambar 2. 12 Diagram Generator Sistem Penguatan Terpisah .....	32
Gambar 2. 13 Kurva Penguatan Terpisah Dengan karakteristik luar.....	33
Gambar 2. 14 Diagram Sistem Eksitasi Dengan Sikat ( <i>Brush Excitation</i> ) .....	34
Gambar 2. 15 Generator Sinkron Eksitasi Tanpa Sikat ( <i>Brushless Excitation</i> ).....	37
Gambar 2. 16 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron .....	41
Gambar 2. 17 Rangkaian Ekivalen Generator Tanpa Beban .....	43
Gambar 2. 18 Rangkaian Ekivalen Generator Berbeban .....	44
Gambar 2. 19 Karateristik Pembebanan Generator.....	45
Gambar 2. 20 Rangkaian Paralel Generator.....	52
Gambar 2. 21 Synchronoscope .....	53

Gambar 2. 22 Skema Sinkronoskop Lampu Gelap.....	54
Gambar 2. 23 Skema Sinkronoskop Lampu Terang.....	55
Gambar 2. 24 Skema Sinkronoskop Lampu Gelap–Terang.....	55
Gambar 3. 1 Rangkaian Pengontrolan Generator .....	61
Gambar 3. 2 Skema Kerja Sebuah Sinkronoskop Lampu Gelap .....	61
Gambar 3. 3 Diagram Alir Penelitian .....	63
Gambar 4. 1 Proses Paralel Generator Titi Kuning.....	64
Gambar 4. 2 Flowchart Pengontrolan Untuk Memparalelkan Generator Ke Sistem.....	68
Gambar 4. 3 Flowchart Pengoperasian Untuk Memparalelkan Generator .....	69
Gambar 4. 4 Kurva Daya Harian PLTD Titi Kuning.....	103
Gambar 4. 5 Kurva Daya Mingguan PLTD Titi Kuning .....	103
Gambar 4. 6 Kurva Daya Bulanan PLTD Titi Kuning .....	104

## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Data Generator 1, 2 dan 3 pada PLTD Titi Kuning .....	57
Tabel 3. 2 Data Generator 4, 5, dan 6 pada PLTD Titi Kuning .....	57
Tabel 3. 3 Data Exiter 1, 2, Dan 3 Pada PLTD Titi Kuning .....	58
Tabel 3. 4 Data Exiter 4, 5, Dan 6 Pada PLTD Titi Kuning .....	58
Tabel 3. 5 Data Charger .....	59
Tabel 3. 6 Data <i>Circuit Breaker</i> .....	60
Tabel 4. 1 Data Yang Digunakan Adalah Data Dari Transformator Pada Tanggal 25 Juni 2018 Dari Pukul 19:00 s/d 21:00 WIB.....	71
Tabel 4. 2 Data Hasil Perhitungan Pembagian Beban Generator Setelah Paralel Dari Jam 19.00 S/D 21.00 WIB.....	74
Tabel 4. 3 Data Perhitungan Daya Harian Generator Jam 12.00 s/d 24.00 WIB.....	102
Tabel 4. 4 Data Perhitungan Daya Generator Tanggal 11 Juni s/d 06 Juli 2018. ....	102

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran 1</b> Diagram Satu Garis Pembangkit Litrik Titi Kuning.....	109
<b>Lampiran 2</b> Diagram pengawatan untuk kerja paralel generator .....	110
<b>Lampiran 3</b> Dokumentasi PLTD Titi Kuning .....	111
<b>Lampiran 4</b> Surat Permohonan Izin Riset .....	114
<b>Lampiran 5</b> Surat Izin Riset Di PT. PLN (Persero) PLTD Titi Kuning.....	115

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Perkembangan teknologi saat ini memungkinkan semua bidang kehidupan manusia dapat semakin ringan dikerjakan dengan bantuan suatu peralatan. Demikian halnya dalam bidang kelistrikan. Dengan menggunakan suatu alat khusus, sistem kerja sebuah pembangkit dapat dengan mudah dikontrol oleh seorang operator. Sistem kerja yang dimaksud mencakup sistem pengaturan, sistem proteksi dan pembagian beban. Dalam sistem kerja suatu pembangkit umumnya, sistem pengaturan, sistem proteksi dan pembagian beban bekerja secara terpisah. Sehingga dibutuhkan banyak tenaga manusia dalam pengoperasiannya.

Kebutuhan akan energi listrik pada saat ini sangat besar, bahkan sudah menjadi kebutuhan pokok bagi industri, masyarakat, maupun perkantoran. Salah satu kebutuhan energi yang besar saat ini adalah berbeda di wilayah sumatera, tepatnya di sumatera bagian utara.

Perkembangan teknologi saat ini yang membuat kebutuhan energi listrik melonjak sehingga harus dilakukan pemikiran untuk mencukupi kebutuhan yang makin lama kian bertambah, sehingga harus dilakukan interkoneksi antara pembangkit–pembangkit di wilayah sumatera supaya mencukupi kebutuhan beban yang akan dilayani. Pada jaringan tenaga listrik, pusat pembangkit tenaga listrik membangkitkan daya listrik, kemudian daya listrik tersebut dikirim melalui

jaringan transmisi dan didistribusikan ke berbagai macam beban listrik. Beban-beban listrik tersebut mengkonsumsi daya listrik selama daya listrik dibangkitkan oleh pembangkit.

Untuk mencukupi permintaan konsumen terhadap energi listrik yang dilayani tentu perlu penambahan daya pada jaringan dalam menjalankan tugasnya untuk menyediakan listrik bagi masyarakat, PLN mempunyai divisi Pusat Pengaturan dan Pengendalian Beban (P3B). Tugas utama dari P3B ini adalah menyesuaikan permintaan listrik dari luar dengan kapasitas pembangkit yang baru harus dioperasikan. Jika terjadi peningkatan kebutuhan listrik, maka P3B akan menghubungi perusahaan pembangkit listrik untuk menaikkan daya unit pembangkit yang sudah *on line* atau bahkan meminta unit pembangkit yang *stand by* untuk dioperasikan.

Pembangkit listrik yang terdiri dari beberapa generator tentunya membutuhkan pengaturan untuk membuat antara generator yang satu dengan generator yang lainnya agar bisa sinkron. Pengaturan juga dibutuhkan untuk mengganti jadwal pengoperasian kerja antara generator yang satu ke generator yang lain, guna untuk menjaga keandalan generator, juga supaya generator lebih tahan lama.

Dalam operasi sistem tenaga listrik, selain upaya untuk meminimalisir kegagalan sistem, faktor penting lainnya adalah menjaga suplai daya tetap terlayani. Sistem tenaga listrik mempunyai variasi beban yang sangat dinamis dimana setiap detik akan berubah-ubah, dengan adanya perubahan ini pasokan daya listrik tetap dan harus disuplai dengan besaran daya yang sesuai. Bila pada saat tertentu terjadi lonjakan atau penurunan beban yang tidak terduga, maka

perubahan ini sudah dapat dikategorikan ke dalam gangguan pada sistem tenaga listrik yakni kondisi tidak seimbang antara pasokan listrik dan permintaan energi listrik akibat adanya gangguan baik pada pembangkit ataupun pada sistem transmisi sehingga mengakibatkan kerja dari pembangkit yang lain menjadi lebih berat.

Tujuan tugas akhir ini adalah memberikan solusi sebagai salah satu alternatif untuk menganalisis sistem pembebanan dan pembagian beban generator di PLTD Titi Kuning.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang diatas, rumusan masalah yang dapat dikemukakan dalam penulisan Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana proses sinkronisasi generator ke sistem (jaringan) ?
2. Bagaimana pembagian beban generator setelah bekerja dengan sistem (jaringan) ?
3. Bagaimana sistem pembebanan setiap generator selama beroperasi menyuplai beban ?

## **1.3 Batasan Masalah**

Adapun batasan-batasan masalah yang dibahas dalam penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Tidak membahas mengenai proteksi yang digunakan pada generator di PLTD Titi Kuning.
2. Tidak membahas gangguan pada pembangkit ataupun pada sistem.

3. Berfokus pada sistem pembebanan generator dan daya yang dihasilkan generator setelah paralel ke sistem.

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini adalah :

1. Menganalisa proses sinkronisasi generator ke sistem (jaringan).
2. Menganalisa pembagian beban pada generator setelah masuk ke sistem (jaringan).
3. Menganalisa daya keluaran generator selama beroperasi menyuplai beban.

#### **1.5 Metode Penulisan**

Metodologi yang digunakan pada penelitian tugas ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan dasar teori yang menunjang dalam penulisan Tugas Akhir. Dasar teori ini diambil dari buku-buku dan jurnal.

2. Studi Bimbingan

Diskusi – diskusi dan tanya jawab dengan pembimbing yang telah ditunjuk oleh pihak program studi Teknik Elektro UMSU mengenai kendala-kendala yang timbul selama penyusunan Tugas Akhir ini.

3. Studi Lapangan

Yaitu mengambil data spesifikasi peralatan yang digunakan dan mengambil data beban dan data laporan harian di PT. PLN (Persero) Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Titi Kunig.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Tinjauan Pustaka Relevan

Berikut ini beberapa penelitian yang dilakukan oleh peneliti-peneliti terdahulu untuk mendukung penelitian penulis dalam melakukan analisa pada sistem kerja pengasut manual terhadap perubahan beban dan faktor daya untuk pembagian beban antara lain :

Generator induksi adalah generarator yang memiliki prinsip dan konstruksinya sama dengan motor induksi yang sudah umum digunakan, hanya saja dibutuhkan penggerak mula sehingga putaran rotor lebih besar dari pada putaran stator ( $n_r > n_s$ ) untuk membangkitkan tegangannya. Generator induksi lebih banyak digunakan pada daerah terpencil yang belum terjangkau listrik. Umumnya generator induksi digunakan untuk membangkitkan energi listrik berdaya kecil seperti pada pembangkit listrik tenaga angin dan mikrohidro. Dalam pengoperasian generator induksi memiliki masalah pada tegangan keluaran generator yang tidak konstan. Oleh sebab itu diperlukan adanya sebuah sistem kontrol untuk mengatur tegangan keluaran generator induksi. Dengan menggunakan pengontrolan, tegangan yang dihasilkan oleh generator induksi berpenguatan sendiri menjadi lebih halus tanpa adanya *ripple* dan lebih stabil (Suhendri : 2016). Menurut Syamsul Amien : Generator sinkron (alternator) merupakan mesin listrik yang merubah energi mekanis menjadi energi listrik melalui proses induksi elektomagnetik. Jika generator sinkron dibebani maka akan memberikan sifat yang berbeda sesuai dengan jenis beban yang

dipikulnya. Sehingga dalam pembebanan ini akan menentukan nilai faktor daya pada generator tersebut. Faktor daya mempunyai pengertian sebagai besaran yang menunjukkan seberapa efisien mesin yang dimiliki dalam menyalurkan daya yang bisa dimanfaatkan. Oleh sebab itu, dengan diaturnya arus penguat pada generator yang bekerja paralel maka akan mengatur daya reaktif yang dihasilkan pada generator tersebut sehingga dapat mengetahui perubahan faktor daya pada masing-masing generator. Dalam penelitian ini dilakukan pengaturan arus eksitasi pada masing-masing generator ‘spesifik terbatas’ (Amien ; 2014).

Menurut Laksono (2013) : Pengaturan eksitasi generator itu sangat penting karena dalam sistem tenaga listrik, pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi merupakan hal yang sangat penting untuk diperhatikan karena dapat mempengaruhi kestabilan tegangan sistem tenaga listrik. Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator yang kurang memuaskan pada titik operasinya. Berdasarkan kondisi tersebut, dilakukan suatu studi dinamik mengenai pola tingkah laku tegangan pada sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan. Dengan bantuan perangkat lunak diperoleh informasi, bahwa pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator menunjukkan performansi yang lebih baik dibandingkan performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi tanpa metoda penempatan kutub.

Dan pengaturan pada sistem pembangkit listrik itu sangat penting karena pada sistem pembangkit listrik perubahan beban dapat terjadi sewaktu-waktu seiring meningkatnya kebutuhan energi yang akibatnya beban yang dilayani oleh generator sinkron berubah-ubah yang dapat mempengaruhi tegangan dan daya keluaran dari generator sinkron tersebut. Sehingga menyebabkan perubahan

tegangan terminal yang akan berpengaruh pada efisiensi serta keandalan suatu sistem. Adapun tulisan ini membahas tentang analisa penentuan tegangan terminal generator sinkron 3 fasa rotor *salient pole*, sebelumnya dilakukan perbaikan faktor daya untuk pembebanan induktif dan kapasitif kemudian dilakukan perhitungan regulasi tegangan dan efisiensi. Untuk merubah tegangan terminal agar tetap konstan dapat dilakukan dengan pengaturan tegangan induksi ( $E_a$ ) yang diakibatkan karena adanya perubahan arus beban ( $I_a$ ) yang mengalir pada tahanan jangkar ( $R_a$ ) dan reaktansi sinkron ( $X_s$ ) yang menyebabkan terjadi perubahan tegangan terminal. Untuk nilai pembebanan yang sama, semakin baik faktor daya dari beban yang dilayani oleh generator sinkron semakin baik regulasi yang dihasilkan. Hal ini disebabkan semakin baik faktor dayanya maka semakin kecil tegangan beban nol ( $E_f$ ), semakin besar tegangan yang diterima oleh beban ( $V_t$ ). Semakin baik faktor daya semakin baik pula efisiensi sedangkan rugi-rugi daya ( $P_{cl}$ ) dan arus beban ( $I_a$ ) akan semakin kecil (Selamat Aryadi : 2015).

Selanjutnya penelitian dilakukan oleh Khatimah (2014) tentang : Analisis pengaturan tegangan pada generator sinkron fasa-fasa akibat pembebanan yang tidak seimbang. Pada penelitian yang dilakukan khatimah, dengan asumsi bahwa beda sudut fasa dari fasor-fasor arus fasa ( $I_{ph}$ ) adalah seimbang sementara besar atau magnitudenya tidak seimbang maka diperoleh bahwa perubahan pengaturan tegangan ( $\Delta V_R$ ) akan mengikuti pola perubahan arus fasa ( $\Delta I_{ph}$ ) pada beban seimbang. Hasil penelitian menunjukkan pula bahwa pada beban tidak seimbang, maka perubahan faktor ketidak-seimbangan ( $\Delta U_F$ ) mengikuti pola perubahan arus dalam salah satu fasa, sementara perubahan pengaturan tegangan mengikuti pola perubahan arus fasa yang bersangkutan. Menurut Terimananda, Hariyanto, dan

Syahrial menyatakan bahwa Perubahan suatu beban akan mempengaruhi tegangan keluaran generator. Apabila beban naik maka tegangan keluaran generator turun dan apabila beban turun maka tegangan keluaran generator naik. Supaya tegangan keluaran generator tetap diperlukan suatu pengaturan tegangan keluaran generator. Pengaturan tegangan keluaran generator dilakukan dengan mengatur arus eksitasi generator. Sistem pengaturan arus eksitasi generator memakai *Automatic Voltage Regulator* (AVR). Tegangan keluaran disearahkan oleh semikonverter, kemudian dimasukkan ke kumparan medan *AC-Exciter* dan tegangan keluaran dari *AC-Exciter* disearahkan oleh diode penyearah dan diberikan ke kumparan medan generator utama (Terimananda, Hariyanto, dan Syahrial ; 2015).

Kebanyakan pusat pembangkit di Indonesia menggunakan generator sinkron tiga fasa didalam pengoperasiannya. Terbatasnya kemampuan sebuah generator untuk memenuhi kebutuhan beban, perlu adanya beberapa generator bekerja bersama dalam suatu sistem jaringan listrik baik dalam sistem interkoneksi atau sistem bus. Perbedaan kemampuan tiap generator menyebabkan kita harus melakukan proses sinkronisasi (penyamaan sistem) mulai dari frekuensi, tegangan, sudut fasa, hingga urutan fasa antara generator dengan sistem. Sinkronisasi adalah suatu cara untuk menghubungkan dua atau lebih generator dalam sistem yang sama untuk mencatu beban yang sama dengan arus bolak-balik (AC). Sumber AC tersebut adalah generator, yang akan digabungkan atau diparalel dengan tujuan untuk meningkatkan energi atau kapasitas daya sistem tenaga listrik. Sinkronisasi sendiri dibagi menjadi tiga, yaitu : sinkronisasi gelap, sinkronisasi terang, dan sinkronisasi gelap-terang. Masing-masing memiliki karakteristik yang berbeda hanya pada jenis induktornya (M.Khambali : 2013).

Eksitasi adalah bagian dari sistem dari generator yang berfungsi membentuk/menghasilkan fluksi yang berubah terhadap waktu, sehingga dihasilkan gaya gerak listrik (GGL) induksi. Pengaruh perubahan eksitasi terhadap daya reaktif generator pada unit pembangkitan berkaitan dengan operasi pemparalelan generator sinkron dengan sistem daya, perubahan beban, dan perubahan tegangan. Tegangan cenderung konstan agar sinkronisasi terjaga dengan sistem (Imron : 2013).

## 2.2 Mesin Diesel

Mesin diesel termasuk mesin dengan pembakaran dalam atau disebut dengan motor bakar ditinjau dari cara memperoleh energi termalnya. Untuk membangkitkan listrik sebuah generator menggunakan generator dengan sistem penggerak tenaga diesel.

Pada dasarnya pembangkitan tenaga listrik AC biasanya menggunakan mesin sinkron yang bekerja sebagai generator. Beberapa kelebihan penggunaan pemakaian diesel sebagai *Prime Over* :

1. Investasi modal relatif kecil
2. Mempunyai waktu pembebanan yang relatif singkat
3. Desain dan instalasi relatif sederhana
4. Auxiliary equipment relatif sederhana.

Selain kelebihan tersebut di atas, juga terdapat beberapa kelemahan dan kekurangan dari suatu pembangkit tenaga diesel, antara lain:

1. Mesin diesel sebagai penggerak mula mempunyai daya yang terbatas. Hal ini disebabkan terbatasnya ukuran mesin diesel karena kemampuan dari sarana pengangkutannya terbatas. Jika membutuhkan daya yang besar diperlukan beberapa unit generator dengan penggerak mula diesel.
2. Bahan bakar pembangkit listrik tenaga diesel yaitu solar yang lebih mahal dibandingkan bahan bakar lainnya misalnya batu bara.
3. Mesin sangat berat sehingga harus dapat menahan getaran serta kompresi yang tinggi.
4. Starting awal berat, karena kompresinya tinggi yaitu sekitar 200 bar.

Pada mesin diesel, kecepatan putarannya dapat dikelompokkan dalam tiga kategori yaitu:

1. Putaran rendah untuk  $\text{rpm} < 500$
2. Putaran sedang untuk  $500 < \text{rpm} < 1000$
3. Putaran tinggi untuk  $\text{rpm} > 1000$ .

Kegunaan dari suatu Pembangkit Listrik Tenaga Diesel adalah :

1. Sebagai unit cadangan (*Standby Plant*) yang dijalankan pada saat unit pembangkit utama yang ada tidak dapat mencukupi kebutuhan daya listrik.
2. Sebagai unit pembangkit yang menyuplai listrik selama 24 jam atau pemikul beban tetap. Sifat pengoperasian harus pada beban dasar yang berkapasitas tertinggi dan tidak dipengaruhi oleh frekuensi beban tetap. Hal ini memungkinkan juga bila pasokan dapat mengalami gangguan.

3. Sebagai unit beban puncak atau *Peak Load*. Bila PLTD dioperasikan pada beban puncak, biasanya dalam waktu yang tidak lama, karena dapat berfungsi untuk menaikkan tegangan yang turun pada saat beban puncak.
4. Sebagai unit cadangan (*emergency*) yang dijalankan saat keadaan darurat saat terjadi pemadaman pada unit pembangkit utama.

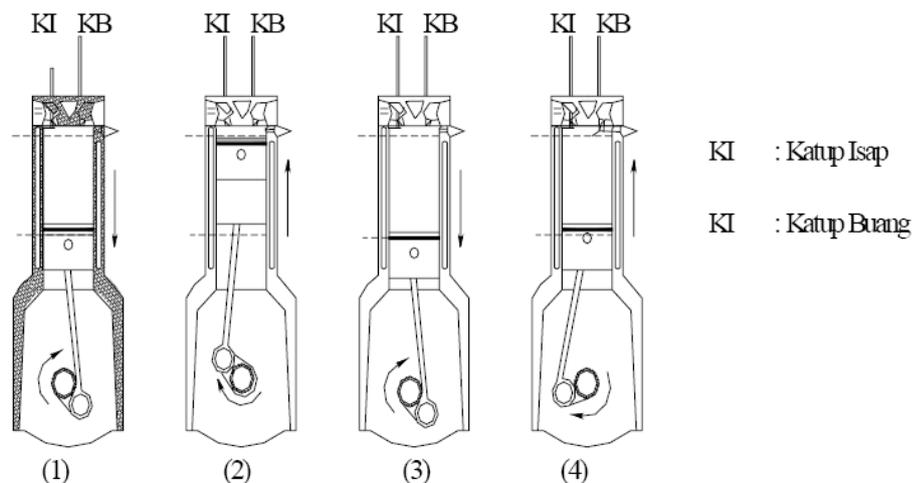
### **2.2.1 Cara Kerja Mesin Diesel**

Primover merupakan peralatan yang mempunyai fungsi menghasilkan energi mekanis yang diperlukan untuk memutar rotor generator. Pada mesin diesel terjadi penyalaan sendiri, karena proses kerjanya berdasarkan udara murni yang dimampatkan di dalam silinder pada tekanan yang tinggi ( $\pm 30$  atm), sehingga temperature di dalam silinder naik. Dan pada saat itu bahan bakar disemprotkan dalam silinder yang bertemperatur dan bertekanan tinggi melebihi titik nyala bahan bakar sehingga menyala secara otomatis.

Pada mesin diesel penambahan panas atau energi senantiasa dilakukan pada tekanan konstan. Pada mesin diesel, piston melakukan 4 langkah pendek menuju kepala silinder pada setiap langkah daya.

1. Langkah keatas yang pertama merupakan langkah pemasukan dan pengisapan, disini udara dan bahan bakar masuk sedangkan engkol berputar ke bawah.
2. Langkah kedua merupakan kompresi, poros engkol terus berputar menyebabkan torak naik dan menekan bahan bakar sehinggaterjadi pembakaran. Kedua proses ini (1 dan 2) termasuk proses pembakaran.

3. Langkah ketiga merupakan langkah ekspansi dan kerja, disini kedua katup yaitu katup isap dan buang tertutup sedangkan poros engkol terus berputar dan mendorong torak akibat tekanan yang disebabkan pembakaran.
4. Langkah keempat merupakan langkah pembuangan, disini katup buang terbuka dan menyebabkan gas dari sisa pembakaran terbangun keluar. Gas dapat keluar karena pada proses keempat ini torak kembali bergerak naik keatas dan menyebabkan gas dapat keluar. Kedua proses terakhir ini (3 dan 4) termasuk proses pembuangan.
5. Setelah keempat proses tersebut, maka proses berikutnya akan mengulang kembali proses pertama, dimana udara dan bahan bakar masuk kembali.



**Gambar 2. 1** Cara Kerja Mesin Diesel

Proses yang terjadi dalam mesin diesel ini adalah sebagai berikut :

- 1 – 2 Kompresi isentronik
- 2 – 3 Penambahan panas pada volume konstan
- 3 – 4 Panambahan panas pada tekanan konstan

4 – 5 Ekspansi isentropis

5 – 1 Penambahan panas pada volume konstan.

Mesin ini sering juga dinamakan motor diesel, sesuai dengan nama dari pembuat yaitu seorang Jerman bernama Diesel. Pada mesin ini penambahan panas energi senantiasa dilakukan pada tekanan yang konstan.

Starting Pada mesin diesel yaitu :

Sistem start kompresi, sistem start ini dipakai oleh diesel yang memiliki daya besar yaitu  $> 500$  PK. Sistem ini memakai motor dengan udara bertekanan tinggi untuk start dari mesin diesel. Cara kerjanya yaitu dengan menyimpan udara ke dalam suatu botol udara. Kemudian udara tersebut dikompresi sehingga menjadi udara panas dan bahan bakar solar dimasukkan ke dalam *Fuel Injection Pump* serta disemprotkan lewat *nozzle* dengan tekanan tinggi. Akibatnya akan terjadi pengkabutan dan pembakaran di ruang bakar .pada saat tekanan di dalam tabung turun sampai batas minimum yang ditentukan, maka kompresor akan secara otomatis menaikkan tekanan udara di dalam tabung hingga tekanan dalam tabung mencukupi dan siap dipakai untuk melakukan starting mesin diesel.

### **2.3 Governor**

Governor adalah komponen pada mesin diesel yang dirancang untuk mengontrol volume penyemprotan bahan bakar berdasarkan beban mesin supaya kecepatannya tetap stabil. Oleh karena itu frekuensi yang dibangkitkan sama dengan yang digunakan oleh konsumen, dan frekuensi akan berkurang apabila kebutuhan daya yang digunakan oleh konsumen lebih besar dari daya yang

dibangkitkan. Maka unit pembangkit (governor) berfungsi untuk menjaga agar putaran generator berada dalam frekuensi 50 Hertz terhadap adanya variasi beban.

Governor ini bekerja berdasarkan putaran atau kecepatan dari mesin diesel, untuk melakukan fungsinya, governor mengukur frekuensi dengan cara mengukur kecepatan putar poros generator karena frekuensi yang dihasilkan generator sebanding dengan kecepatan putar poros generator. Jika sudah mencapai putaran yang di *setting* dan telah menghubungkan generator ke sistem, governor ini akan bekerja berdasarkan frekuensi sistem dengan menggerakkan servo motor. Ada 3 bagian governor, yaitu :

1. *Governor control*

Bagian yang mengendalikan secara elektronik yang menggerakkan *actuator*.

2. *Actuator*

Salah satu fungsi dari sistem kontrol adalah melaksanakan perintah dari panel kontrol. Perintah start atau stop mesin misalnya hanya dapat terlaksana jika adanya alat yang dapat bekerja dengan masukan berupa energi listrik (sinyal dari panel kontrol) yang kemudian keluarannya berupa energi lain (misalnya energi mekanik pada sistem pneumatik) sehingga perintah start dan stop dapat terlaksana. Contohnya seperti servo motor pada governor, jika mendapat tegangan yang disuplai dari panel kontrol, servo motor akan menggerakkan *fuel pump* yang mengatur pembukaan katup bahan bakar.

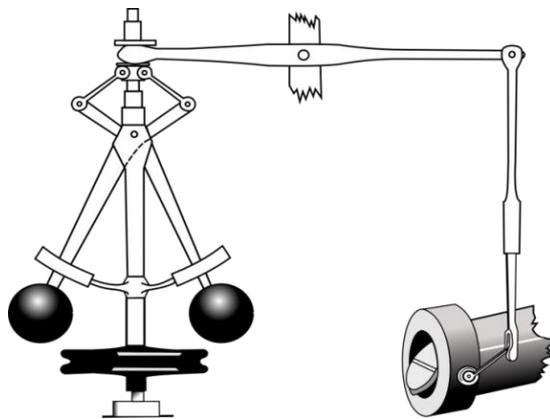
3. *Magnetic Pick Up*

Bagian yang dapat membangkitkan tegangan AC atas dasar perputaran *flywheel*. Yaitu pada saat ujung *Magnetic Pick Up* berdekatan (searah) dengan gigi *flywheel*, magnet tetap akan menarik maju, dan pada saat *Magnetic Pick*

*Up* berjauhan dengan gigi *flywheel* (diantara dua gigi *flywheel*), magnet tetap akan kembali mundur. Gerakan maju mundur magnet tetap pada kumparan akan menghasilkan GGL dengan frekuensi sebesar.

Frekuensi = Putaran roda *flywheel* (dalam 1 detik) x jumlah gigi *flywheel*.

Semakin cepat putaran roda *flywheel*, semakin tinggi frekuensi yang dikeluarkan pada terminal.



**Gambar 2. 2** Flywheel Pada Governor

## 2.4 Generator Sinkron

Generator adalah suatu mesin yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Hampir semua energi listrik dibangkitkan dengan menggunakan mesin sinkron. Generator sinkron (sering disebut alternator) adalah mesin sinkron yang digunakan untuk mengubah daya mekanik menjadi daya listrik. Generator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, yang sering dikenal dengan hukum Faraday yaitu ; “Apabila jumlah garis gaya yang melalui kumparan diubah, maka gaya gerak listrik (GGL) akan diinduksikan dalam kumparan itu. Gaya gerak listrik (GGL) yang diinduksikan berbanding lurus dengan laju perubahan jumlah garis

*gaya (fluks) yang melalui kumparan/konduktor".* Generator sinkron dapat berupa generator sinkron tiga fasa atau generator sinkron AC satu fasa tergantung dari kebutuhan. Untuk memutar rotor, generator digunakan *prime mover* (penggerak mula) yang dapat berupa turbin ataupun mesin diesel.

#### **2.4.1 Prinsip Kerja Generator Sinkron**

Generator serempak (sinkron) akan menghasilkan tenaga listrik berdasarkan hukum Faraday. Hukum Faraday menjelaskan,  $e = d\Phi/dt$ , dimana  $e$  adalah besarnya tegangan yang diinduksikan berbanding dengan besar perubahan fluks terhadap waktu. Jika pada sekeliling penghantar terjadi perubahan medan magnet, maka pada penghantar tersebut akan dibangkitkan suatu gaya gerak listrik (GGL) yang sifatnya melawan perubahan medan utama tersebut. Untuk dapat menghasilkan gaya gerak listrik (GGL) tersebut diperlukan penggerak mula (*prime mover*) dan arus masukan ( $I_f$ ) yang berupa arus searah (DC) yang akan menghasilkan medan magnet yang dapat diatur dengan mudah. Perubahan tenaga elektromagnetik terjadi pada saat terjadinya perubahan fluks yang disebabkan oleh adanya gerakan mekanis. Pada mesin berputar, tegangan dibangkitkan pada lilitan atau sekelompok kumparan dengan memutar lilitan – lilitan tersebut secara magnetis melalui suatu medan magnetik, atau dengan merancang suatu rangkaian magnetik sedemikian sehingga harga reluktans berubah–ubah sesuai putaran rotor. Dengan demikian fluks yang bersangkutan dengan kumparan tertentu akan berubah secara berulang, sehingga timbul tegangan yang berubah terhadap waktu. Sekelompok kumparan yang saling dihubungkan sedemikian sehingga seluruh tegangan yang dibangkitkan adalah sesuai yang

dikehendaki disebut lilitan *armatur*. Medan magnet bisa dihasilkan oleh kumparan yang dialiri arus DC atau oleh magnet tetap. Pada mesin tipe ini medan magnet diletakkan pada stator (disebut generator kutub eksternal/*external pole generator*) yang mana energi listrik dibangkitkan pada kumparan rotor dan disalurkan melalui slip ring dan karbon sikat. Hal ini dapat menyebabkan kerusakan pada slip ring dan karbon sikat, sehingga menimbulkan permasalahan pada pembangkitan daya tinggi. Untuk mengatasi permasalahan ini, digunakan tipe generator dengan kutub internal (*internal pole generator*), yang mana medan magnet dibangkitkan oleh kutub rotor dan tegangan AC dibangkitkan pada rangkaian stator. Apabila rotor generator diputar pada kecepatan nominalnya, dimana putaran tersebut didapat dari putaran penggerak mulanya (*prime mover*), kemudian pada kumparan medan rotor diberikan arus sebesar  $I_f$ , maka garis-garis fluksi yang dihasilkan melalui kutub-kutub inti akan menghasilkan tegangan induksi pada kumparan jangkar stator sebesar :

$$E = C.n.\phi \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

$E$  = Tegangan yang di induksikan (Volt)

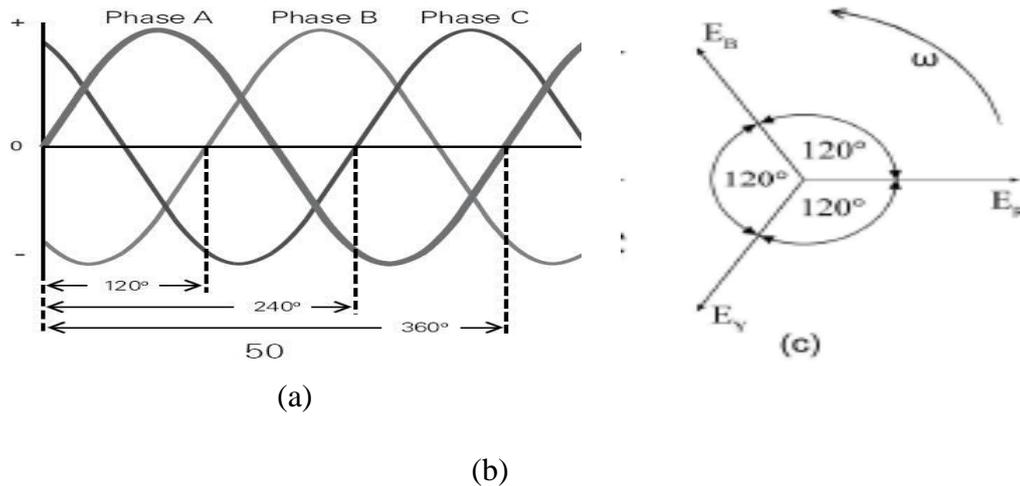
$C$  = Konstata generator

$n$  = Kecepatan putar (rpm)

$\phi$  = Fluks yang dihasilkan arus penguat (Weber)

Untuk generator tiga fase, tegangan yang dihasilkan akan sinusoidal jika rapat fluks magnet pada celah udara terdistribusi sinusoidal dan rotor diputar pada kecepatan konstan. Tegangan AC tiga fasa dibangkitkan pada mesin sinkron kutub internal pada tiga kumparan stator yang dibuat sedemikian rupa sehingga

membentuk beda fasa dengan sudut  $120^\circ$ . Bentuk gambaran sederhana hubungan tegangan 3-fasa dengan fasor yang dibangkitkan diperlihatkan pada gambar di bawah ini.



**Gambar 2. 3** Gambaran Sederhana (a) Perbedaan Gelombang Sinus Yang Berbeda 120 Derajat Listrik, dan (b) Perbedaan Fasor Tiap Fasa.

Rangkaian tiga fase semata-mata hanyalah gabungan dari tiga rangkaian satu fase. Ketiga GGL dibangkitkan dalam tiga pasang kumparan jangkar yang terpisah 120 derajat listrik pada jangkar generator. Ujung-ujung kumparan semuanya dikeluarkan dari generator untuk membentuk tiga rangkaian fase tunggal yang terpisah. Urutan ketiga tegangan dari sistem tiga fase disebut urutanfase atau putaran fase tegangan. Ini ditentukan oleh arah putaran generator, tetapi dapat dibalik diluar generator dengan menukarkan setiap dua dari ketiga kawat saluran. Daya dalam rangkaian tiga fase adalah dari rumus daya dalam rangkaian satu fase, daya dalam setiap fase (P) baik hubungan delta ( $\Delta$ ) maupun bintang (Y) adalah.

$$P = V.L.Cos \varphi \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana  $\varphi$  adalah perbedaan sudut antara fase arus dengan fase tegangan.

Dalam hubungan bintang (Y) adalah :

$$I = I_L \text{ dan } V = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dalam hubungan delta ( $\Delta$ ) adalah :

$$V = V_L \text{ dan } I = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (2.4)$$

Maka daya yang dihasilkan dalam ketiga fase dari hubungan tiga fase seimbang, baik hubungan Y maupun  $\Delta$  adalah sama yaitu :

$$P = V_L.I_L.Cos \varphi. \sqrt{3} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana :

P = Daya (Watt)

$V_L$  = Tegangan line (Volt)

$I_L$  = Arus line (Ampere)

$\text{Cos } \varphi$  = Faktor daya

Faktor daya sistem tiga fasa seimbang hubungan Y maupun  $\Delta$  didefinisikan sebagai cosinus sudut antara fase tegangan dengan fase arus dengan persamaan sebagai berikut :

$$\text{Faktor daya} = \text{Cos } \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}.V_L I_L} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana :

$\varphi$  = Perbedaan sudut fasa tegangan dengan arus

P = Daya (Watt)

$V_L$  = Tegangan Line (Volt)

$I_L$  = Arus Line (Ampere)

### 2.4.2 Kontruksi Generator Sinkron

Konstruksi umum Generator AC di klarifikasikan berdasarkan daya yang dibangkitkan :

1. Untuk generator sinkron dengan daya menengah ke bawah yang berputar adalah belitan jangkarnya
2. Untuk generator sinkron dengan daya menengah ke atas (yang berdaya besar) yang digunakan sebagai rotornya adalah belitan medan atau disebut generator kutub dalam, sehingga tidak memerlukan cincin seret untuk menyalurkan GGL induksi yang dibangkitkan.

Berikut ini adalah konstruksi untuk generator yang berdaya besar :

a. Rangka Stator

Merupakan rumah atau kerangka yang menyangga inti jangkar generator dan terbuat dari besi tuang.

b. Stator

Stator terdiri dari inti besi dan memiliki alur-alur sebagai tempat peletakan lilitan armatur atau jangkar. Lilitan armatur/jangkar berfungsi sebagai sebagai tempat timbulnya GGL induksi.

c. Rotor

Rotor adalah bagian yang berputar, pada bagian ini terdapat kutub-kutub yang memiliki inti dan kumparan medan yang lilitannya dialiri arus searah yang menjadi arus penguatan.

d. Generator Penguat Atau *Exciter*

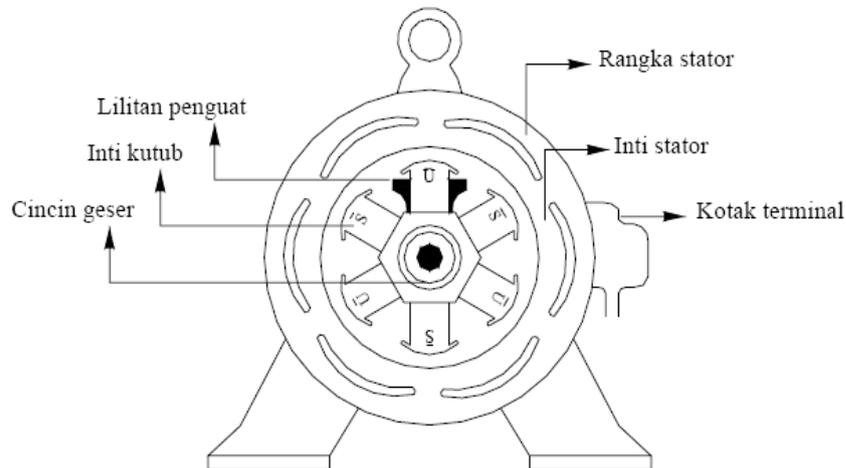
*Exciter* digunakan untuk mengatur fluksi pada kumparan medan, kemudian memperbesar medan magnet pada kutub generator, sehingga tegangan output dapat diperbesar. Arus penguat digunakan arus searah, maka pada generator sinkron dilengkapi dengan belitan penguat. Generator tanpa sikat merupakan mesin dengan *exciter* AC yang jangkarnya dipasang pada poros utama dan output AC disearahkan oleh penyearah dioda yang dihubungkan langsung ke penguat mesin sinkron, sehingga sikat dan perlengkapannya tidak diperlukan.

Pada umumnya generator AC ini dibuat sedemikian rupa, sehingga lilitan tempat terjadinya GGL induksi tidak bergerak, sedangkan kutub-kutub akan menimbulkan medan magnet berputar. Pada generator sinkron, arus DC diterapkan pada lilitan rotor (pada bagian yang berputar) dan lilitan jangkarnya ditempatkan pada bagian yang diam (stator).

Konstruksi medan yang berputar dan jangkar yang diam menyederhanakan masalah osilasi. Karena tegangan yang biasanya dibangkitkan adalah antara 7.000 Volt sampai 24.000 Volt, maka tegangan tinggi ini tidak perlu dikeluarkan melalui cincin slip (*slip-ring*) dan konak geser tetapi dapat dikeluarkan langsung ke alat penghubung dan pembagi (*switchgear*) melalui kawat berisolasi dari kawat jangkar yang diam. Medan yang berputar dicatu dengan arus searah pada tegangan 125 Volt melalui hubungan kabel langsung antara medan dan penyearah yang berputar jika digunakan sistem eksitasi tanpa sikat.

Untuk menghasilkan medan magnet rotor, rotor generator diputar oleh *prime mover* menghasilkan medan magnet berputar pada mesin. Medan magnet putar ini

menginduksi tegangan tiga fasa pada kumparan stator generator. Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar, **Gambar 2.4** dibawah ini adalah gambar konstruksi generator sinkron.



**Gambar 2. 4** Kontruksi Generator Sinkron Kutub Menonjol (*Salient Pole*)

Konstruksi generator sinkron terbagi atas 2 bagian antara lain :

#### 1. Generator Sinkron Kutub Menonjol (*Salient Pole*)

Pada generator sinkron kutub menonjol umumnya digunakan pada generator yang bekerja dengan putaran rendah. Karena gaya gerak listrik (GGL) yang dibangkitkan bergantung pada jumlah kutub medan dan kecepatan putar generator. Pada kumparan tertentu akan dibangkitkan tegangan satu siklus lengkap bila sepasang kutub rotor (utara dan selatan) digerakkan melalui kumparan. Maka jumlah siklus yang dibangkitkan dalam satu putaran sama dengan jumlah pasangan kutub rotor atau  $P/2$ , dimana  $P$  adalah jumlah total kutub. Jika  $n$  adalah kecepatan putaran rotor dalam putaran permenit, maka  $n/60$  adalah putaran per sekon. Frekuensi dalam *Hertz* atau siklus per sekon adalah :

$$f = \frac{P}{2} \times \frac{n}{60} = \frac{Pn}{120} \dots\dots\dots (2.7)$$

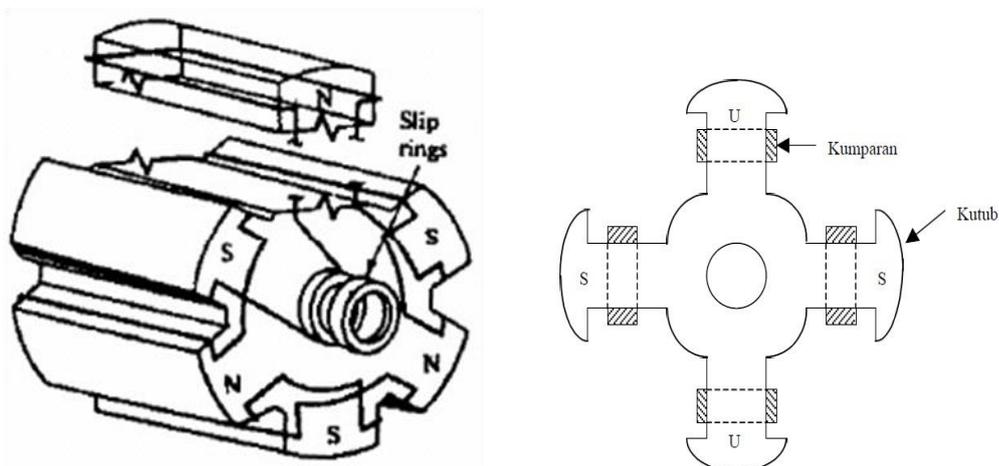
Dimana :

f = Frekuensi (hertz)

P = Jumlah kutub

n = Kecepatan putaran rotor (rpm)

Pada generator sinkron, arus DC diterapkan pada lilitan rotor untuk menghasilkan medan magnet rotor. Rotor generator diputar oleh *prime mover* menghasilkan medan magnet berputar pada mesin. Medan magnet putar ini menginduksi tegangan pada kumparan stator generator. Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa *salient* (kutub sepatu) dan *non-salient* (rotor silinder). Gambar bentuk kutub sepatu generator sinkron diperlihatkan pada gambar di bawah ini :



**Gambar 2. 5** Rotor *Salient* (Kutub Sepatu) Pada Generator Sinkron

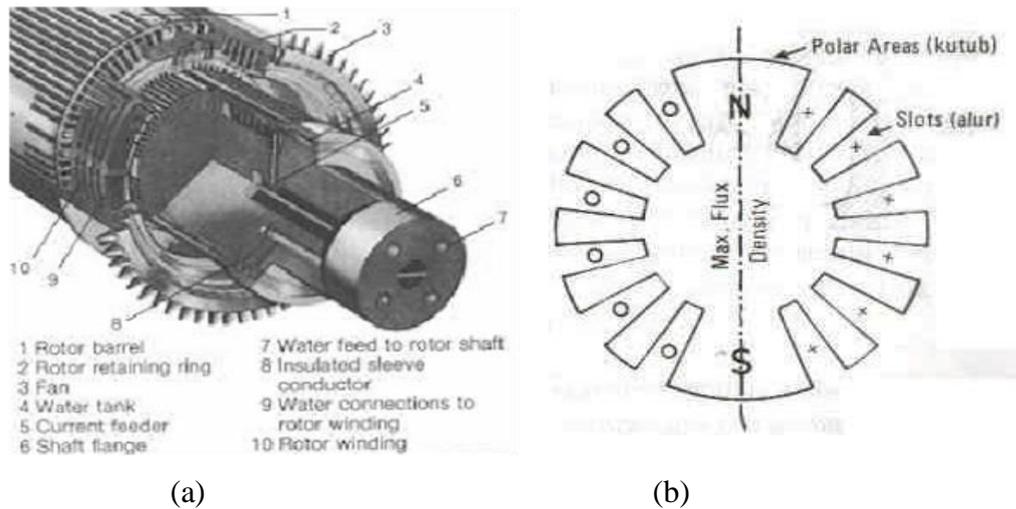
Pada kutub *salient*, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor sedangkan pada kutub *non-salient*, konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Rotor kutub salient dapat mengakibatkan rugi-rugi angin yang terlalu besar apabila putaran sangat tinggi, dan juga menimbulkan suara yang berisik. Sehingga rotor jenis ini biasanya digunakan pada generator yang mempunyai penggerak utama dengan kecepatan rendah dan menengah. Rotor ini mempunyai kutub yang terdiri dari lapisan-lapisan besi, dimaksudkan untuk dapat mengurangi panas akibat *eddy current*.

## 2. Generator Sinkron Kutub Silinder (*Non-Salient Pole*)

Rotor silinder (*non-salient*) umumnya digunakan untuk rotor dua kutub dan empat kutub, sedangkan rotor kutub sepatu digunakan untuk rotor dengan empat atau lebih kutub. Pemilihan konstruksi rotor tergantung dari kecepatan putar prime mover, frekuensi dan rating daya generator. Generator dengan kecepatan 1500 rpm ke atas pada frekuensi 50 Hz dan rating daya sekitar 10MVA menggunakan rotor silinder. Sementara untuk daya dibawah 10 MVA dan kecepatan rendah maka digunakan rotor kutub sepatu.

Generator kecepatan tinggi atau tipe turbo mempunyai rotor silinder, konstruksi silinder penting dalam mesin kecepatan tinggi karena tipe kutub sepatu sukar dibuat untuk menahan tekanan pada kecepatan tinggi. Generator arus bolak-balik dengan konstruksi rotor silinder digerakkan oleh turbin uap atau gas.

Gambaran bentuk kutub silinder generator sinkron diperlihatkan pada gambar di bawah ini :



**Gambar 2. 6** Gambaran Bentuk (a) Rotor *Non-Salient* (Rotor Silinder)  
(b) Penampang Rotor Pada Generator Sinkron.

Arus DC disuplai ke rangkaian medan rotor dengan dua cara:

1. Menyuplai daya DC ke rangkaian dari sumber DC *eksternal* dengan sarana *slip ring* dan sikat.
2. Menyuplai daya DC dari sumber DC khusus yang ditempelkan langsung pada batang rotor generator sinkron.

### 2.4.3 Jangkar Kumparan Generator Sinkron

Pada generator sinkron, kumparan ini didesain sebagai bagian yang diam. Kumparan ini berfungsi sebagai tempat untuk menginduksikan gaya gerak listrik (GGL). Kumparan ini terdiri dari beberapa batang konduktor yang terdapat di dalam slot-slot dan ujung-ujung kumparan. Kumparan pembangkit (jangkar) terletak pada bagian yang tidak bergerak atau stator. Keliling bagian dalam dari stator ini dikonstruksikan mempunyai alur-alur sebagai tempat dari kawat-kawat jangkar. Alur-alur dari inti stator ini dibuat dalam berbagai macam bentuk, yaitu

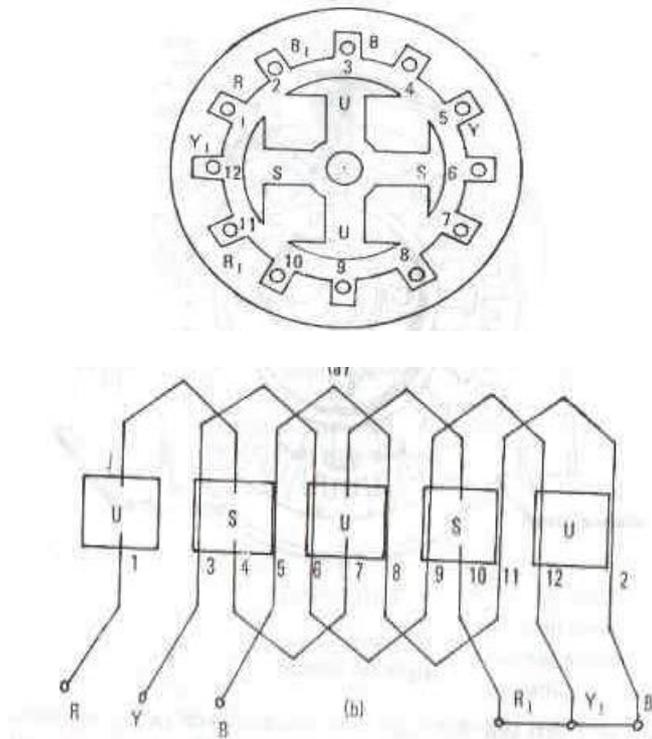
terbuka, semi terbuka dan tertutup. Adapun bentuk alurnya adalah seperti gambar dibawah ini :



**Gambar 2. 7** Bentuk Alur Stator

Jenis belitan jangkar terbagi atas 2 tipe yaitu :

1. Belitan Satu Lapis



**Gambar 2. 8** Belitan Satu Lapis Generator Sinkron Tiga Fasa Hubungan bintang

Pada belitan jangkar satu lapis hanya mempunyai satu lilitan per kutub per fasa, antar kumparan fasa dipisahkan 120 derajat listrik, satu siklus gaya gerak listrik (GGL) penuh akan dihasilkan bila rotor dengan 2 kutub berputar 360 derajat mekanis. Tetapi jika rotor yang digunakan memiliki 14 kutub, maka rotor hanya melakukan putaran sebesar 25 derajat mekanis. Satu siklus GGL penuh menunjukkan 360 derajat listrik, adapun hubungan antara sudut rotor mekanis ( $\alpha$  mekanis) dan sudut listrik ( $\alpha$  listrik), adalah :

$$\alpha \text{ listrik} = \frac{p}{2} \cdot \alpha \text{ mekanis} \dots\dots\dots (2.8)$$

Atau :

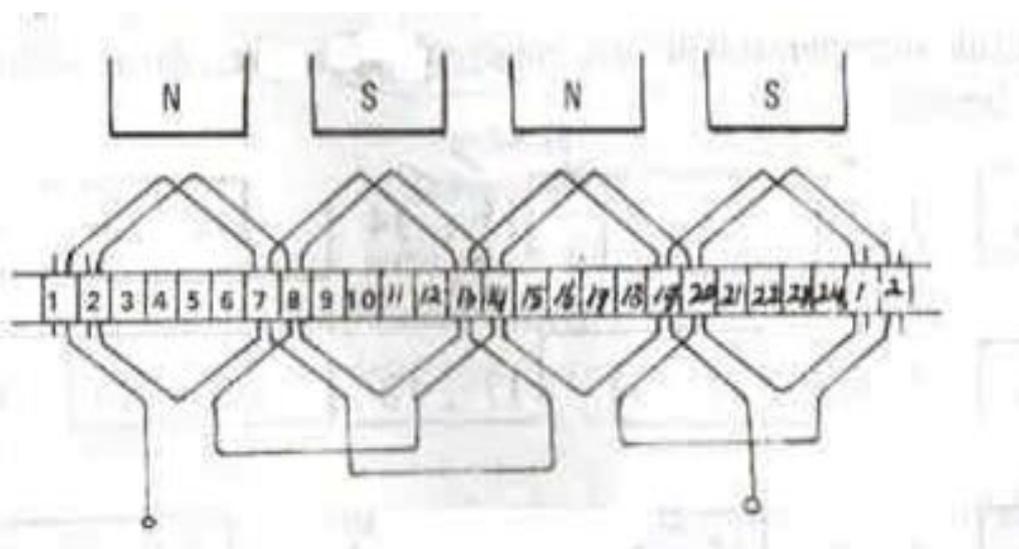
$$\alpha \text{ mekanis} = \frac{\alpha \text{ listrik} \times 2}{p} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana :

$\alpha$  = perbedaan sudut (derajat)

p = jumlah kutub

## 2. Belitan Berlapis Ganda



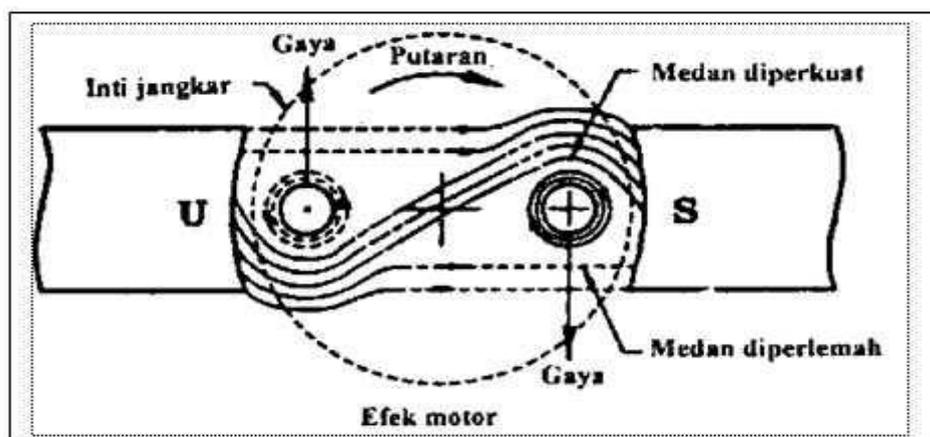
**Gambar 2. 9** Belitan Lapis Ganda Generator Sinkron Hubungan Delta

Dalam gulungan berlapis ganda, dua sisi kumparan ditempatkan dalam setiap alur stator jangkar. Untuk mendapatkan tegangan maksimum, kumparan harus dibuat langkah penuh, dan untuk mendapatkan tegangan yang lebih besar, kumparan tersebut harus dihubungkan seri.

#### 2.4.3.1 Reaksi Jangkar

*Fluks* medan yang menembus konduktor jangkar pada keadaan generator tidak berbeban merupakan *fluks* utama. Jika generator sinkron dibebani, maka pada kumparan jangkar stator mengalir arus, adanya arus jangkar ini menyebabkan timbulnya *fluks* pada konduktor tersebut. *Fluks* jangkar yang ditimbulkan arus ( $\Phi_A$ ) akan berinteraksi dengan *fluks* yang dihasilkan kumparan medan rotor ( $\Phi_F$ ). Pengaruh medan magnet dibentuk oleh arus *armatur* pada distribusi *fluks* di bawah kutub utama dari generator. Medan magnet jangkar mempunyai dua efek :

1. *Demagnetizes* atau melemahkan fluks utama
2. *Magnetises* silang atau mendistorsi



**Gambar 2. 10** Reaksi Jangkar Generator Sinkron

## 2.5 Pemilihan Putaran

Putaran adalah salah satu faktor yang sangat penting untuk mempengaruhi besar tegangan (*Voltage*) dan frekuensi yang timbul pada arus bolak-balik (*Alternating Current*). Frekuensi listrik yang dihasilkan generator sinkron adalah sinkron dengan kecepatan putar generator. Rotor generator sinkron terdiri atas rangkaian elektromagnet dengan suplai arus DC. Medan magnet rotor bergerak pada arah putaran rotor. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada mesin dengan frekuensi listrik pada stator adalah:

$$f = \frac{n \cdot P}{120} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana :

f = Frekuensi Listrik (Hz)

n = Kecepatan Putar Rotor/Kecepatan Medan Magnet (rpm)

p = Jumlah Kutub Magnet

Oleh karena itu, rotor berputar pada kecepatan yang sama dengan medan magnet, persamaan diatas juga menunjukkan hubungan antara kecepatan putar rotor dengan frekuensi listrik yang dihasilkan. Agar daya listrik dibangkitkan tetap pada frekuensi 50 Hz atau 60 Hz, maka generator harus berputar pada kecepatan tetap dengan jumlah kutub mesin yang telah ditentukan. Sebagai contoh untuk membangkitkan frekuensi 50 Hz pada mesin 14 kutub, rotor harus berputar pada kecepatan 429 rpm.

## 2.6 Eksitasi Generator Sinkron

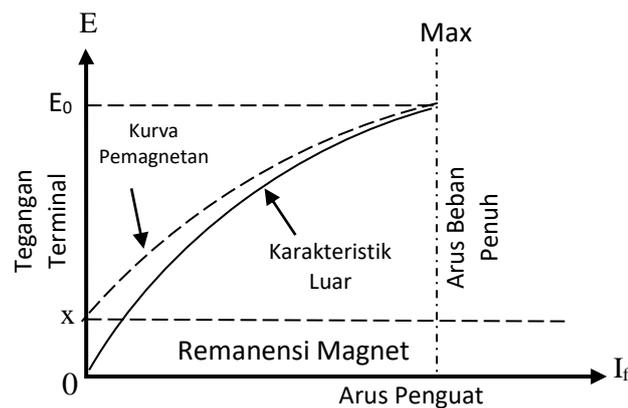
Pada *eksitasi* generator atau sistem penguatan adalah suatu perangkat yang memberikan arus penguat ( $I_f$ ) ke kumparan medan generator arus bolak-balik

(*Alternating Current*) yang dijalankan dengan cara membangkitkan medan magnetnya dengan mengalirkan arus searah pada kumparan medannya, pasokan listrik arus searah (DC) diperoleh dari sumber listrik arus searah/baterai atau dari arus bolak-balik yang disearahkan dengan menggunakan dioda penyearah, sehingga suatu generator dapat menghasilkan energi listrik dengan besar tegangan keluaran generator bergantung pada besarnya arus penguatnya. Sedangkan sistem penguatan dapat digolongkan menurut cara penyediaan tenaganya. Sistem penguatan ini dibagi atas 2, yaitu ; Jika generator dieksitasi dari baterai penyimpanan atau dari sumber DC terpisah, maka disebut generator *eksitasi* terpisah. Jika generator memperoleh suplai arus penguatan dari jangkar generator itu sendiri, maka dinamakan generator *eksitasi* sendiri.

### **2.6.1 Penguatan Sendiri (*Self-Excited*)**

Generator *eksitasi* sendiri bergantung pada magnetisme sisa dari kutub – kutub medannya, jika generator diputar maka konduktor jangkar akan memotong fluks yang sedikit dan akan membangkitkan GGL yang kecil. Karena lilitan penguat dihubungkan ke jangkar generator, arus akan mengalir di kumparan medan. Jika tahanan medan cukup rendah dan arah arus sedemikian rupa sehingga menambah kuat medan dan menghasilkan GGL yang lebih tinggi, yang selanjutnya menyebabkan arus yang mengalir pada kumparan medan makin besar sehingga menambah fluks medan dan GGL yang dibangkitkan. Pada mulanya proses pembangkitan ini tak terbatas, tetapi akan dicapai suatu batas karena rangkaian magnet yang jenuh. Pada titik keseimbangan ini, arus medan menghasilkan fluks secukupnya saja untuk membangkitkan GGL yang

menyebabkan arus medan mengalir. Setelah tegangan terbentuk, tegangan dapat diatur pada harga yang diinginkan dengan mengatur tahanan geser medan, atau Arus yang disuplai tersebut diatur terlebih dahulu oleh AVR (*Automatic Voltage Regulator*) yang merupakan pengatur tegangan otomatis. Melalui AVR inilah dilakukan pengaturan tegangan. Arus yang dihasilkan pada rotor generator penguat disearahkan menjadi dengan menggunakan penyearah (*Rotating Diode*) yang turut berputar dengan rotor kedua generator. Sistem penguatan sendiri dipasang pada ujung poros generator utamanya. Karakteristik generator penguatan sendiri diperlihatkan seperti gambar berikut ini :

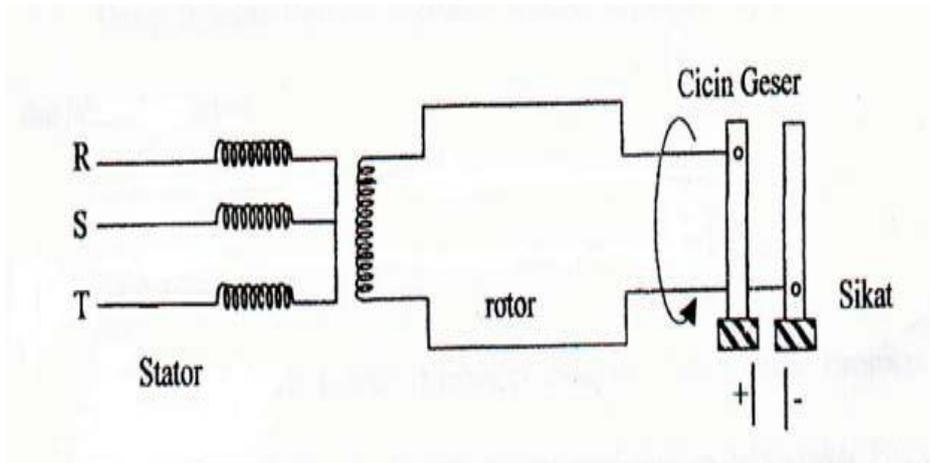


**Gambar 2. 11** Kurva Pengaturan Generator Penguatan Sendiri

### 2.6.2 Penguatan Terpisah

Generator penguatan terpisah adalah generator yang *eksitasi* medannya dicatu dari sumber DC yang berdiri sendiri seperti baterai penyimpanan atau generator dc terpisah. Tahanan geser medan dihubungkan seri dengan medan agar dapat mengubah *eksitasi* medannya.

Pada generator yang mempunyai kapasitas daya yang besar, konstruksinya adalah kutub-kutub yang berputar pada porosnya dan belitan jangkar yang dipasang pada stator (bagian yang tidak bergerak). Dengan demikian maka daya penguatan yang berupa arus searah yang disuplai dari baterai dihubungkan ke lilitan medan melalui sikat dan cincin geser, seperti terlihat pada gambar :

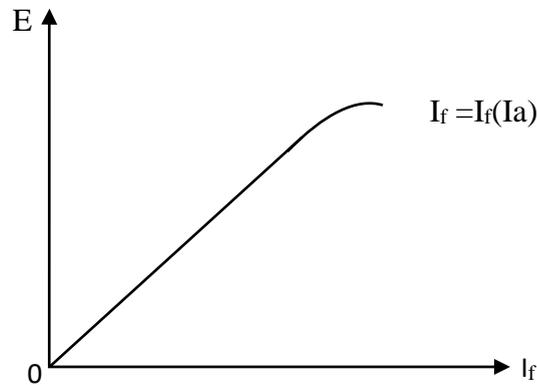


**Gambar 2. 12** Diagram Generator Sistem Penguatan Terpisah

Belitan jangkar (R.S.T) terletak pada stator dan belitan medan pada rotor dan mendapat arus searah dari sistem penguatan secara terpisah yang dihubungkan melalui cincin geser. Walaupun secara relatif, namun daya penguatan tidak besar, sehingga cincin geser senantiasa merupakan titik lemah dari generator yang menyebabkan tahanannya bertambah besar jika sikat pada cincin geser kotor akibat arus listrik yang tidak mengalir sempurna sehingga terjadi busur api jika arus listrik yang mengalir terlalu besar.

Pada saat beban bertambah, tegangan terminal berkurang. Gaya gerak listrik yang dibangkitkan berkurang sebanding dengan beban yang dipikul genetaror tersebut. Akibat pengaruh perlawanan medan jangkar yang menyebabkan fluks

medan utama melemah dan penurunan tegangan disebabkan oleh tahanan jangkar, seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut :



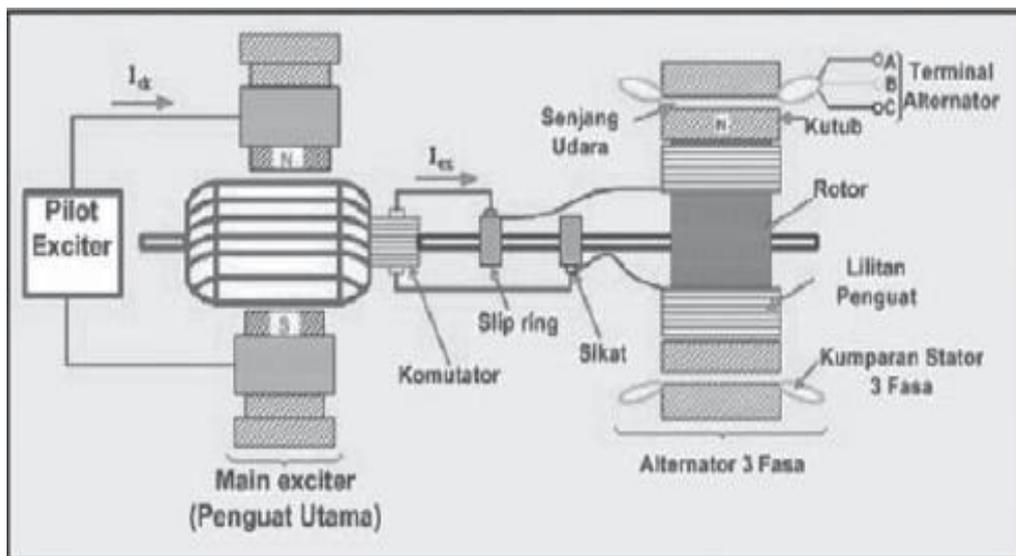
**Gambar 2. 13** Kurva Penguatan Terpisah Dengan karakteristik luar

#### 2.6.2.1 Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan Sikat (*Brush Excitation*)

Pada sistem eksitasi menggunakan sikat, sumber tenaga listriknya berasal dari generator arus searah (DC) atau generator arus bolak-balik (AC) yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan *rectifier* atau *dioda silikon*. Dalam rangkaian penyearah, tegangan listrik arus bolak-balik diubah atau disearahkan menjadi tegangan arus searah untuk mengontrol kumparan medan *eksiter* utama (*main exciter*).

*Exciter* ini adalah generator kecil yang letakkan seporos dengan generator utama yang arus penguatnya bersumber dari DC terpisah, *exciter* ini digunakan untuk memperbesar *fluksi* pada kumparan medan generator utama, sehingga tegangan keluarannya dapat diperbesar.

Untuk mengalirkan arus eksitasi dari *main exciter* ke penguat generator utama, menggunakan slip ring dan sikat arang, demikian juga penyaluran arus yang berasal dari pilot *exciter* ke *main exciter*.



**Gambar 2. 14** Diagram Sistem Eksitasi Dengan Sikat (*Brush Excitation*)

Generator penguat (*exciter*) adalah generator arus searah hubungan *shunt* yang menghasilkan arus penguat bagi medan generator utama. Generator penguat (*exciter*) untuk generator sinkron merupakan generator utama yang diambil dayanya.

Pengaturan tegangan pada generator utama dilakukan dengan mengatur besarnya arus eksitasi (arus penguatan) dengan cara mengatur potensiometer atau tahanan asut. Potensiometer atau tahanan asut mengatur arus penguat generator pertama dan generator penguat kedua menghasilkan arus penguat generator utama. Dengan cara ini arus penguat yang diatur tidak terlalu besar nilainya (dibandingkan dengan arus generator penguat utama) sehingga kerugian daya

pada potensiometer tidak terlalu besar. *Switch* arus penguat generator utama dilengkapi tahanan yang menampung energi medan magnet generator utama karena jika dilakukan pemutusan arus penguat generator utama harus dibuang ke dalam tahanan.

Sekarang banyak generator arus bolak-balik yang dilengkapi penyearah untuk menghasilkan arus searah yang dapat digunakan bagi penguatan generator utama sehingga penyaluran arus searah bagi penguatan generator utama, oleh generator penguat kedua tidak memerlukan cincin geser karena penyearah ikut berputar bersama poros generator. Cincin geser digunakan untuk menyalurkan arus dari generator penguat pertama ke medan penguat generator penguat kedua. Nilai arus penguatan kecil sehingga penggunaan cincin geser tidak menimbulkan masalah. Pengaturan besarnya arus penguatan generator utama dilakukan dengan pengatur tegangan otomatis supaya nilai tegangan keluaran generator konstan. Pengaturan tegangan otomatis pada awalnya berdasarkan prinsip mekanis, tetapi sekarang sudah menjadi elektronik.

#### **2.6.2.2 Sistem Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)**

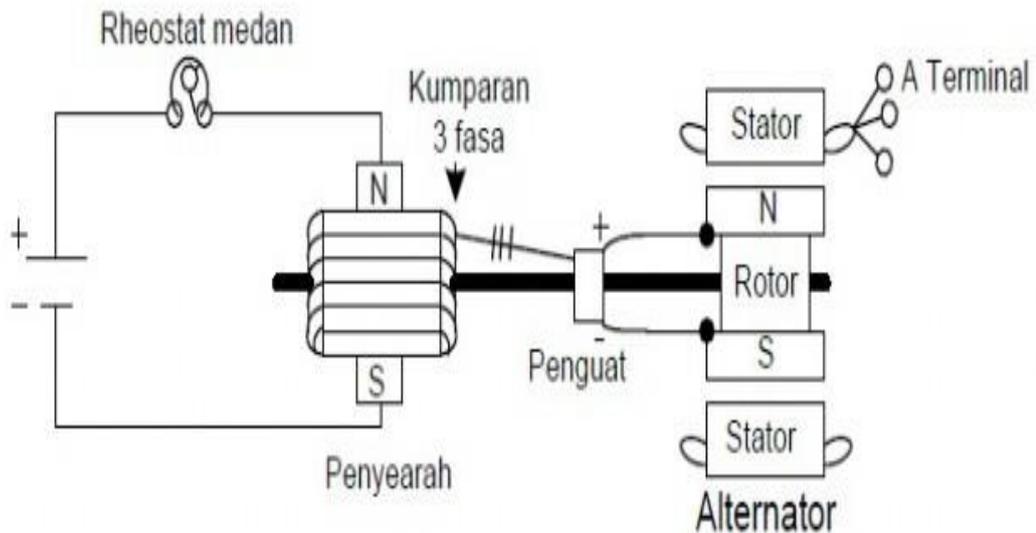
Penggunaan sikat atau *slip ring* untuk menyalurkan arus eksitasi ke rotor generator mempunyai kelemahan karena besarnya arus yang mampu dialirkan pada sikat arang relatif kecil. Untuk mengatasi keterbatasan sikat arang, digunakan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*).

Keuntungan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*), antara lain adalah:

1. Energi yang diperlukan untuk Eksitasi diperoleh dari poros utama (*main shaft*), sehingga keandalannya tinggi
2. Biaya perawatan berkurang karena pada sistem Eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) tidak terdapat sikat, komutator dan slip ring.
3. Pada sistem Eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) tidak terjadi kerusakan isolasi karena melekatnya debu karbon pada *farnish* akibat sikat arang.
4. Mengurangi kerusakan (*trouble*) akibat udara buruk (*bad atmosphere*) sebab semua peralatan ditempatkan pada ruang tertutup
5. Selama operasi tidak diperlukan pengganti sikat, sehingga meningkatkan keandalan operasi dapat berlangsung terus pada waktu yang lama.
6. Pemutus medan generator (*Generator field breaker*), *field* generator dan bus *exciter* atau kabel tidak diperlukan lagi.
7. Biaya pondasi berkurang, sebab saluran udara dan bus *exciter* atau kabel tidak memerlukan pondasi.

Generator arus bolak-balik medan putar menggunakan sistem penguatan tanpa sikat pada generator arus bolak-balik kecil yang dipasangkan pada poros yang sama seperti generator utama, digunakan sebagai penguat. Penguatan arus bolak-balik mempunyai jangkar berputar. Output jangkar disearahkan dengan *diode solid state* yang juga dipasang pada poros utama. Output yang disearahkan dari penguat arus bolak-balik dimasukkan langsung dengan menggunakan hubungan yang diisolasi sepanjang poros pada medan generator sinkron yang berputar. Medan penguat arus bolak-balik adalah tetap dan disuplai dari sumber arus searah terpisah. Akibatnya, output penguat arus bolak-balik dan tegangan

yang dibangkitkan dari generator sinkron dikontrol dengan mengubah kekuatan medan dari penguat arus bolak-balik melalui pengaturan *rheostat* medan.



**Gambar 2. 15** Generator Sinkron Eksitasi Tanpa Sikat (*Brushless Excitation*)

Generator penguat pertama disebut *pilot exciter* dan generator penguat kedua disebut *main exciter* (penguat utama). *Main exciter* adalah generator arus bolak-balik dengan kutub pada statornya. Rotor menghasilkan arus bolak-balik disearahkan dengan dioda yang berputar pada poros *main exciter* (satu poros dengan generator utama). Arus searah yang dihasilkan oleh dioda berputar menjadi arus penguat generator utama. Tegangan bolak-balik disearahkan oleh penyearah dioda dan menghasilkan arus searah yang dialirkan ke kutub-kutub magnet medan generator utama, besar arus searah yang mengalir ke kutub medan utama diatur oleh pengatur tegangan otomatis (*Automatic Voltage Regulator/AVR*).

## 2.7 Automatic Voltage Regulator (AVR)

*Automatic Voltage Regulator (AVR)* adalah sebuah sistem kelistrikan yang berfungsi untuk menjaga agar tegangan generator tetap konstan setelah generator paralel dengan generator lain, sehingga generator akan tetap mengeluarkan tegangan yang selalu stabil, tidak terpengaruh terhadap perubahan beban yang selalu berubah-ubah.

Prinsip kerja AVR adalah mengatur arus penguatan (eksitasi) pada *exciter* setelah generator bekerja paralel pada sistem. Apabila tegangan output generator dibawah tegangan nominal generator, maka AVR akan memperbesar arus penguatan pada *exciter*. Dan juga sebaliknya, apabila tegangan output generator melebihi tegangan nominal generator, maka AVR akan mengurangi arus penguatan pada *exciter*. Dengan demikian apabila terjadi perubahan tegangan output generator akan dapat di stabilkan oleh AVR secara otomatis, karena dilengkapi dengan peralatan seperti alat yang digunakan untuk pembatasan penguat minimum ataupun maksimum yang bekerja secara otomatis.

Pada saat beroperasi pengaturan otomatis digunakan untuk mempertahankan tegangan *output* yang konstan, dimana tegangan *output* generator ini digunakan sebagai pembanding untuk mengendalikan medan (*exciter generator*).

*Sensing* dan *gating circuit* akan merasakan perubahan tegangan *output* generator akibat perubahan beban dan mengubahnya dalam bentuk *gating* pulsa. Kemudian *gating* pulsa dikirim ke bagian SCR *power stage* akan mengatur besarnya arus medan *exciter* melalui pengaturan sudut konduksi bergantung kepada *timing of gating* pulsa yang dikirim oleh bagian *sensing* dan *gating*

*circuitry* diatas. Karena perubahan sudut konduksi SCR dan selanjutnya akan mengubah besarnya penguatan *exciter*.

Dengan berubahnya arus penguatan *exciter* maka tegangan *output* generator akan berubah pula.

Fungsi dari peralatan–peralatan lainnya dapat dijelaskan sebagai berikut :

#### 1. *Power Input*

Power input dihubungkan ke *output* generator melalui *power transformer* guna mensuplai daya listrik bagi AVR.

#### 2. *Stabilization Adjust*

*Stabilization adjust* berfungsi untuk mengontrol *signal feed back* yang berasal dari *output* generator sebelum dikirim ke rangkaian *sensing* dan gating guna mencegah *hunting* dan *oscillasi* tegangan sistem.

#### 3. *Voltage Adjust Rheostat*

*Voltage adjust rheostat* berfungsi untuk mengatur tegangan terminal output dalam batas–batas  $\pm 10\%$  nominal.

#### 4. *Paralel Compensation*

Rangkaian paralel *compensation* berfungsi untuk mengatur arus penguatan medan antar generator yang bekerja paralel yang mempunyai perbedaan arus penguatan.

### **2.8 Pengaturan Tegangan Generator (*voltage regulator*)**

Pengaturan tegangan adalah perubahan tegangan terminal *alternator* antara keadaan beban nol dengan beban penuh. Keadaan ini memberikan gambaran batasan *drop* tegangan yang terjadi pada generator.

*Regulasi* tegangan generator dapat kita hitung dengan menggunakan rumus dibawah ini :

$$VR = \frac{E_0 - V}{V} \times 100\% \dots\dots\dots (2.11)$$

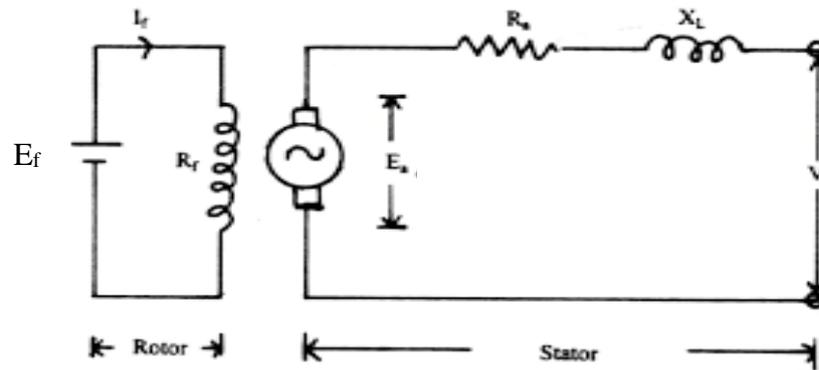
Terjadinya perbedaan tegangan terminal (V) dalam keadaan berbedan dengan tegangan ( $E_0$ ) pada saat tidak berbeban dipengaruhi oleh faktor daya dan besarnya arus jangkar ( $I_a$ ) yang mengalir.

## 2.9 Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron

Tegangan induksi  $E_a$  dibangkitkan pada fasa generator sinkron. Tegangan ini biasanya tidak sama dengan tegangan yang muncul pada terminal generator. Tegangan induksi sama dengan tegangan output terminal hanya ketika tidak ada arus jangkar yang mengalir pada mesin atau generator dalam keadaan tidak berbeban. Beberapa faktor yang menyebabkan perbedaan antara tegangan induksi dengan tegangan terminal adalah:

1. *Distorsi* medan magnet pada celah udara oleh mengalirnya arus pada stator, disebut reaksi jangkar.
2. *Induktansi* sendiri kumparan jangkar.
3. *Resistansi* kumparan jangkar.
4. Efek permukaan rotor kutub sepatu.

Rangkaian *ekuivalen* generator sinkron perfasa ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



**Gambar 2. 16** Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron

### 2.10 Menentukan Parameter Generator Sinkron

Harga  $X_s$  diperoleh dari dua macam percobaan yaitu percobaan tanpa beban dan percobaan hubungan singkat. Pada pengujian tanpa beban, generator diputar pada kecepatan ratingnya dan terminal generator tidak dihubungkan ke beban. Arus eksitasi medan mula-mula adalah nol. Kemudian arus eksitasi medan dinaikan bertahap dan tegangan terminal generator diukur pada tiap tahapan. Dari percobaan tanpa beban arus jangkar adalah nol ( $I_a = 0$ ) sehingga  $V$  sama dengan  $E_a$ . Sehingga dari pengujian ini diperoleh kurva  $E_a$  sebagai fungsi arus medan ( $I_f$ ). Dari kurva ini harga yang akan dipakai adalah harga liniernya (*unsaturated*). Pemakaian harga linier yang merupakan garis lurus cukup beralasan mengingat kelebihan arus medan pada keadaan jenuh sebenarnya dikompensasi oleh adanya reaksi jangkar.

Pengujian yang kedua yaitu pengujian hubung singkat. Pada pengujian ini mula-mula arus eksitasi medan dibuat nol, dan terminal generator dihubungkan melalui ampere meter. Kemudian arus jangkar  $I_a$  (arus saluran) diukur dengan mengubah arus eksitasi medan. Dari pengujian hubung singkat

akan menghasilkan hubungan antara arus jangkar ( $I_a$ ) sebagai fungsi arus medan ( $I_f$ ), dan ini merupakan garis lurus.

Ketika terminal generator dihubung singkat maka tegangan terminal adalah nol. Impedansi internal mesin adalah:

$$E_1 = I_1 \cdot Z_S \dots\dots\dots (2.12)$$

$$Z_S = \frac{E_1 \text{ (open circuit)}}{I_1 \text{ (short circuit)}} = \frac{E_a}{I_a} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$X_S = \sqrt{Z_S^2 - R_a^2} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$E_0 = \sqrt{(V \cos \varphi + IR_a)^2 + (V \sin \varphi + IX_S)^2} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana :

$X_S$  = Reaktansi sinkron (Ohm)

$Z_S$  = Impedansi sinkron (Ohm)

$R_a$  = Tahanan jangkar (Ohm)

$E_0$  = Tegangan induksi tanpa beban (Volt)

Jika  $I_a$  dan  $E_a$  diketahui untuk kondisi tertentu, maka nilai reaktansi sinkron dapat diketahui. Tahanan jangkar dapat diukur dengan menerapkan tegangan DC pada kumparan jangkar pada kondisi generator diam dengan hubungan bintang (Y), kemudian arus yang mengalir diukur. Selanjutnya tahanan jangkar perfasa pada kumparan dapat diperoleh dengan menggunakan hukum ohm sebagai berikut

$$R_a = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana :

$R_a$  = Reaktansi jangkar (Ohm)

$V_{DC}$  = Tegangan DC (Volt)

$I_{DC}$  = Arus DC (Ampere)

Penggunaan tegangan DC ini adalah supaya reaktansi kumparan sama dengan nol pada saat pengukuran.

### 2.11 Genarator Tanpa Beban

Dengan memutar generator pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan ( $I_f$ ), maka tegangan ( $E_a$ ) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator.

Dari persamaan (2.1), maka diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$C = \frac{Z}{60} \left( \frac{p}{a} \right) \dots\dots\dots (2.17)$$

$$E = \frac{\Phi \cdot Z \cdot n}{60} \cdot (p/a) \dots\dots\dots (2.18)$$

Dimana :

$E$  = Tegangan induksi jangkar  
(Volt)

$p$  = Jumlah kutup

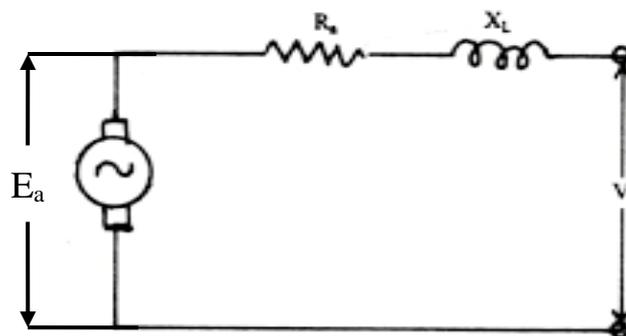
$a$  = Cabang jangkar

$C$  = Konstanta mesin

$n$  = Putaran sinkron (rpm)

$Z$  = Jumlah konduktor

$\phi$  = Fluks yang dihasilkan oleh  $I_f$   
(Weber)



**Gambar 2. 17** Rangkaian Ekuivalen Generator Tanpa Beban

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan ( $I_f$ ).

## 2.12 Generator Berbeban

Dalam keadaan berbeban arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar bersifat reaktif karena itu dinyatakan sebagai reaktansi, dan disebut reaktansi *magnetisasi* ( $X_m$ ). Reaktansi pemagnet ( $X_m$ ) ini bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor ( $X_a$ ) dikenal sebagai reaktansi sinkron ( $X_s$ ). Persamaan tegangan pada generator adalah :

$$E = V + I.R_a + j I.X_s \dots\dots\dots (2.19)$$

$$X_s = X_m + X_a \dots\dots\dots (2.20)$$

Dimana:

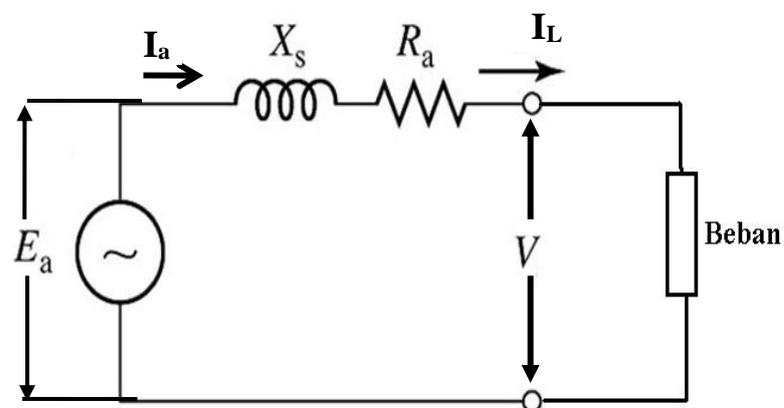
$E$  = Tegangan induksi pada jangkar (Volt)

$R_a$  = Resistansi jangkar (Ohm)

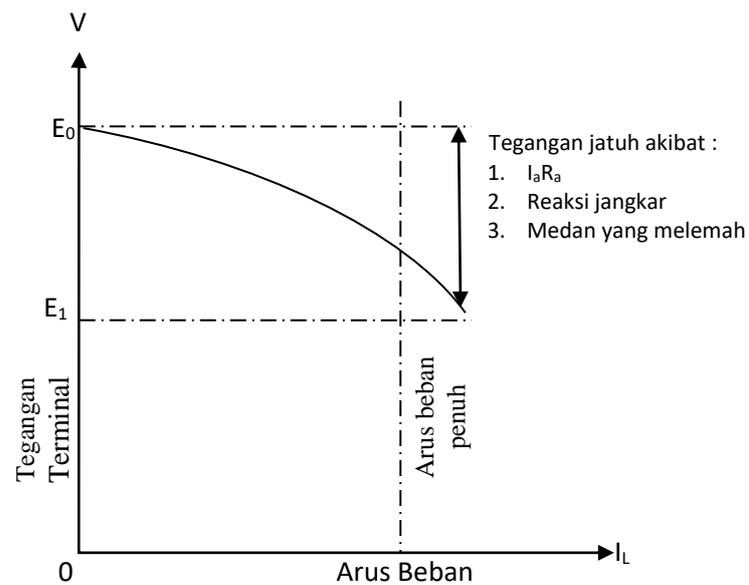
$X_s$  = Reaktansi sinkron (Ohm)

$V$  = Tegangan terminal output (Volt)

$I$  = Arus jangkar (Ampere)



**Gambar 2. 18** Rangkaian Ekivalen Generator Berbeban



**Gambar 2.19** Karakteristik Pembebanan Generator

### 2.13 Kerja Paralel Generator

Jika beban pada stasiun pembangkit menjadi sedemikian besar sehingga nilai (*rating*) generator yang sedang bekerja dilampaui, maka perlu penambahan generator lain secara paralel untuk meaikkan penyediaan daya dari stasiun pembangkit tersebut.

Sinkronisasi generator adalah memparalelkan kerja dua buah generator atau lebih untuk mendapatkan daya sebesar jumlah generator tersebut dengan syarat-syarat yang telah ditentukan. Adapun parameter-parameter yang harus dipenuhi untuk memparalelkan generator adalah sebagai berikut :

1. Urutan fasenya harus sama
2. Tegangan terminalnya harus sama
3. Mempunyai sudut fase yang sama
4. Frekuensi kerja harus sama

Dalam kerja paralel generator tidak cukup hanya berdasar pada syarat–syarat diatas ada hal lain yang perlu diketahui sebagai penjabaran syarat–syarat diatas. Adapun penjabarannya sebagai berikut :

#### 1. Urutan Fase Yang Sama

Yang dimaksud urutan fasa adalah arah putaran dari ketiga fasa. Arah urutan ini dalam dunia industri dikenal dengan nama CW (*Clock Wise*) yang artinya searah jarum jam dan CCW (*Counter Clock Wise*) yang artinya berlawanan dengan jarum jam. Hal ini dapat diukur dengan alat fasa *sequence type* jarum. Dimana jika pada saat mengukur, jarum bergerak berputar kekanan dinamakan CW dan jika berputar kekiri dinamakan CCW. Disamping itu dikenal juga urutan fasa ABC dan CBA. ABC identik dengan CW sedangkan CBA identik dengan CCW. Perlu diketahui bahwa banyak generator mencantumkan simbol R,S,T,N ataupun L1,L2,L3,N namun tidak selalu berarti bahwa urutan CW / ABC itu berarti RST atau L1L2L3. Jika diukur urutan STR, TRS ,L2L3L1 itu juga termasuk CW/ABC.

Sebagai contoh : Pada kabel penghantar yang keluar dari generator di PLTD Titi Kuning, kabel diseragamkan semua berwarna hitam dan tidak ada kode sama sekali. Kita tidak bisa membedakan secara *visual* atau *parameter* listrik bahwa penghantar itu fasanya R, S, atau T. Kita hanya bisa membedakan arah urutannya saja CW atau CCW. Apapun generatornya jika mempunyai arah urutan yang sama maka dapat dikatakan mempunyai salah satu syarat dari paralel generator. Sehingga bisa jadi pada dua generator yang sama urutan RST pada generator 1 dapat dihubungkan dengan fasa STR pada generator 2 dan itu tidak ada masalah asal keduanya mempunyai arah urutan yang sama.

## 2. Tegangan Terminalnya Harus Sama

Dengan adanya tegangan kerja yang sama diharapkan pada saat diparallel dengan beban kosong power faktornya 1. Dengan faktor daya 1 berarti tegangan antara 2 generator persis sama. Jika 2 sumber tegangan itu berasal dari dua sumber yang sifatnya statis misal dari baterai atau transformator maka tidak akan ada arus antara keduanya. Namun karena dua sumber merupakan sumber tegangan yang dinamis (diesel generator), maka faktor dayanya akan terjadi *deviasi* naik dan turun secara *periodik* bergantian dan berlawanan. Hal ini terjadi karena adanya sedikit perbedaan sudut fasa yang sesekali bergeser karena faktor gerak dinamis dari diesel penggerak. Itu bisa dibuktikan dengan membaca secara bersamaan putaran dari kedua generator dalam keadaan sinkron.

Misalnya Generator *leader* mempunyai kecepatan putar 429 dan generator *follower* mempunyai kecepatan putar 430, maka terdapat selisih 1 putaran/menit. Dengan perhitungan seperti dibawah ini :

$$\Delta\phi = \frac{N_{\text{Leader}} - N_{\text{Follower}}}{N_{\text{Follower}}} \times 360^\circ \dots\dots\dots (2.21)$$

Dan dapat dihitung selisih tegangan sebesar :

$$\Delta V = \text{Cos } \Delta\phi \times (V_{\text{Leader}} - V_{\text{follower}}) \dots\dots\dots (2.22)$$

Dimana :

$\Delta\phi$  = Beda fasa

$N_L; N_F$  = Kecepatan putar generator *leader; follower*

$V_L; V_F$  = Tegangan terminal *leader ; follower*

Selisih tegangan yang kecil cukup mengakibatkan timbulnya arus sirkulasi antara 2 buah generator tersebut dan sifatnya tarik menarik namun tidak membahayakan. Dan pada saat dibebani bersama-sama maka faktor dayanya akan relatif sama sesuai dengan faktor daya beban. Memang sebaiknya dan idealnya masing masing generator menunjukkan faktor daya yang sama. Jika terjadi perbedaan faktor daya dengan selisih tidak terlalu besar, generator tersebut masih dapat diparalelkan. Namun akibat dari hal tersebut salah satu generator yang mempunyai nilai faktor daya rendah akan mempunyai nilai arus yang sedikit lebih tinggi. Yang penting diperhatikan adalah tidak melebihi arus nominal dan daya nominal dari generator.

Pada saat generator bekerja paralel perubahan arus *eksitasi* akan merubah faktor daya, jika arus eksitasi diperkuat maka nilai faktor daya mengecil menjauhi satu, sebaliknya jika *eksitasi* dikurangi maka nilai faktor daya akan membesar mendekati 1.

Pada panel-panel kontrol modern sudah dilengkapi dengan modul yang mana sudah terdapat pengaturan VAR generator dengan *output* yang disambungkan ke AVR generator. Sehingga secara otomatis masing masing generator dengan berapapun beban kW, faktor daya akan menjadi sama dan seimbang. Hal ini diperuntukkan pada sistem yang mana sistem tersebut paralel sesaat atau transfer beban baik antara generator maupun dengan generator ke sistem. Pada kondisi ini sedikit berbeda dengan yang diuraikan diatas yaitu masalah pembagian dan pengaturan faktor daya. Pada generator PLTD sudah ditentukan berapa kW beban yang akan disuplai dan berapa kWH energi yang akan dikirim. Pada saat mulai memparalelkan tegangan tidak harus sama,

karena pengaturan kenaikan beban secara bertahap maka pengaturan penambahan *eksitasi* juga bertahap sampai didapatkan faktor daya yang dikehendaki. Kita bisa mengatur sendiri faktor daya yang akan dioperasikan, namun pada umumnya yang lebih sering digunakan pada faktor daya 0,9. Perubahan faktor daya di generator PLTD tidak begitu mempengaruhi banyak meskipun ada. Hal tersebut diatas dapat dilihat dengan menggunakan rumus daya aktif :

$$P = \sqrt{3}.V.I.Cos \varphi \dots\dots\dots (2.23)$$

$$P_{total} = P_{beban} = P_{G1} + P_{G2} + \dots + P_{Gn} \dots\dots\dots (2.24)$$

Dimana :

$P_{total}$  = Daya total (Watt)

$P_{Gn}$  = Daya yang dihasilkan generator (Watt)

$V$  = Tegangan (Volt)

$I$  = Arus beban (Ampere)

$Cos \varphi$  = Faktor daya generator

Jika arus *eksitasi* pada salah satu generator dinaikkan, maka tegangan generator yang dinaikkan *eksitasi* tersebut akan naik. Pada persamaan diatas, apabila pada beban arus dan daya yang dilayani tetap maka akan terjadi penurunan faktor daya, dan demikian sebaliknya.

Pada saat hendak memparalelkan secara manual generator dengan generator lain yang sudah berbeban, kita menyamakan persis dengan tegangan *line/jala-jala*. Maka pada saat *breaker close*, faktor daya generator akan menunjuk 1 dan beban kW akan menunjuk pada posisi 0, jika kita menambah daya *output* mesin perlahan lahan, maka faktor daya akan cenderung menuju

ke kapasitif (*leading*) dan memungkinkan terjadinya *reverse power*. Untuk menghindari tersebut maka setelah sinkron penguatan eksitasi yang pertama dinaikkan sampai  $\cos \varphi$  mencapai nilai yang diinginkan. Seiring dengan itu maka kita dapat menaikkan daya mesin dengan menaikkan *speed adjuster*. Pada saat beban naik,  $\cos \varphi$  akan naik membesar mendekati satu. Pada saat bersamaan eksitasi diatur mencapai nilai yang diinginkan demikian seterusnya sampai mencapai nilai yang diinginkan. Pada saat generator bekerja paralel satu sama lainnya, kelimanya bekerja pada kecepatan sinkron dan bekerja seperti kelimanya telah bergandengan secara mekanik. Masing-masing generator memakai alat pengatur berupa governor. Pada pembagian daya kelima generator, jumlah generator yang dioperasikan tergantung daripada jumlah beban yang dilayani. Apabila jumlah daya beban yang dilayani berkurang dan hal tersebut dapat kita hitung pada perolehan data beban harian untuk pemakaian generator pada lampiran dengan menggunakan persamaan berikut :

$$P_{total} = P_{beban} = (\sum I_{beban}) \cdot (\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi) \dots\dots\dots (2.25)$$

$$\sum I_{beban} = \frac{P_{beban}}{(\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi)} \dots\dots\dots (2.26)$$

$$I_G = \frac{\sum I_{beban}}{N_G} \dots\dots\dots (2.27)$$

Dimana :

$P_{beban}$  = Daya beban (Wt)

$I_G$  = Arus generator (A)

$I_{beban}$  = Arus beban (A)

$N_G$  = Jumlah generator yang

$V$  = Tegangan (V)

beroperasi

$\cos \varphi$  = Faktor daya

### 3. Mempunyai Sudut Fase Yang Sama

Mempunyai sudut fasa yang sama bisa diartikan, fasa-fasa dari generator yang diparalelkan mempunyai sudut fasa yang berhimpit sama atau  $0^\circ$ . Dalam kenyataannya tidak memungkinkan mempunyai sudut yang berhimpit karena generator yang berputar meskipun dilihat dari parameternya mempunyai frekuensi yang sama namun jika dilihat menggunakan *synchronoscope* pasti bergerak labil kekiri dan kekanan, dengan kecepatan sudut radian yang ada sangat sulit untuk mendapatkan sudut berhimpit dalam jangka waktu 0,5 detik. Breaker membutuhkan waktu tidak kurang dari 0,3 detik untuk *close* pada saat ada perintah *close*.

### 4. Frekuensi Kerja Harus Sama

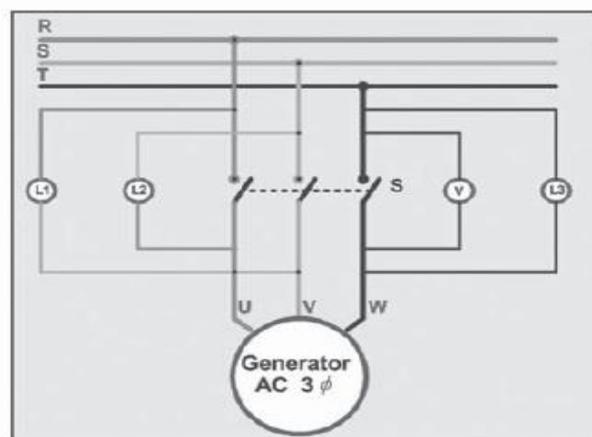
Didalam dunia industri dikenal 2 buah sistem frekuensi yaitu 50 Hz dan 60 Hz . Dalam operasionalnya sebuah generator bisa saja mempunyai frekuensi yang *fluktuatif* (berubah-ubah) karena faktor faktor tertentu. Pada jaringan distribusi dipasang alat pembatas frekuensi yang membatasi frekuensi pada minimal 48,5 Hz dan maksimal 51,5 Hz. Pada saat hendak paralel, dua buah generator tentu tidak mempunyai frekuensi yang sama persis. Jika mempunyai frekuensi yang sama persis maka generator tidak akan bisa paralel karena sudut phasanya belum berhimpit pada  $0^\circ$ , salah satu harus dikurang sedikit atau dilebihi sedikit untuk mendapatkan sudut fasa yang tepat. Setelah dapat disinkron dan berhasil sinkron baru kelima generator mempunyai frekuensi yang sama persis.

### 2.13.1 Prinsip Kerja Pemparalelan Generator

Ada beberapa cara untuk memparalelkan generator dengan mengacu pada syarat–syarat diatas, yaitu :

#### 1. Lampu Cahaya Berputar

Dengan rangkaian pada **gambar 2.20**, pertama kali generator diputar oleh penggerak mula mendekati putaran nominalnya, lalu arus penguat diatur sehingga tegangan terminal generator sama dengan generator yang sudah dikoneksikan pada busbar. Untuk mendapatkan frekuensi dan urutan fasa generator dan sistem digunakan alat pendeteksi berupa lampu *synchronoscope* hubungan terang. Jika lampu L1, L2, dan L3 hidup mati dengan frekuensi jala–jala lebih besar dari generator berarti urutan fasa belum sama, apabila ketiga lampu sudah tidak berkedip berarti frekuensi jala–jala sama dengan frekuensi generator.



**Gambar 2. 20** Rangkaian Paralel Generator

#### 2. Voltmeter, Frekuensi Meter, dan *Synchronoscope*

Pada pusat pembangkit tenaga listrik, untuk indikator paralel generator banyak yang menggunakan alat *synchronoscope*. Penggunaan alat ini

dilengkapi dengan Voltmeter untuk memonitor kesamaan tegangan dan Frekuensi meter untuk kesamaan frekuensi.

Ketepatan sudut fasa dapat dilihat dari *synchronoscope*. Bila jarum penunjuk berputar berlawanan arah jarum jam, berarti frekuensi generator lebih rendah dan bila searah jarum jam berarti frekuensi generator lebih tinggi. Pada saat jarum telah diam dan menunjuk pada kedudukan vertikal, berarti beda fasa generator dengan sistem adalah 0 (Nol) dan selisih frekuensi telah 0 (Nol), maka pada kondisi ini saklar dimasukkan (ON).

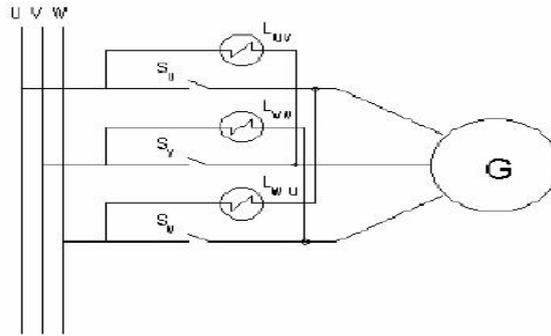


**Gambar 2. 21** Synchronoscope

### 3. Paralel Otomatis

Paralel generator secara otomatis biasanya menggunakan alat yang secara otomatis memonitor perbedaan fasa, tegangan, frekuensi, dan urutan fasa. Apabila kondisi telah tercapai alat memberi sinyal bahwa saklar untuk paralel dapat dimasukkan.



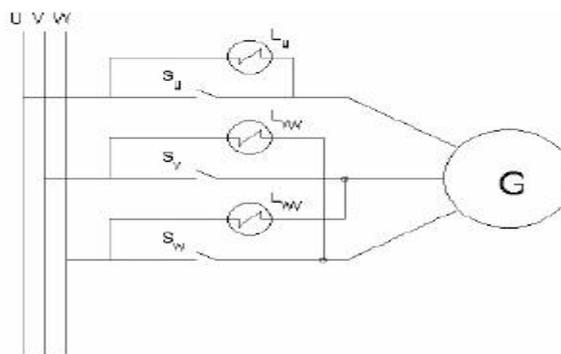


**Gambar 2. 23** Skema Sinkronoskop Lampu Terang

Sinkronoskop jenis ini kebalikan dari sinkronoskop lampu gelap. Jika antar fasa ada beda tegangan, maka ketiga lampu akan menyala sama terang dan generator siap untuk diparalelkan. Kelemahannya pada metode ini tidak sulit untuk mengetahui intensitas terangnya sehingga siap untuk diparalel.

### 3. Sinkronoskop Hubungan Lampu Terang–Gelap

Sinkronoskop jenis ini merupakan penggabungan dari lampu gelap dan terang. Prinsip adalah dengan menghubungkan satu fasa yang sama dan dua fasa yang berlainan, yaitu fasa U dengan fasa U, fasa V dengan fasa W, dan fasa W dengan fasa V.



**Gambar 2. 24** Skema Sinkronoskop Lampu Gelap–Terang

Pada sinkronoskop ini generator siap paralel, jika satu lampu gelap dan dua lampu lainnya terang.

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Waktu Dan Tempat Penelitian**

Adapun lokasi yang digunakan sebagai objek penelitian adalah pembangkit listrik tenaga diesel Titi Kuning. Jl. Brigjen Katamso km. 55 Medan–Johor dan dilaksanakan pada tanggal 25 Juni 2018 sampai dengan tanggal 06 Juli 2018.

#### **3.2 Peralatan Penelitian**

Adapun peralatan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

##### 1. Satu Unit Notebook

Merk : *Hewlett-Packard* (HP)  
Processor : Intel® Atom™ CPU N550 @1.50 GHz  
Installed Memory (RAM) : 1.00 GB  
Fungsi : Untuk mencatat data–data yang diperlukan dalam penelitian dan dalam penulisan tugas akhir.

##### 2. Satu Unit Flash Drive

Merk : *Hewlett-Packard* (HP)  
Kapasitas : 16 GB  
Fungsi : Untuk memindahkan data–data yang diperlukan peneliti.

### 3.3 Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan data–data yang berasal dari PT. PLN (Persero) pembangkit listrik tenaga diesel.

#### 3.3.1 Data Generator

Data–data spesifikasi generator yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga diesel Titi Kuning adalah sebagai berikut :

**Tabel 3. 1** Data Generator 1, 2 dan 3 pada PLTD Titi Kuning

Parameter	Generator 1	Generator 2	Generator 3
Merk	IDEAL ELEKTRIK	IDEAL ELEKTRIK	IDEAL ELEKTRIK
Type	SAB Frame M-9	SAB Frame M-9	SAB Frame M-9
kW	4141 kW	4141 kW	4141 kW
kVA	5176.2 kVA	5176.2 kVA	5176.2 kVA
RPM	429 Rpm	429 Rpm	429 Rpm
Teg. Terminal	7.000 Volt	7.000 Volt	7.000 Volt
Fasa	3 Fasa, 4 Kawat	3 Fasa, 4 Kawat	3 Fasa, 4 Kawat
Arus	427 Ampere	427 Ampere	427 Ampere
Field	125 Volt	125 Volt	125 Volt
Frekuensi	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Power Factor	0.8	0.8	0.8

**Tabel 3. 2** Data Generator 4, 5, dan 6 pada PLTD Titi Kuning

Parameter	Generator 4	Generator 5	Generator 6
Merk	IDEAL ELEKTRIK	IDEAL ELEKTRIK	IDEAL ELEKTRIK
Type	SAB Frame M-9	SAB Frame M-9	SAB Frame M-9
Kw	4141 kW	4141 kW	4141 kW
kVA	5176.2 kVA	5176.2 kVA	5176.2 kVA
RPM	429 Rpm	429 Rpm	429 Rpm
Teg. Terminal	7.000 Volt	7.000 Volt	7.000 Volt
Fasa	3 Fasa, 4 Kawat	3 Fasa, 4 Kawat	3 Fasa, 4 Kawat
Arus	427 Ampere	427 Ampere	427 Ampere
Field	125 Volt	125 Volt	125 Volt
Frekuensi	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Power Factor	0.8	0.8	0.8

### 3.3.2 Data Eksiter

Jumlah eksiter yang digunakan adalah sebanyak enam unit dan mempunyai data-data lengkap sebagai berikut :

**Tabel 3. 3** Data Exiter 1, 2, Dan 3 Pada PLTD Titi Kuning

Parameter	Generator 1	Generator 2	Generator 3
Merek	IDEAL ELEKTRIK	IDEAL ELEKTRIK	IDEAL ELEKTRIK
Type	FRBA	FRBA	FRBA
Kind of Brush	Brushless	Brushless	Brushless
Output	40 kW	40 kW	40 kW
Tegangan DC	250 Volt	250 Volt	250 Volt
Arus DC	150 Ampere	150 Ampere	150 Ampere
Field Volt	160 Volt	160 Volt	160 Volt
Field Ampere	10.8 Ampere	10.8 Ampere	10.8 Ampere
Kelas isolasi	B	B	B
Temperature maksimal	80 °C	80 °C	80 °C
Putaran	429 rpm	429 rpm	429 rpm
Rectifier Quant	3	3	3
Rectifier Jedel No	RS-1108-10 XXZT	RS-1108-10 XXZT	RS-1108-10 XXZT
Rectifier Count	3 Phasa; Full Wive	3 Phasa; Full Wive	3 Phasa; Full Wive
Manufacture	IDEAL ELECTRIC-USA	IDEAL ELECTRIC-USA	IDEAL ELECTRIC-USA

**Tabel 3. 4** Data Exiter 4, 5, Dan 6 Pada PLTD Titi Kuning

Parameter	Generator 4	Generator 5	Generator 6
Merek	IDEAL ELEKTRIK	IDEAL ELEKTRIK	IDEAL ELEKTRIK
Type	FRBA	FRBA	FRBA
Kind of Brush	Brushless	Brushless	Brushless
Output	40 kW	40 kW	40 kW
Tegangan DC	250 Volt	250 Volt	250 Volt
Arus DC	150 Ampere	150 Ampere	150 Ampere
Field Volt	160 Volt	160 Volt	160 Volt
Field Ampere	10.8 Ampere	10.8 Ampere	10.8 Ampere
Kelas isolasi	B	B	B
Temperature maksimal	80 °C	80 °C	80 °C
Putaran	429 rpm	429 rpm	429 rpm
Rectifier Quant	3	3	3

Rectifier Jedel No	RS-1108-10 XXZT	RS-1108-10 XXZT	RS-1108-10 XXZT
Rectifier Count	3 Phasa; Full Wive	3 Phasa; Full Wive	3 Phasa; Full Wive
Manufacture	IDEAL ELECTRIC-USA	IDEAL ELECTRIC-USA	IDEAL ELECTRIC-USA

### 3.3.3 Data *Battery Charger*

Data charger yang digunakan pada PLTD Titi Kuning untuk pengisian battery adalah sebagai berikut :

**Tabel 3. 5** Data Charger

Merek	NIFE JUNGEL
Model	66B
Nomor Serial	70788
Phase	3
Input Voltage	380 VAC
Output Voltage	125 VDC
Output Arus	54
Frekuensi	50 HZ
Costumer No	76107
Made In	USA

### 3.3.4 Data *Circuit Breaker*

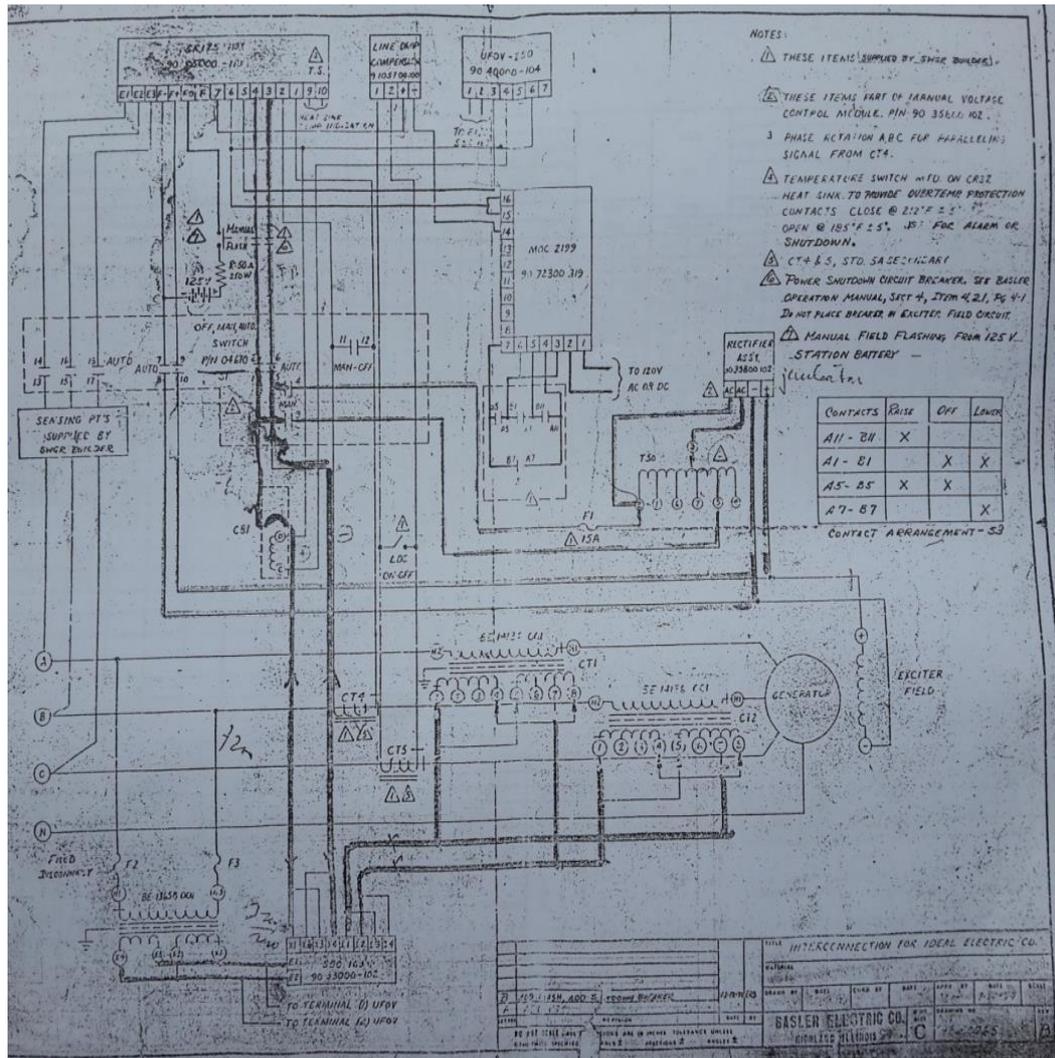
Data–data *circuit breaker* yang digunakan pada PLTD Titi Kuning adalah sebagai berikut :

**Tabel 3. 6** Data *Circuit Breaker*

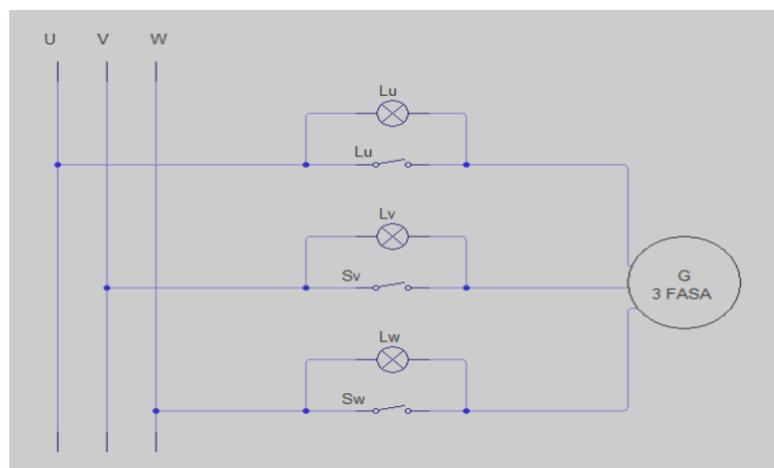
Karakteristik	Lokasi Pada PLTD Titi Kuning	
	Sisi 7 KV	Sisi 20 KV
Merek	WESTINGHOUSE	WESTINGHOUSE
Type	151D-48G11	230 GC 500
Nomor Serial	5	2-36Y5173
Date	1975	1975
Medium	Air	Oil
Rated Voltage	7,5 KV	25,8 KV
Rated Current	1200 A	1200 A
Sc.Breaking Cap	33 KV	500 MVA at 25,8 KV;Max 15 KA
Sc.Time	5 CYCLE	-
B.I.L	95 KV	150 KV
Frekuensi	50 HZ	50 Hz
Weight	-	2600 Kg
Made In	USA	USA
Jumlah	6 Buah	2 Buah

### 3.3.5 Instalasi Teknis Untuk Memparalelkan Generator

Dalam prakteknya pemparalelan generator dilakukan dengan bantuan rangkaian untuk menjaga generator agar tetap paralel dengan sistem setelah beroperasi.



Gambar 3. 1 Rangkaian Pengontrolan Generator



Gambar 3. 2 Skema Kerja Sebuah Sinkroskop Lampu Gelap

Generator G akan dihubungkan parallel pada jaringan U-V-W. pada setiap fasa dipasang lampu L antara 1 dan titik nomor 2 dari saklar S, bilamana antara kedua titik itu masih terdapat perbedaan tegangan, lampu L masih menyala. Generator G dan sistem tegangan jaringan U-V-W telah sinkron, maka perbedaan tegangan antara titik 1 dan 2 adalah nol, dan ketiga lampu L tidak menyala. Pada saat inilah saklar S ditutup. Dengan menggunakan vektor seperti gambar hal tersebut sistem tegangan jaringan U1-V1-W1 dan sistem tegangan generator U2-V2-W2, kedua sistem tidak sephas.

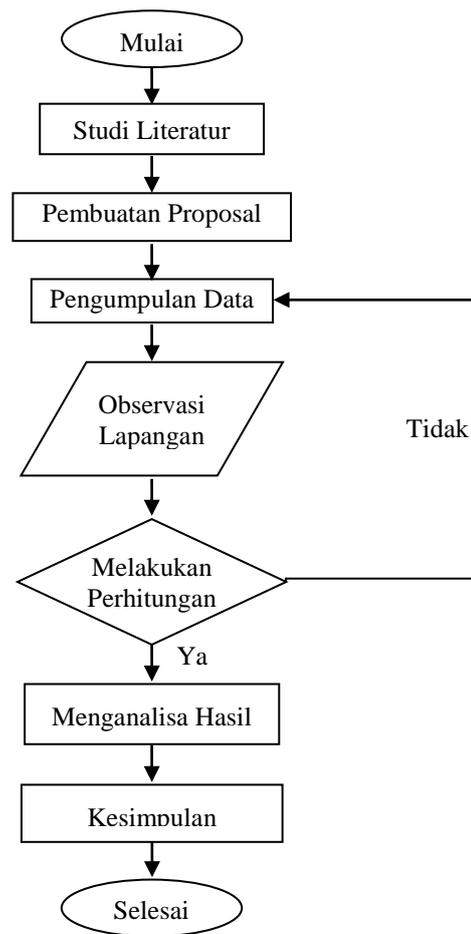
Pada lampu Lu terdapat selisih tegangan U1 dan U2, pada lampu Lv terdapat selisih tegangan V1 dan V2, dan pada lampu Lw terdapat selisih tegangan W1 dan W2, dengan demikian ketiga lampu masih menyala.

Pada Gambar 3.2 memperlihatkan situasi bahwa kedua sistem tegangan berada dalam kondisi sephas, dengan demikian  $U1 = U2$ ;  $V1 = V2$ ;  $W1 = W2$ , dengan kata lain tidak terdapat lagi selisih tegangan dan lampu-lampu Lu, Lv, dan Lw tidak menyala.

### **3.4 Jalannya Penelitian**

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis penelitian langsung yang digunakan untuk mengumpulkan data-data atau informasi yang dibutuhkan dengan cara meneliti langsung di PT. PLN (Persero) pembangkit listrik tenaga diesel Titi Kuning.

Maka dari itu untuk lebih jelas lagi maka peneliti melampirkan diagram alir dibawah ini.

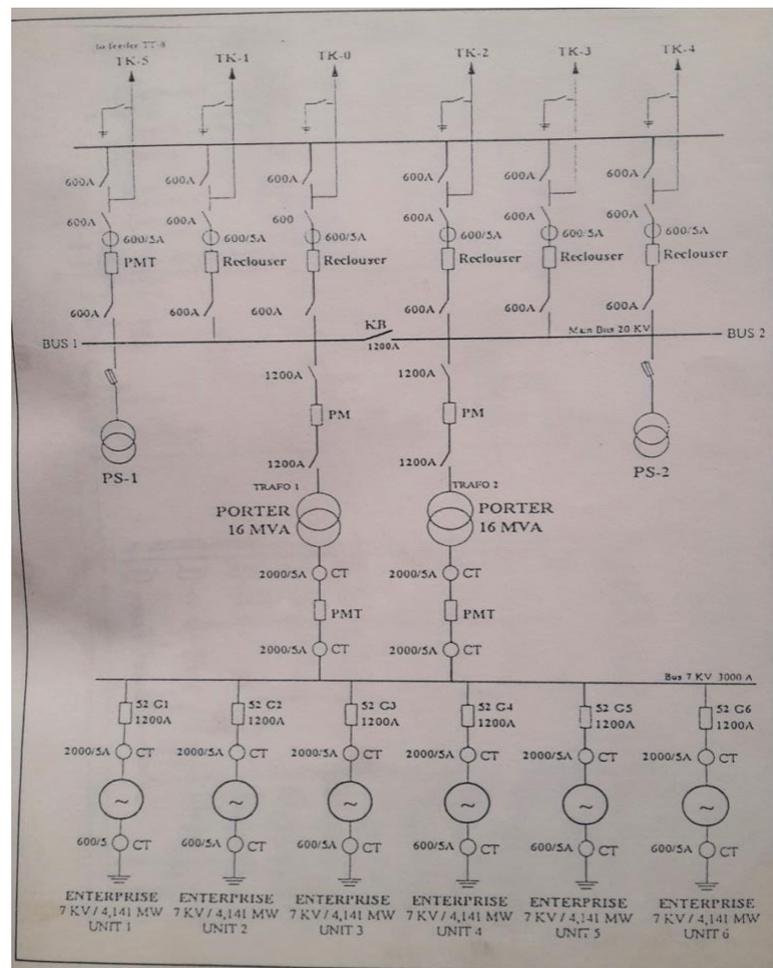


**Gambar 3. 3** Diagram Alir Penelitian

## BAB IV

### HASIL PEMBAHASAN

#### 4.1 Operasi Paralel Enam Generator



**Gambar 4. 1** Proses Paralel Generator Titi Kunig

Pada proses sinkronisasi generator yang berjumlah lebih dari dua generator (dalam hal ini terdiri dari enam generator) dengan kapasitas sama umumnya menggunakan metode sinkronoskop hubungan lampu gelap. Dalam hal ini, tegangan, frekuensi, dan sudut fasa generator harus disesuaikan dengan tegangan, frekuensi, dan sudut fasa pada sistem (jaringan interkoneksi). Namun ketika

generator yang telah diparalelkan tersebut bekerja pada sistem (melayani beban), maka untuk memparalelkan kembali generator yang lain (untuk penambahan rating daya pembangkit) dilakukan dengan cara yang sama dengan generator sebelumnya.

Proses yang dilakukan pada generator akan diuraikan pada proses sinkronisasi adalah sebagai berikut :

1. Start mesin diesel dan generator diputar dengan kecepatan konstan pada 429 rpm
2. Tegangan dan arus yang keluar dari output generator diukur dengan generator *voltage check* (potensial transformator) dan frekuensi *check*.
3. Setelah tegangan, arus, dan frekuensi diukur, hasil pengukuran akan ditampilkan di monitor alat meter yang terdapat pada panel kontrol
4. Pada pengaturan kecepatan, sebelum memparalelkan generator, kecepatan putaran telah diatur melalui ruangan kontrol dengan kontrol *speed* yang menyuplai governor dalam mengatur bahan bakar yang disuplai pada mesin diesel dan exciter dalam mengatur medan arus penguatan pada generator.
5. Setelah tegangan dan frekuensi generator sama dengan sistem, maka dengan bantuan sinkronoskop sudut fasa dapat disamakan dan generator dapat disinkronkan.

Pada saat memparalelkan generator, jumlah beban (beban aktif dan reaktif) yang dipikul oleh kelima generator sama dengan jumlah daya yang dihasilkan oleh kelima generator. Tegangan yang dihasilkan oleh generator diatur sama dengan sistem diluar sebelum diparalelkan ke sistem untuk melayani beban.

## 4.2 Operasi Paralel Generator Dengan Sistem

Operasi paralel PLTD dengan sistem dilakukan di bawah kendali pembangkitan sektor medan, saat jaringan PLN mengalami kekurangan suplai daya listrik atau pada saat beban puncak maka PLTD Titi Kuning di perintahkan untuk mengoperasikan beberapa generator sesuai dengan kekurangan daya yang dibutuhkan supaya tidak terjadi pemutusan beban.

Proses paralel ini dilakukan untuk menambah *rating* daya pada sistem jaringan PLN. Untuk dapat mensinkronkan generator pada sistem maka perlu dipenuhi syarat sebagai berikut :

1. Tegangan terminal dari generator yang akan dihubungkan dengan busbar 7 KV harus mencapai minimal 6500 Volt. Hal ini dapat diamati pada penunjukan voltmeter pada panel kontrol. Tegangan generator ini diatur melalui sistem *eksitasi* menggunakan tahanan asut (*Rheostat*) dengan presentase tahanan sampai 30 % dalam kecepatan konstan.
2. Frekuensi generator harus sama dengan frekuensi sistem (busbar). Frekuensi generator diatur melalui governor, untuk mengetahui bahwa frekuensi keduanya sama maka dapat diamati lewat *synchronoscope*.
3. Fasa dari generator dan fasa dari sistem harus sama pada saat generator di hubungkan. Jelasnya urutan fasa dari generator harus sama dengan urutan fasa dari sistem (busbar).

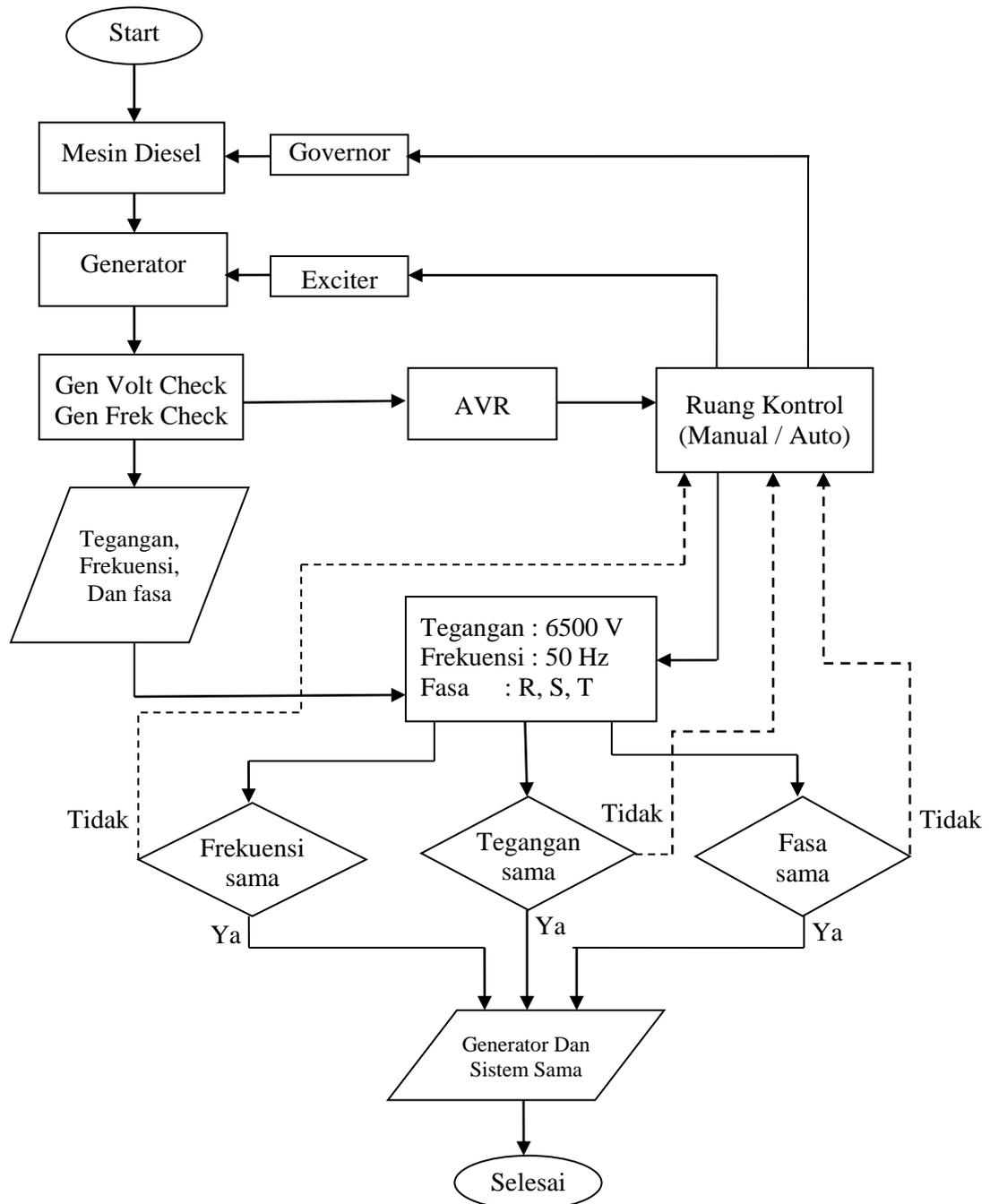
Dalam proses sinkronisasi antara generator dengan sistem interkoneksi (PLTD berfungsi sebagai *standby plant* atau sumber cadangan), sinkronisasi bertujuan hanya agar beban tetap terlayani sehingga tidak ada pemutusan beban

pada saat proses sinkronisasi. Sinkronisasi ini dilakukan dalam waktu yang lumayan lama ( $\pm 2$  menit) dan tidak bersifat kontinu.

Prosedur sinkronisasi generator bekerja paralel dengan jaringan (dapat dilihat pada gambar diagram blok dibawah) adalah sebagai berikut :

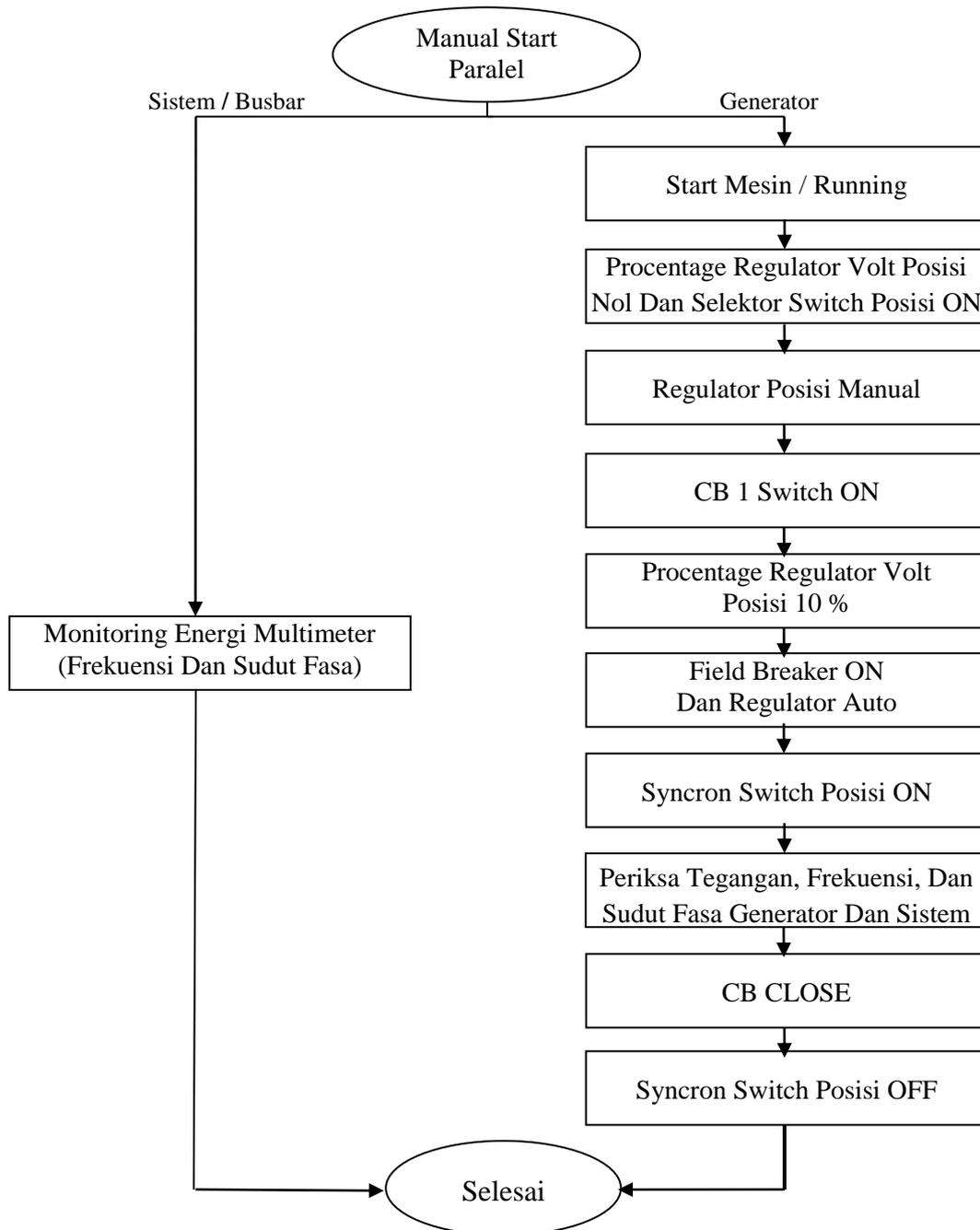
1. Setelah generator *running* dengan putaran 429 rpm selama 5 menit, tegangan & ferkuensi diukur dan hasilnya dikirim ke panel kontrol untuk dimonitoring.
2. Dengan mengukur dan mendeteksi tegangan dan frekuensi pada busbar sistem, maka pengaturan untuk parameter sinkronisasi ditentukan.
3. Setelah mendeteksi dan mengukur tegangan dari keluaran generator, hasil tersebut dibandingkan dengan standar nominal spesifikasi generator.
4. Apabila sinyal tegangan dan frekuensi generator tidak sesuai dengan spesifikasi mesin, maka di ruang kontrol akan di atur dengan mengatur *procentage regulator volt* dan *speed control* untuk menyuplai daya pada governor dan *exciter* untuk mengatur putaran dan tegangan keluaran generator sehingga didapat tegangan dan frekuensi yang diinginkan.
5. Setelah tegangan generator dan frekuensi sama dengan tegangan dan frekuensi sistem maka harus diperhitungkan lagi adalah membuat tegangan generator sefasa dengan tegangan bus pada sistem.
6. Dan untuk membuat tegangan generator sefasa dengan tegangan sistem maka putaran generator harus diubah sehingga tercapai beda fasa yang sama. Indikator dalam melihat kesamaan fasa tersebut digunakan *synchronoscope* dan hubungan lampu gelap.

7. Setelah lampu indikator mati dan jarum *synchronoscope* tegak lurus, maka generator telah sinkron dengan sistem dan siap untuk menutup *circuit breaker*.



**Gambar 4. 2** Flowchart Pengontrolan Untuk Memparalelkan Generator Ke Sistem

Pengoperasian untuk pamparalelan dan pembebanan setelah mesin dihidupkan sampai 5 menit. Diagram blok di bawah ini memperlihatkan urutan kerja dari pengoperasian untuk menjalankan secara paralel.



**Gambar 4. 3** Flowchart Pengoperasian Untuk Memparalelkan Generator

Sistem di jaringan luar selalu jadi referensi generator karena PLTD Titi Kuning hanya sebagai pembangkit cadangan dan dioperasikan saat beban puncak. Adapun petunjuk untuk pengoperasiannya adalah sebagai berikut :

1. Mesin dihidupkan dengan menarik tombol *Start* bersama dengan kran udara start dan mesin di *running* 5 sampai 10 menit kemudian menekan tombol *field flashing* 3 kali.
2. Mengatur *percentage regulator volt* (tahanan asut untuk mengatur arus pada *exciter*) pada posisi nol dan Voltmeter *selector switch* pada posisi ON
3. Memutar *selector switch regulator control* pada posisi manual
4. Mengatur *switch* CB 1 pada posisi ON
5. Memutar *percentage regulator volt* secara perlahan-lahan sampai posisi 10% sembari mengamati kenaikan tegangan *output* generator pada Voltmeter.
6. Setelah tegangan generator pada Voltmeter sudah menunjuk 6500 Volt, kemudian mengatur *field breaker* ke posisi ON dan meng-autokan *regulator control* dengan memutar *selektor switch* dan memutar kembali *percentage regulator volt* ke posisi 0%
7. Mengatur *syncron switch* pada posisi ON
8. Kemudian melakukan pengaturan parameter generator untuk menyamakan tegangan *running* dengan tegangan *incoming* (sistem luar) dengan *voltage control switch* dan mengatur frekuensi dengan *speed control switch*
9. Bila lampu pada *syncronoscope* padam dan jarum indikator pada posisi *counter* (posisi jam 12) memasukan *circuit breaker* pada posisi *close* kemudian mengatur kembali frekuensi dan menaikkan beban secara bertahap dengan mengatur keseimbangan perbandingan MW dan Mvar ( $\cos = 0,8$ ).

### 4.3 Perhitungan Pembagian Beban Pada Generator Setelah Paralel Dengan Sistem

Berikut merupakan contoh perhitungan pembagian pada generator di PLTD Titi Kuning.

**Tabel 4. 1** Data Yang Digunakan Adalah Data Dari Transformator Pada Tanggal 25 Juni 2018 Dari Pukul 19:00 s/d 21:00 WIB

Jam (WIB)	Frekuensi (Hz)	Daya			Tegangan (V)	Arus (A)	Power faktor
		KW	KVAR	KVA			
19.00	50,6	6.000	0,1	7.317	6.900	180	0,82
	50,6	6.000	3,0	7.317	6.900	179	0,82
20.00	50,3	7.100	2,4	8.765	7.000	200	0,81
	50,3	7.200	3,6	8.889	7.000	200	0,81
21.00	50,4	7.100	0,6	8.659	7.000	200	0,82
	50,4	7.200	3,2	8.780	7.000	202	0,82

Pada jam 19.00 WIB

$$P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} = (\sum I_{\text{beban}}) \cdot (\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi)$$

$$\sum I_{\text{beban}} = \frac{P_{\text{total}}}{(\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi)}$$

$$\begin{aligned} \sum I_{\text{beban}} &= \frac{P_{T1} + P_{T2}}{(\sqrt{3} \cdot V_G \cdot \cos \varphi)} \\ &= \frac{6000 + 6000}{(\sqrt{3} \times 6,9 \times 0,82)} \\ &= \frac{12.000 \text{ KW}}{9,56 \text{ KV}} \\ &= 1255 \text{ Ampere} \end{aligned}$$

Maka besar arus beban yang dipikul setiap generator adalah :

$$I_{\text{beban}} = \frac{\sum I_{\text{beban}}}{N_G}$$

$$= \frac{1255}{5}$$

$$= 251 \text{ Ampere}$$

Sehingga beban yang dipikul setiap generator adalah :

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I_{\text{beban}} \cdot \cos \varphi$$

$$= \sqrt{3} \times 9600 \times 251 \times 0,82$$

$$= 2,6 \text{ MW}$$

Pada jam 20.00 WIB

$$P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} = (\Sigma I_{\text{beban}}) \cdot (\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi)$$

$$\Sigma I_{\text{beban}} = \frac{P_{\text{total}}}{(\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi)}$$

$$\Sigma I_{\text{beban}} = \frac{P_{T1} + P_{T2}}{(\sqrt{3} \cdot V_G \cdot \cos \varphi)}$$

$$= \frac{7.100 + 7.200}{(\sqrt{3} \times 6,9 \times 0,81)}$$

$$= \frac{14.300 \text{ KW}}{9,82 \text{ KV}}$$

$$= 1.459 \text{ Ampere}$$

Maka besar arus beban yang dipikul setiap generator adalah :

$$I_{\text{beban}} = \frac{\Sigma I_{\text{beban}}}{N_G}$$

$$= \frac{1.459}{5}$$

$$= 291 \text{ Ampere}$$

Sehingga beban yang dipikul setiap generator adalah :

$$\begin{aligned}
 P &= \sqrt{3} \cdot V \cdot I_{\text{beban}} \cdot \text{Cos } \varphi \\
 &= \sqrt{3} \times 7000 \times 291 \times 0,81 \\
 &= 2,8 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Pada jam 21.00 WIB

$$P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} = (\Sigma I_{\text{beban}}) \cdot (\sqrt{3} \cdot V \cdot \text{Cos } \varphi)$$

$$\Sigma I_{\text{beban}} = \frac{P_{\text{total}}}{(\sqrt{3} \cdot V \cdot \text{Cos } \varphi)}$$

$$\Sigma I_{\text{beban}} = \frac{P_{T1} + P_{T2}}{(\sqrt{3} \cdot V_G \cdot \text{Cos } \varphi)}$$

$$= \frac{7.100 + 7.200}{(\sqrt{3} \times 7 \times 0,82)}$$

$$= \frac{14.300 \text{ KW}}{9,6 \text{ KV}}$$

$$= 1.490 \text{ Ampere}$$

Maka besar arus beban yang dipikul setiap generator adalah :

$$I_{\text{beban}} = \frac{\Sigma I_{\text{beban}}}{N_G}$$

$$= \frac{1.490}{5}$$

$$= 298 \text{ Ampere}$$

Sehingga beban yang dipikul setiap generator adalah :

$$\begin{aligned}
 P &= \sqrt{3} \cdot V \cdot I_{\text{beban}} \cdot \text{Cos } \varphi \\
 &= \sqrt{3} \times 7000 \times 291 \times 0,81 \\
 &= 3,0 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

**Tabel 4. 2** Data Hasil Perhitungan Pembagian Beban Generator Setelah Paralel Dari Jam 19.00 S/D 21.00 WIB

WAKTU (WIB)	BEBAN (MW)
19.00	2,6
20.00	2,8
21.00	3,0

#### 4.4 Perhitungan Daya Keluaran Generator Setelah Paralel Ke Sistem

Berikut merupakan perhitungan daya keluaran generator pada PLTD Titi Kuning dari tanggal 11 Juni 2018 sampai 06 Juli 2018.

$$P = \sqrt{3} \cdot V_{L-L} \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

Tanggal 11 juni 2018 (jam 19.00 WIB)

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6650 \times 290 \times 0,81 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6700 \times 280 \times 0,84 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 290 \times 0,80 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 290 \times 0,87 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} &= P_{\text{beban}} = P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,0 + 3,0 \\ &= 12,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 20.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6650 \times 290 \times 0,81 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6700 \times 280 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 275 \times 0,81 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 295 \times 0,84 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,0 + 3,0 \\ &= 12,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 21.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6650 \times 285 \times 0,81 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6750 \times 280 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6750 \times 275 \times 0,81 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 295 \times 0,84 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,0 + 3,0 \\ &= 12,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 22.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6650 \times 285 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6750 \times 280 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 275 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 295 \times 0,84 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,0 + 3,0 \\ &= 12,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 23.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6670 \times 280 \times 0,80 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6740 \times 280 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 260 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6920 \times 295 \times 0,84 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,0 + 3,0 \\ &= 12,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Tanggal 12 juni 2018 (jam 20.00 WIB)

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6570 \times 300 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6600 \times 260 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6840 \times 280 \times 0,84 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,0 \\ &= 9,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 20.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6660 \times 285 \times 0,80 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6700 \times 220 \times 0,80 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6670 \times 265 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6680 \times 280 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,0 + 3,0 \\ &= 12,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 21.00 WIB :

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6700 \times 220 \times 0,80 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6620 \times 220 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6850 \times 230 \times 0,81 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,0 + 3,0 + 3,0 \\ &= 9 \text{ MW} \end{aligned}$$

Tanggal 13 juni 2018 (jam 19.00 WIB)

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6650 \times 290 \times 0,80 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6720 \times 280 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6640 \times 265 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6890 \times 295 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,0 + 3,0 \\ &= 12,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 20.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6650 \times 290 \times 0,80 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6720 \times 280 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6640 \times 260 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6890 \times 295 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,0 + 3,0 \\ &= 12,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 21.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6650 \times 290 \times 0,80 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6720 \times 275 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6640 \times 240 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6890 \times 295 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,0 + 3,0 \\ &= 12,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 22.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6650 \times 290 \times 0,80 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6720 \times 275 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6640 \times 240 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 295 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} = P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6}$$

$$= 3,2+3,0+3,0+3,0$$

$$= 12,2 \text{ MW}$$

Tanggal 14 juni 2018 (jam 18.00 WIB)

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6720 \times 280 \times 0,81 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6800 \times 285 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6760 \times 260 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6920 \times 290 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} = P_{G2}+P_{G4}+P_{G5}+P_{G6}$$

$$= 3,2+3,0+3,2+3,0$$

$$= 12,4 \text{ MW}$$

Pada jam 19.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6720 \times 280 \times 0,81 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6800 \times 290 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6690 \times 285 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 305 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} = P_{G2}+P_{G4}+P_{G5}+P_{G6}$$

$$= 3,2+3,0+3,2+3,0$$

$$= 12,4 \text{ MW}$$

Pada jam 20.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6690 \times 290 \times 0,81 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 67500 \times 280 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6690 \times 280 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 300 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 12,4 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 21.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6800 \times 275 \times 0,81 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6750 \times 280 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6690 \times 260 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 300 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 12,4 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 22.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 250 \times 0,81 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6800 \times 250 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 250 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 290 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} = P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6}$$

$$= 3,2+3,0+3,2+3,0$$

$$= 12,4 \text{ MW}$$

Tanggal 15 juni 2018 (jam 19.00 WIB)

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 300 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6700 \times 270 \times 0,80 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6750 \times 275 \times 0,81 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 265 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 300 \times 0,84 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} = P_{G2} + P_{G3} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6}$$

$$= 3,2+2,8+3,0+3,0+3,0$$

$$= 15 \text{ MW}$$

Pada jam 20.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 300 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6700 \times 270 \times 0,80 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6750 \times 275 \times 0,81 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 265 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 300 \times 0,84 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} = P_{G2} + P_{G3} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6}$$

$$= 3,2+2,8+3,0+3,0+3,0$$

$$= 15 \text{ MW}$$

Tanggal 18 juni 2018 (jam 12.00 WIB)

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6810 \times 280 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

Pada jam 13.00 WIB :

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6850 \times 270 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Pada jam 14.00 WIB :

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6810 \times 285 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Pada jam 15.00 WIB :

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6810 \times 290 \times 0,81 = 3,0 \text{ MW}$$

Pada jam 16.00 WIB :

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6800 \times 305 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Pada jam 17.00 WIB :

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6800 \times 300 \times 0,81 = 3,0 \text{ MW}$$

Pada jam 18.00 WIB :

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6800 \times 300 \times 0,81 = 3,0 \text{ MW}$$

Pada jam 19.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 290 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6750 \times 280 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 280 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 320 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} &= P_{\text{beban}} = P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \end{aligned}$$

$$= 12,4 \text{ MW}$$

Pada jam 20.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 290 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6750 \times 260 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 280 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 320 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 12,4 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 21.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 290 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6750 \times 240 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 270 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 320 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 12,4 \text{ MW} \end{aligned}$$

Tanggal 19 juni 2018 (jam 19.00 WIB)

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6600 \times 300 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6700 \times 285 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6620 \times 270 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6890 \times 285 \times 0,81 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 12,4 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 20.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6620 \times 290 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6710 \times 280 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6620 \times 270 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6890 \times 280 \times 0,81 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 12,4 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 21.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6630 \times 290 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6710 \times 275 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6640 \times 270 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 270 \times 0,81 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 12,4 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 22.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6650 \times 285 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6750 \times 270 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6650 \times 270 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 290 \times 0,81 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 12,4 \text{ MW} \end{aligned}$$

Tanggal 20 juni 2018 (jam 19.00 WIB)

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6600 \times 300 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6700 \times 290 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6620 \times 260 \times 0,9 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,0 \\ &= 9,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 20.00 WIB :

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6700 \times 280 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6620 \times 270 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6850 \times 300 \times 0,81 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} = P_{G4} + P_{G5} + P_{G6}$$

$$= 3,2+3,0+3,0$$

$$= 9 \text{ MW}$$

Tanggal 21 juni 2018 (jam 19.00 WIB)

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 300 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6700 \times 260 \times 0,80 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 280 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} = P_{G2}+P_{G3}+P_{G5}$$

$$= 3,2+2,8+3,2$$

$$= 9,2 \text{ MW}$$

Pada jam 20.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 300 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6700 \times 260 \times 0,81 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 280 \times 0,81 = 3,2 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} = P_{G2}+P_{G3}+P_{G5}$$

$$= 3,2+2,8+3,2$$

$$= 9,2 \text{ MW}$$

Pada jam 21.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 300 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6700 \times 260 \times 0,81 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 280 \times 0,81 = 3,2 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G5} \\
 &= 3,2 + 2,8 + 3,2 \\
 &= 9,2 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Pada jam 22.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 280 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6700 \times 270 \times 0,83 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 270 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G5} \\
 &= 3,2 + 2,8 + 3,2 \\
 &= 9,2 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Pada jam 23.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 290 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6800 \times 270 \times 0,81 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 270 \times 0,81 = 3,2 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G5} \\
 &= 3,2 + 2,8 + 3,2 \\
 &= 9,2 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Tanggal 22 juni 2018 (jam 19.00 WIB)

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 240 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 290 \times 0,84 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6940 \times 280 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{total}} &= P_{\text{beban}} = P_{G2} + P_{G5} + P_{G6} \\
 &= 3,2 + 3,2 + 3,0 \\
 &= 9,4 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Pada jam 20.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 290 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 290 \times 0,84 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6940 \times 280 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{total}} &= P_{\text{beban}} = P_{G2} + P_{G5} + P_{G6} \\
 &= 3,2 + 3,2 + 3,0 \\
 &= 9,4 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Pada jam 21.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6750 \times 290 \times 0,84 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6750 \times 290 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6970 \times 300 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{total}} &= P_{\text{beban}} = P_{G2} + P_{G5} + P_{G6} \\
 &= 3,2 + 3,2 + 3,0 \\
 &= 9,4 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Pada jam 22.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6720 \times 280 \times 0,84 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6760 \times 250 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 7000 \times 290 \times 0,86 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G5} + P_{G6} \\
 &= 3,2 + 3,2 + 3,0 \\
 &= 9,4 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Tanggal 25 juni 2018 (jam 17.00 WIB)

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6600 \times 270 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

Pada jam 18.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 280 \times 0,84 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6800 \times 250 \times 0,85 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6800 \times 270 \times 0,86 = 3,2 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G5} \\
 &= 3,2 + 2,8 + 3,2 \\
 &= 9,2 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Pada jam 19.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6780 \times 280 \times 0,84 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6800 \times 250 \times 0,85 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6800 \times 270 \times 0,86 = 3,2 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G5} \\
 &= 3,2 + 2,8 + 3,2 \\
 &= 9,2 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Pada jam 20.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6780 \times 280 \times 0,84 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6800 \times 250 \times 0,85 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6800 \times 270 \times 0,86 = 3,2 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G5} \\ &= 3,2 + 2,8 + 3,2 \\ &= 9,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 21.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6750 \times 300 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6800 \times 250 \times 0,84 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6800 \times 300 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G5} \\ &= 3,2 + 2,8 + 3,2 \\ &= 9,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 22.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6750 \times 300 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6800 \times 250 \times 0,84 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6800 \times 300 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G5} \\ &= 3,2 + 2,8 + 3,2 \\ &= 9,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Tanggal 26 juni 2018 (jam 19.00 WIB)

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6600 \times 285 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6700 \times 270 \times 0,86 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6680 \times 310 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6850 \times 285 \times 0,87 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 12,4 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 20.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6600 \times 295 \times 0,84 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6700 \times 260 \times 0,86 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6650 \times 305 \times 0,84 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6890 \times 300 \times 0,84 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 12,4 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 21.00 WIB :

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6700 \times 260 \times 0,86 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6650 \times 260 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 305 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\
 &= 3,0 + 3,1 + 3,0 \\
 &= 9,1 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Tanggal 27 Juni 2018 (jam 19.00 WIB)

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6650 \times 200 \times 0,87 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6700 \times 270 \times 0,80 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 300 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G5} \\
 &= 3,2 + 2,8 + 3,2 \\
 &= 9,2 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Pada jam 20.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6650 \times 280 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6700 \times 270 \times 0,81 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 300 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G5} \\
 &= 3,2 + 2,8 + 3,2 \\
 &= 9,2 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Tanggal 28 Juni 2018 (jam 19.00 WIB)

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6670 \times 280 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6700 \times 270 \times 0,81 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 280 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6870 \times 280 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 2,8 + 3,2 + 3,0 \\ &= 12,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 20.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6670 \times 285 \times 0,84 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6700 \times 280 \times 0,80 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 280 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6870 \times 290 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 2,8 + 3,2 + 3,0 \\ &= 12,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Tanggal 30 Juni 2018 (jam 19.00 WIB)

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 290 \times 0,89 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6740 \times 250 \times 0,87 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 270 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 290 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \end{aligned}$$

$$= 12,4 \text{ MW}$$

Pada jam 20.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6680 \times 280 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6740 \times 250 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6670 \times 270 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 300 \times 0,81 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 12,4 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 21.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6690 \times 270 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6760 \times 260 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 260 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6910 \times 290 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 12,4 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 22.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6650 \times 285 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6820 \times 260 \times 0,84 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6720 \times 280 \times 0,84 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6950 \times 315 \times 0,81 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 12,4 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 23.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6750 \times 275 \times 0,84 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6840 \times 270 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6750 \times 280 \times 0,84 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6981 \times 300 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 12,4 \text{ MW} \end{aligned}$$

Tanggal 03 Juli 2018 (jam 12.00 WIB)

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 290 \times 0,89 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6700 \times 250 \times 0,87 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 260 \times 0,9 = 3,1 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6880 \times 300 \times 0,87 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 3,0 + 3,1 + 3,0 \\ &= 12,3 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 13.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 290 \times 0,87 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6700 \times 240 \times 0,86 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6700 \times 250 \times 0,84 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6700 \times 260 \times 0,87 = 3,1 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6900 \times 290 \times 0,86 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 2,8 + 3,0 + 3,1 + 3,0 \\ &= 15,1 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 14.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 290 \times 0,86 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6700 \times 270 \times 0,89 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6700 \times 260 \times 0,87 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6650 \times 260 \times 0,87 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6870 \times 290 \times 0,86 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 2,8 + 3,0 + 3,0 + 3,0 \\ &= 15 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 15.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 290 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6700 \times 250 \times 0,81 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6750 \times 250 \times 0,87 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6680 \times 250 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6890 \times 285 \times 0,86 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 2,8 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 15,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 16.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 290 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6700 \times 250 \times 0,84 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6750 \times 250 \times 0,87 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6680 \times 250 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6890 \times 285 \times 0,86 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 2,8 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 15,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 17.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6700 \times 250 \times 0,86 = 3,1 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6720 \times 250 \times 0,85 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6800 \times 250 \times 0,86 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6620 \times 270 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6830 \times 275 \times 0,84 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,1 + 2,8 + 3,0 + 3,0 + 3,0 \\ &= 14,9 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 18.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6750 \times 275 \times 0,87 = 3,1 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6760 \times 240 \times 0,86 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6820 \times 260 \times 0,85 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6750 \times 250 \times 0,82 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6850 \times 265 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,1 + 2,8 + 3,0 + 3,0 + 3,0 \\ &= 14,9 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 19.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6720 \times 280 \times 0,84 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6760 \times 270 \times 0,84 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6800 \times 270 \times 0,86 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6750 \times 280 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6850 \times 275 \times 0,85 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 2,8 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 15,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 20.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6750 \times 280 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6720 \times 250 \times 0,84 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6850 \times 260 \times 0,85 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6750 \times 250 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6950 \times 275 \times 0,86 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 2,8 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 15,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 21.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6750 \times 280 \times 0,86 = 3,1 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6770 \times 250 \times 0,86 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6820 \times 265 \times 0,85 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6750 \times 240 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6950 \times 265 \times 0,81 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,1 + 2,8 + 3,0 + 3,0 + 3,0 \\ &= 14,9 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 22.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6750 \times 275 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6770 \times 240 \times 0,84 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6820 \times 255 \times 0,88 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6750 \times 240 \times 0,87 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6960 \times 275 \times 0,86 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 2,8 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 15,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 23.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6760 \times 280 \times 0,84 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6880 \times 240 \times 0,83 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6840 \times 250 \times 0,86 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6800 \times 250 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6960 \times 270 \times 0,84 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 2,8 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 15,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 24.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6760 \times 280 \times 0,84 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6800 \times 240 \times 0,83 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6850 \times 240 \times 0,86 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6800 \times 230 \times 0,85 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 6950 \times 260 \times 0,84 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 2,8 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 15,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Tanggal 03 Juli 2018 (jam 19.00 WIB)

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6800 \times 275 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6800 \times 265 \times 0,82 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6900 \times 270 \times 0,84 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6850 \times 260 \times 0,85 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 7000 \times 300 \times 0,85 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 2,8 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 15,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 20.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6800 \times 275 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6800 \times 270 \times 0,82 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6900 \times 270 \times 0,84 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6850 \times 270 \times 0,82 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 7000 \times 265 \times 0,86 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 2,8 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \end{aligned}$$

$$= 15,2 \text{ MW}$$

Pada jam 21.00 WIB :

$$P_{G2} = \sqrt{3} \times 6800 \times 280 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G3} = \sqrt{3} \times 6800 \times 265 \times 0,84 = 2,8 \text{ MW}$$

$$P_{G4} = \sqrt{3} \times 6900 \times 280 \times 0,83 = 3,0 \text{ MW}$$

$$P_{G5} = \sqrt{3} \times 6850 \times 260 \times 0,83 = 3,2 \text{ MW}$$

$$P_{G6} = \sqrt{3} \times 7000 \times 265 \times 0,86 = 3,0 \text{ MW}$$

Sehingga daya aktif yang dikeluarkan adalah :

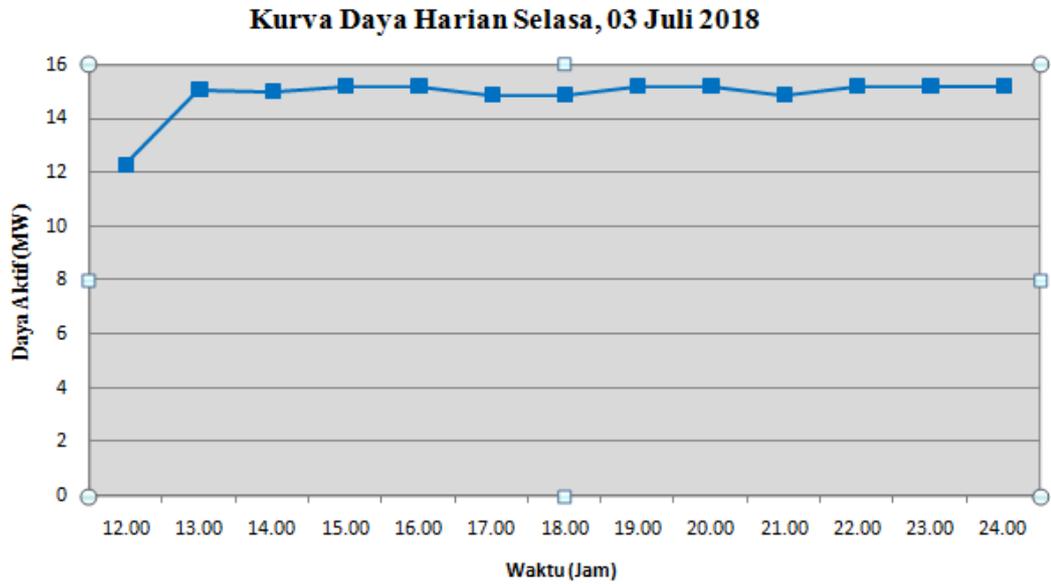
$$\begin{aligned} P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} &= P_{G2} + P_{G3} + P_{G4} + P_{G5} + P_{G6} \\ &= 3,2 + 2,8 + 3,0 + 3,2 + 3,0 \\ &= 15,2 \text{ MW} \end{aligned}$$

**Tabel 4. 3** Data Perhitungan Daya Harian Generator Jam 12.00 s/d 24.00 WIB

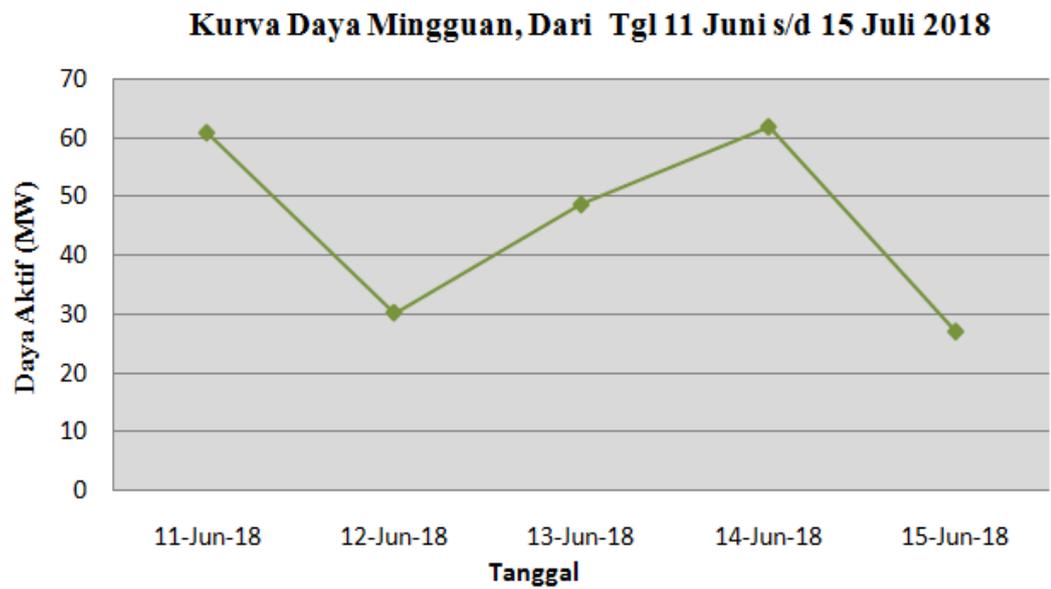
JAM (WIB)	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	24.00
Daya Aktif (MW)	12,3	15,1	15	15,2	15,2	14,9	14,9	15,2	15,2	14,9	15,2	15,2	15,2

**Tabel 4. 4** Data Perhitungan Daya Generator Tanggal 11 Juni s/d 06 Juli 2018.

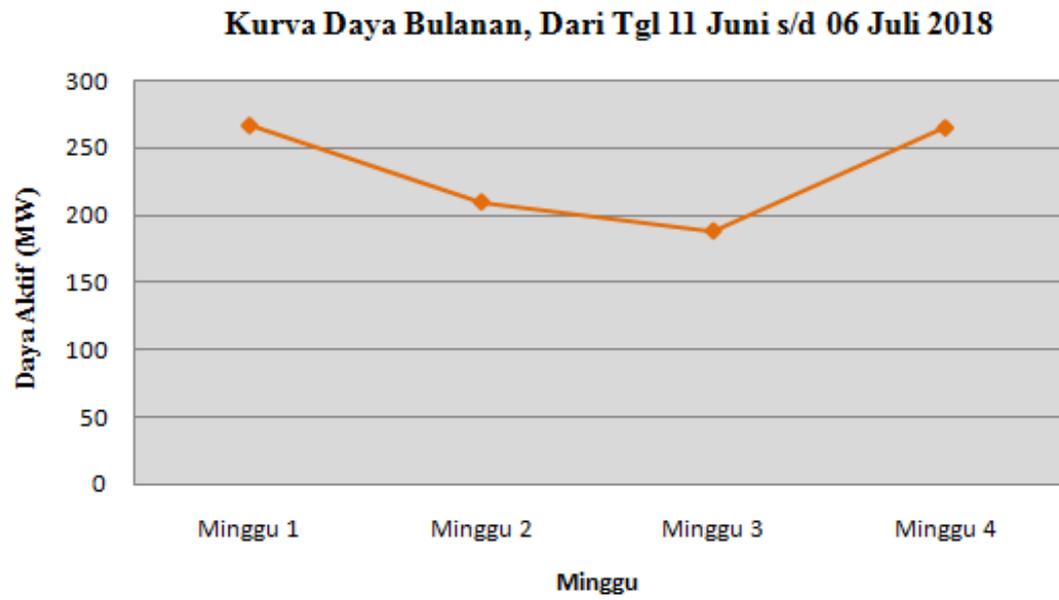
No.	Daya Aktif (MW)							
	Senin	Selasa	Rabu	Kamis	Jum'at	Sabtu	Minggu	Total
1	61	30,4	48,8	62	27,2	-	-	266,6
2	58,2	49,6	18,2	46	37,6	-	-	209,6
3	49,2	34	18,4	24,4	-	62	-	188
4	-	194,8	45,6	24,4	-	-	-	264,8



**Gambar 4. 4** Kurva Daya Harian PLTD Titi Kuning



**Gambar 4. 5** Kurva Daya Mingguan PLTD Titi Kuning



**Gambar 4. 6** Kurva Daya Bulanan PLTD Titi Kuning

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari teori, hasil pembahasan dan berdasarkan hasil analisis di atas dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Penyinkronan generator ke sistem (jaringan) dilakukan oleh operator secara manual dengan mengatur langsung parameter–parameternya keluaran generator berupa tegangan, frekuensi, dan sudut fasa. Mengatur tegangan *running* pada 6500 Volt dengan memutar *Procentage Control Voltage* secara perlahan sampai pada posisi 30% dan mengatur governor untuk menyamakan frekuensi generator dengan sistem, dan selanjutnya memasukkan DS secara manual.
2. Dari data hasil analisa yang dilakukan selama 3 jam operasi, pembagian beban setiap generator yang bekerja paralel mengalami peningkatan yakni pada jam 19.00 sebesar 2,6 MW setiap generator, pada jam 20.00 sebesar 2,8 MW, dan jam 21.00 sebesar 3,0 MW, disebabkan karena beban terjadi peningkatan yang diakibatkan konsumen yang menyalakan peralatan listrik yang bertambah yakni AC pada saat mau istirahat.
3. Dari analisa yang dilakukan, hasil daya perhitungan keluaran generator selama operasi menyuplai beban terlihat kurva beban selama sebulan, pertumbuhan beban (kedaan beban) pembangkit tidak konstan atau berubah – ubah setiap minggunya disebabkan kebutuhan energi pada konsumen yang berubah – ubah, beban puncak terjadi pada minggu pertama yaitu sebesar

266,6 MW. Karena pada saat minggu pertama terjadi gangguan pada pembangkit utama di belawan sehingga terjadi kekurangan daya pada jaringan yang mengakibatkan PLTD Titi Kuning beroperasi menyuplai daya maksimum.

## **5.2 Saran**

Pada penelitian selanjutnya, penulis menyarankan untuk melakukan penelitian dengan menganalisa gangguan pada generator atau pada saat operasi dengan sistem (jaringan).

## DAFTAR PUSTAKA

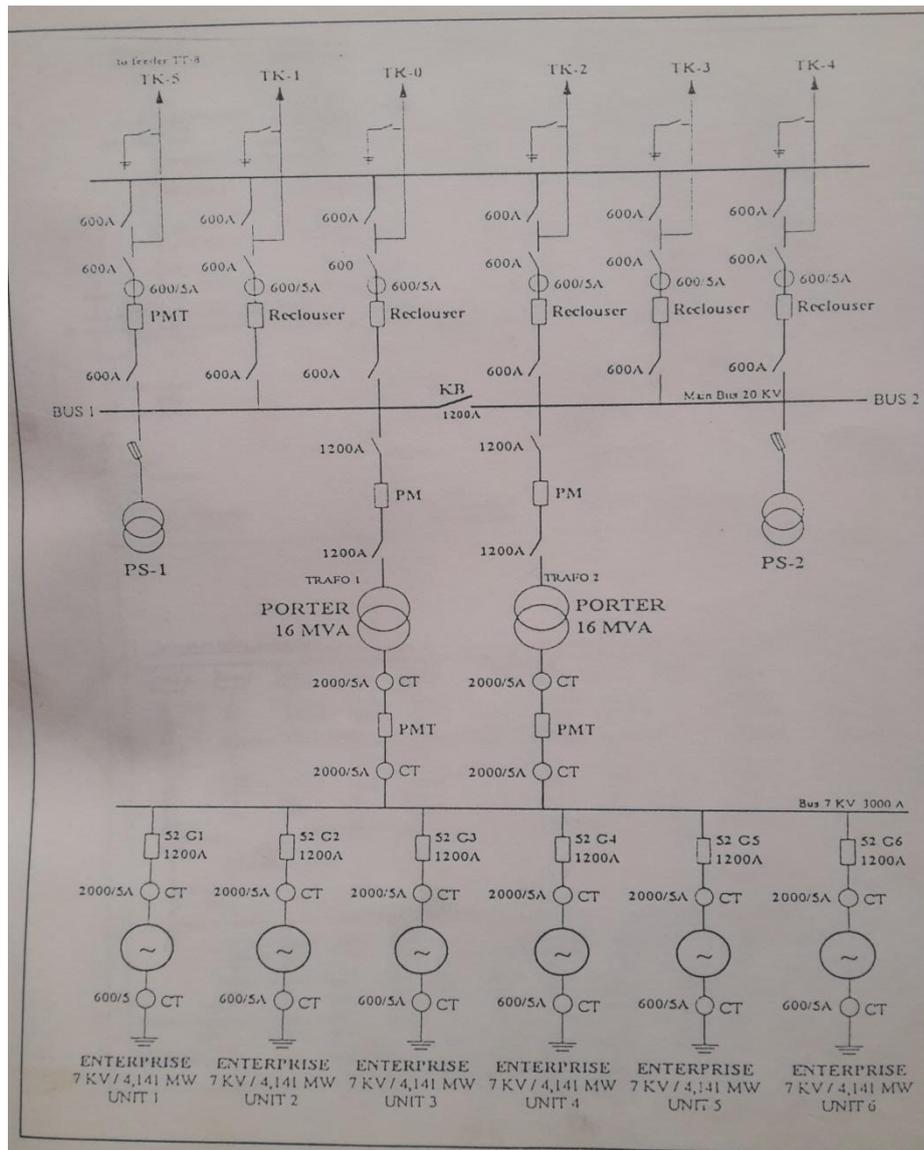
- Abdul Kadir. (1996). *Pembangkit Tenaga Listrik*. Jakarta: Universitas Indonesia-Press.
- Alam, Syahril, dan Taryana. (2015). *Pemodelan Dan Simulasi Automatic Voltage Regulator Untuk Generator Sinkron 3kV Berbasis Proportional Integral*. Vol.3, No.2. Juli 2015. Bandung: Institut Teknologi Nasional.
- Antono dan Khambali. (2013). *Penerapan Sinkronisasi Jaringan Listrik Tiga Fasa PLN Dengan Generator Sinkron Menggunakan Trainer Power System Simulation*. Vol.2, No.3. Desember 2013. Semarang: Politeknik Negeri Semarang.
- Amien. (2014). *Studi Pengaruh Arus Eksitasi Pada Generator Sinkron Yang Bekerja Paralel Terhadap Perubahan Faktor Daya*. Vol. 7, No.1. April 2014. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Arismunandar. (1982). *Teknik Tenaga Listrik Jilid II Saluran Transmis*. Jakarta: A. PT. Pradnya Paramita.
- Arozaq, Wibowo, dan Penangsang. (2012). *Analisis Pembebanan Ekonomis Pada Jaringan 500 Kv Jawa Bali Menggunakan Software Power World*. Vol. 1, No.1. September 2012. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Aryadi dan Amien. 2015. *Analisis Penentuan Tegangan Terminal, Regulasi, Dan Efisiensi Generator Sinkron 3 Fasa Rotor Salient Pole Dengan Metode Blondel (Two Reaction Theory)*. Vol. 13, No.36. Nopember 2015. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Gunawan et al. (1993). *Mesin Dan Rangkaian Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- Instruksi manual dari PLTD Titi Kuning dan GI Titi Kuning.
- Khatimah et al. (2014). *Analisis Pengaturan Tegangan Generator Sinkron Tiga Fasa Hubungan Bintang Akibat Pembebanan Tidak Seimbang*. Sinergi No.2, Tahun.12 Oktober 2014. Jakarta: Seminar Nasional.
- Laksono dan Febrianda. (2015). *Analisa Performansi Tanggapan Tegangan Sistem Eksitasi Generator Terhadap Perubahan Parameter*. Vol.4, No.1. Maret 2015. Padang: Universitas Andalas.

- Mitani et al. (2014). *PID-MPC Based Automatic Voltage Regulator Design In Wide-Area Interconnect Power System*. Vol.4, No.8. Agustus 2014. Jepang: Kyushu Institute Of Technology.
- Ridzki. (2013). *Analisis Perubahan Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Generator*. Vol.11, No.2. Oktober 2013. Malang: Politeknik Negeri Malang.
- Suheri dan Harahap. (2016). *Analisis Dan Simulasi Pengaturan Tegangan Generator Induksi Berpenguatan Sendiri Dengan Menggunakan Static Synchronous Compensator (STATCOM)*. Vol.14, No.40. Maret 2016. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Suyitno. (2011). *Pembangkit Energi Listrik*. Jakarta: PT. Rineka Cipta.
- Wijaya, Mochtar. (2001). *Dasar-Dasar Mesin Listrik*. Jakarta: Djambatan.
- Yulianto dan Laksono. (2013). *Evaluasi Pola Tingkah Laku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dengan Metoda Penempatan Kutub Menggunakan Algoritma Bass-Gura*. Vol.2, No.2. September 2013. Padang: Universitas Andalas.

# LAMPIRAN

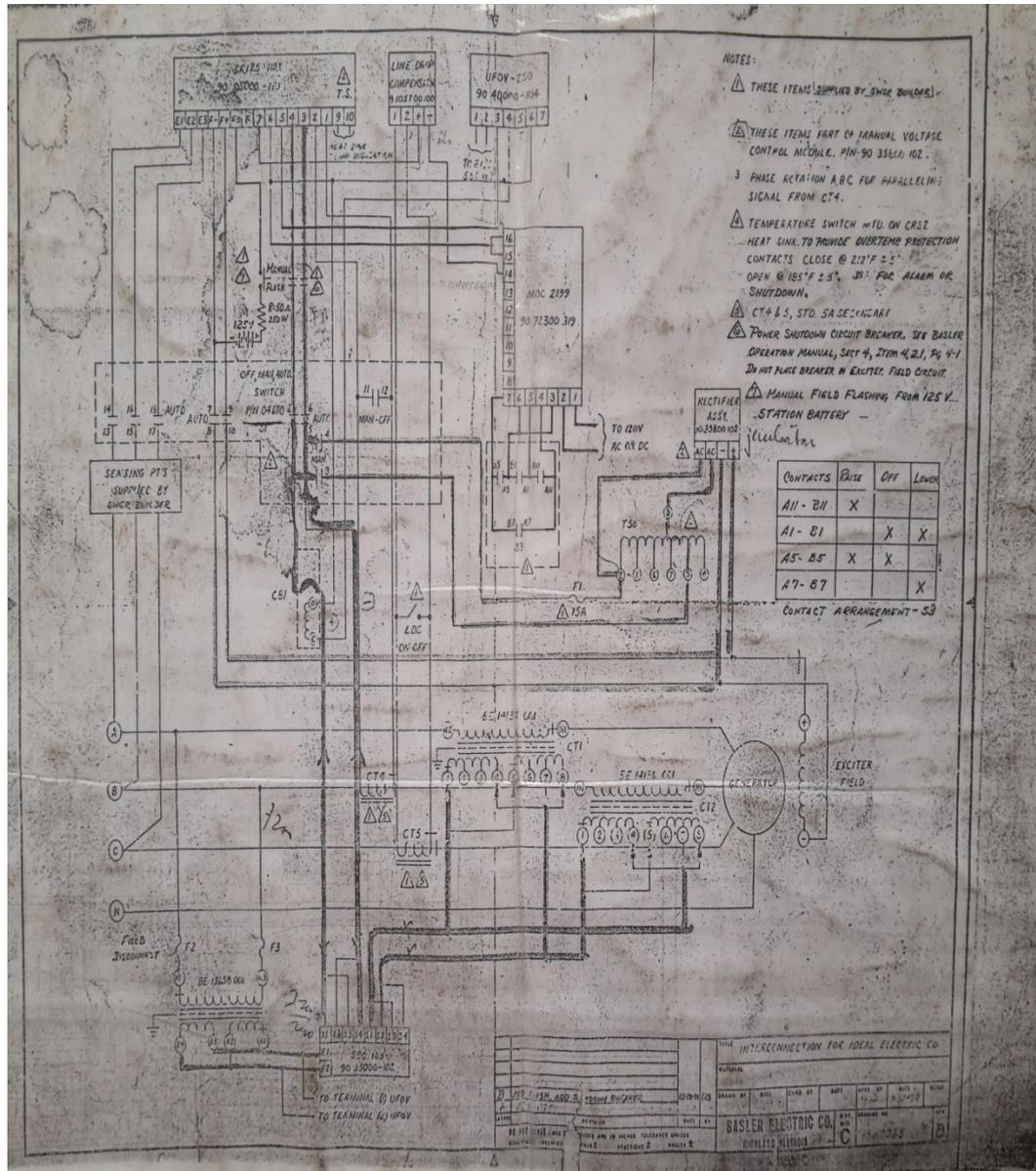
## Lampiran 1

### Diagram Satu Garis Pembangkit Litrik Titi Kuning



Lampiran 2

Diagram pengawatan untuk kerja paralel generator



### Lampiran 3

#### Dokumentasi PLTD Titi Kuning



GAMBAR GEDUNG PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA DIESEL TITI KUNING.



GAMBAR RADIATOR PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA DIESEL TITI KUNING.



GAMBAR TRANSFORMATOR DAYA (STEP UP) PEMBANGKIT LISTRIK  
TENAGA DIESEL TITI KUNING.



GAMBAR GENERATOR PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA DIESEL TITI  
KUNING



GAMBAR RUANG KONTROL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA DIESEL  
TITI KUNING .



GAMBAR TANGKI BAHAN BAKAR PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA  
DIESEL TITI KUNING.

## Lampiran 4

## Surat Permohonan Izin Riset


**MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PENELITIAN & PENGEMBANGAN**  
**UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA**  
**FAKULTAS TEKNIK**

Jalan Kapten Mochtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp. (061) 6622400 - EXT. 12  
 Website: <http://teknik.umsu.ac.id> E-mail: [teknik@umsu.ac.id](mailto:teknik@umsu.ac.id)

Bisa menjawab surat ini agar disebutkan nomor dan tanggalnya

Nomor : 814 / II.3-AU/UMSU-07/F/2018 Medan, 09 Sya'ban 1439 H  
 Lamp : 1 Lembar 26 April 2018 M  
 Hal : Izin Riset  
 Kepada :  
 Yth. Manager PT. PLN (Persero)  
 Sektor Pembangkitan Medan

Di :  
Tempat

Assalamu'alaikum Wr. Wb

Dengan hormat,  
Kami memohon kesediaan Bapak untuk menerima dan memberikan izin bagi Mahasiswa kami yang akan melakukan Pengujian di PT. PLN (Persero) Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Titi Kuning untuk penulisan Tugas Akhir, guna menyelesaikan program pendidikan Strata Satu (S-I) di Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Nama : Nurcholis Najib Sanubari  
 NPM : 1407220041  
 Semester : VIII (Delapan)  
 Jurusan : Teknik Elektro  
 Judul Tugas Akhir : Analisis Penggunaan Rangkaian Pengasut Manual Untuk Pemparalelan Generator Di PT. PLN (Persero) Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Titi Kuning

Pembimbing- I : Ir. Yusniati, M.T  
 Pembimbing- II : Ir. Zul Arsil Siregar

Adapun yang mau diujikan Sebagai Berikut :

1. Rangkaian untuk memparalelkan generator
2. Rangkaian metode paralel generator
3. Data bahan harian

Demikian harapan kami atas bantuan dan kerjasama yang Bapak /Ibu berikan kami ucapkan terima kasih.  
Wassalamu'alaikum Wr. Wb

  
 Dekan,  
**Munawar Alfansury Siregar, S.T.,M.T**  
 NIDN : 0101017202

Cc : File

## Lampiran 5

## Surat Balasan Izin Riset Di PT. PLN (Persero) PLTD Titi Kuning.


**PT PLN (Persero)**  
**PEMBANGKITAN SUMATERA BAGIAN UTARA**  
**SEKTOR PENGENDALIAN PEMBANGKITAN MEDAN**

Jalan Pembangkit Listrik No. 1 Paya Pasir Medan - Marelan 20255  
 Telepon : (061) 6850064, 6851958, 6841096      Facsimile : (061) 6853842

Nomor : 0026/STH.03.04/SMDN/2018      04 Mei 2018  
 Surat Sdr. No : 814/II.3-AU/UMSU-07/F/2018  
 Lampiran : 1 (satu) lembar  
 Sifat : Biasa  
 Perihal : Izin Praktik Kerja Lapangan

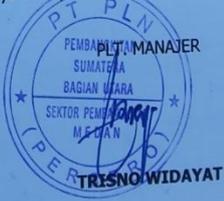
Kepada  
**Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara**  
 Jln. Kapten Muchtar Basri No.3 Medan

**u.p. Yth. Dekan,**  
 Menindaklanjuti surat saudara nomor : 8148/II.3-AU/UMSU-07/F/2018 tanggal 26 April 2018 perihal Izin Riset dengan ini disampaikan sebagai berikut :

- PT PLN (Persero) Sektor Pengendalian Pembangkitan Medan bersedia menerima mahasiswa dari Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Jurusan Teknik Elektro atas:
 

Nama : Nurcholish Najib Sanubari  
 NPM : 1407220041  
 Judul : Analisis Penggunaan Rangkaian Pengasut Manual Untuk Pemparalelan Generator Di PT PLN (Persero) Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Titi Kuning
- Pelaksanaan riset dimulai tanggal 25 Juni 2018 s.d 06 Juli 2018 di Pusat Listrik Titi Kuning.
- Selama melaksanakan riset mahasiswa dapat berkonsultasi/bimbingan dari Pusat Listrik Titi Kuning (Bapak Andyk Probo Prasetya).
- PT PLN (Persero) Sektor Pengendalian Pembangkitan Medan tidak menyediakan fasilitas apapun.
- Dalam melaksanakan riset mahasiswa diwajibkan memakai pakaian seragam (almamater) dan untuk praktek kerja dilapangan dianjurkan membawa pakaian ganti serta menggunakan sepatu safety.
- Untuk menghindari hal-hal yang tidak diinginkan dan untuk alasan keamanan, setiap mahasiswa wajib mematuhi peraturan yang berlaku atau terlebih dahulu meminta izin kepada pembimbing.
- Waktu pelaksanaan sesuai dengan jam dinas perusahaan (Senin s.d jumat jam 08.00 s.d 16.30 Wib).

Demikian disampaikan untuk diketahui, atas perhatiannya diucapkan terimakasih.



Tembusan :  
 - Pusat Listrik Titi Kuning

Model 1001

# ANALISIS SISTEM PEMBEBANAN PADA GENERATOR DI PT. PLN (PERSERO) PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA DIESEL TITI KUNING

**Yusniati, Zul Arsil Siregar, Nurcholis Najib Sanubari Matondang**  
Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara  
Jl. Kapt Mukhtar Basri No.3 Medan  
Email : [Cholis.najib@yahoo.co.id](mailto:Cholis.najib@yahoo.co.id)

## ABSTRAK

*Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Titi Kuning adalah salah satu unit pembangkit listrik PT.PLN (Persero) di sektor Medan yang digunakan sebagai pembangkit cadangan apabila terjadi peningkatan pada beban atau pada saat beban puncak pada PT.PLN (Persero). Jika terjadi peningkatan beban dan pembangkit – pembangkit lain tidak sanggup untuk memikulnya, maka PLTD Titi Kuning dioperasikan, untuk membuat PLTD bekerja sama dengan sistem maka dilakukan pamparalelan setiap generator ke sistem untuk menambah kapasitas daya sistem dan untuk menjaga keandalan sistem tersebut. Pamparalelan dilakukan secara manual dengan mengatur parameter- parameter keluaran generator berupa penyesuaian tegangan running pada 6500 Volt dengan memutar Procentage Voltage Regulator pada posisi 30 % dan penyesuaian frekuensi dengan sistem dengan mengatur speed control mesin diesel untuk penyesuaian masukan bahan bakar oleh governor, dan memasukkan Circuit Breaker secara manual jika posisi jarum sinkronoskop pada posisi counter dan lampu indikatornya gelap (mati). Setelah dilakukan analisa pembagian beban pada tiap generator terdapat selisih nilai perhitungan dengan nilai yang terbaca oleh alat ukur sebesar 3.2 %, nilai yang terbaca pada alat ukur sebesar 3.2 MW sedangkan hasil nilai perhitungan manual adalah 3.1 MW. Maka, untuk mendapatkan nilai akurasi alat ukur yang lebih tinggi harusnya digunakan alat ukur berupa digital.*

**Kata kunci** : pamparalelan, generator, pembebanan

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi saat ini memungkinkan semua bidang kehidupan manusia dapat semakin ringan dikerjakan dengan bantuan suatu peralatan. Demikian halnya dalam bidang kelistrikan. Dengan menggunakan suatu alat khusus, sistem kerja sebuah pembangkit dapat dengan mudah dikontrol oleh seorang operator. Sistem kerja yang dimaksud mencakup sistem pengaturan, sistem proteksi dan pembagian beban. Dalam sistem kerja suatu pembangkit umumnya, sistem pengaturan, sistem proteksi dan

pembagian beban bekerja secara terpisah. Sehingga dibutuhkan banyak tenaga manusia dalam pengoperasiannya.

Kebutuhan akan energi listrik pada saat ini sangat besar, bahkan sudah menjadi kebutuhan pokok bagi industri, masyarakat, maupun perkantoran. Salah satu kebutuhan energi yang besar saat ini adalah berbeda di wilayah sumatera, tepatnya di sumatera bagian utara.

Perkembangan teknologi saat ini yang membuat kebutuhan energi listrik melonjak sehingga harus dilakukan pemikiran untuk mencukupi kebutuhan yang makin lama kian bertambah, sehingga harus dilakukan

interkoneksi antara pembangkit–pembangkit di wilayah sumatera supaya mencukupi kebutuhan beban yang akan dilayani. Pada jaringan tenaga listrik, pusat pembangkit tenaga listrik membangkitkan daya listrik, kemudian daya listrik tersebut dikirim melalui jaringan transmisi dan didistribusikan ke berbagai macam beban listrik. Beban-beban listrik tersebut mengkonsumsi daya listrik selama daya listrik dibangkitkan oleh pembangkit.

Untuk mencukupi permintaan konsumen terhadap energi listrik yang dilayani tentu perlu penambahan daya pada jaringan dalam menjalankan tugasnya untuk menyediakan listrik bagi masyarakat, PLN mempunyai divisi Pusat Pengaturan dan Pengendalian Beban (P3B). Tugas utama dari P3B ini adalah menyesuaikan permintaan listrik dari luar dengan kapasitas pembangkit yang baru harus dioperasikan. Jika terjadi peningkatan kebutuhan listrik, maka P3B akan menghubungi perusahaan pembangkit listrik untuk menaikkan daya unit pembangkit yang sudah on line atau bahkan meminta unit pembangkit yang stand by untuk dioperasikan.

Dalam operasi sistem tenaga listrik, selain upaya untuk meminimalisir kegagalan sistem, faktor penting lainnya adalah menjaga suplai daya tetap terlayani. Sistem tenaga listrik mempunyai variasi beban yang sangat dinamis dimana setiap detik akan berubah-ubah, dengan adanya perubahan ini pasokan daya listrik tetap dan harus disuplai dengan besaran daya yang sesuai. Bila pada saat tertentu terjadi lonjakan atau penurunan beban yang tidak terduga, maka perubahan ini sudah dapat dikategorikan ke dalam gangguan pada sistem tenaga listrik yakni kondisi tidak seimbang antara pasokan listrik dan permintaan energi listrik akibat adanya gangguan baik pada pembangkit ataupun pada sistem transmisi sehingga mengakibatkan kerja dari pembangkit yang lain menjadi lebih berat.

## **II. TINJAUAN PUSTAKA**

### **2.1 Tinjauan Pustaka Relevan**

Generator induksi adalah generator yang memiliki prinsip dan konstruksinya sama

dengan motor induksi yang sudah umum digunakan, hanya saja dibutuhkan penggerak mula sehingga putaran rotor lebih besar dari pada putaran stator ( $n_r > n_s$ ) untuk membangkitkan tegangannya. Generator induksi lebih banyak digunakan pada daerah terpencil yang belum terjangkau listrik. Umumnya generator induksi digunakan untuk membangkitkan energi listrik berdaya kecil seperti pada pembangkit listrik tenaga angin dan mikrohidro. Dalam pengoperasian generator induksi memiliki masalah pada tegangan keluaran generator yang tidak konstan. Oleh sebab itu diperlukan adanya sebuah sistem kontrol untuk mengatur tegangan keluaran generator induksi. Dengan menggunakan pengontrolan, tegangan yang dihasilkan oleh generator induksi berpenguatan sendiri menjadi lebih halus tanpa adanya ripple dan lebih stabil (Suhendri : 2016). Menurut Syamsul Amien : Generator sinkron (alternator) merupakan mesin listrik yang merubah energi mekanis menjadi energi listrik melalui proses induksi elektomagnetik. Jika generator sinkron dibebani maka akan memberikan sifat yang berbeda sesuai dengan jenis beban yang dipikulnya, sehingga dalam pembebanan ini akan menentukan nilai faktor daya pada generator tersebut. Faktor daya mempunyai pengertian sebagai besaran yang menunjukkan seberapa efisien mesin yang dimiliki dalam menyalurkan daya yang bisa dimanfaatkan. Oleh sebab itu, dengan diaturnya arus penguat pada generator yang bekerja paralel maka akan mengatur daya reaktif yang dihasilkan pada generator tersebut sehingga dapat mengetahui perubahan faktor daya pada masing-masing generator. Dalam penelitian ini dilakukan pengaturan arus eksitasi pada masing-masing generator ‘spesifik terbatas’ (Amien ; 2014).

Menurut Laksono (2013) : Pengaturan eksitasi generator itu sangat penting karena dalam sistem tenaga listrik, pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi merupakan hal yang sangat penting untuk diperhatikan karena dapat mempengaruhi kestabilan tegangan sistem tenaga listrik. Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator yang kurang

memuaskan pada titik operasinya. Berdasarkan kondisi tersebut, dilakukan suatu studi dinamik mengenai pola tingkah laku tegangan pada sistem eksitasi generator dengan metoda penempatan. Dengan bantuan perangkat lunak diperoleh informasi, bahwa pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi generator menunjukkan performansi yang lebih baik dibandingkan performansi pola tingkah laku tegangan sistem eksitasi tanpa metoda penempatan kutub.

Dan pengaturan pada sistem pembangkit listrik itu sangat penting karena pada sistem pembangkit listrik perubahan beban dapat terjadi sewaktu-waktu seiring meningkatnya kebutuhan energi yang akibatnya beban yang dilayani oleh generator sinkron berubah-ubah yang dapat mempengaruhi tegangan dan daya keluaran dari generator sinkron tersebut. Sehingga menyebabkan perubahan tegangan terminal yang akan berpengaruh pada efisiensi serta keandalan suatu sistem. Adapun tulisan ini membahas tentang analisa penentuan tegangan terminal generator sinkron 3 fasa rotor salient pole, sebelumnya dilakukan perbaikan faktor daya untuk pembebanan induktif dan kapasitif kemudian dilakukan perhitungan regulasi tegangan dan efisiensi. Untuk merubah tegangan terminal agar tetap konstan dapat dilakukan dengan pengaturan tegangan induksi ( $E_a$ ) yang diakibatkan karena adanya perubahan arus beban ( $I_a$ ) yang mengalir pada tahanan jangkar ( $R_a$ ) dan reaktansi sinkron ( $X_s$ ) yang menyebabkan terjadi perubahan tegangan terminal. Untuk nilai pembebanan yang sama, semakin baik faktor daya dari beban yang dilayani oleh generator sinkron semakin baik regulasi yang dihasilkan. Hal ini disebabkan semakin baik faktor dayanya maka semakin kecil tegangan beban nol ( $E_f$ ), semakin besar tegangan yang diterima oleh beban ( $V_t$ ). Semakin baik faktor daya semakin baik pula efisiensi sedangkan rugi-rugi daya ( $P_{cl}$ ) dan arus beban ( $I_a$ ) akan semakin kecil (Selamat Aryadi : 2015).

Selanjutnya penelitian dilakukan oleh Khatimah (2014) tentang : Analisis pengaturan tegangan pada generator sinkron fasa-fasa akibat pembebanan yang tidak seimbang. Pada penelitian yang dilakukan khatimah, dengan

asumsi bahwa beda sudut fasa dari fasor-fasor arus fasa ( $I_{ph}$ ) adalah seimbang sementara besar atau magnitudenya tidak seimbang maka diperoleh bahwa perubahan pengaturan tegangan ( $\Delta V_R$ ) akan mengikuti pola perubahan arus fasa ( $\Delta I_{ph}$ ) pada beban seimbang. Hasil penelitian menunjukkan pula bahwa pada beban tidak seimbang, maka perubahan faktor ketidak-seimbangan ( $\Delta U_F$ ) mengikuti pola perubahan arus dalam salah satu fasa, sementara perubahan pengaturan tegangan mengikuti pola perubahan arus fasa yang bersangkutan. Menurut Terimananda, Hariyanto, dan Syahrial menyatakan bahwa Perubahan suatu beban akan mempengaruhi tegangan keluaran generator. Apabila beban naik maka tegangan keluaran generator turun dan apabila beban turun maka tegangan keluaran generator naik. Supaya tegangan keluaran generator tetap diperlukan suatu pengaturan tegangan keluaran generator. Pengaturan tegangan keluaran generator dilakukan dengan mengatur arus eksitasi generator. Sistem pengaturan arus eksitasi generator memakai *Automatic Voltage Regulator* (AVR). Tegangan keluaran disearahkan oleh semikonverter, kemudian dimasukkan ke kumparan medan AC-Exciter dan tegangan keluaran dari AC-Exciter disearahkan oleh diode penyearah dan diberikan ke kumparan medan generator utama (Terimananda, Hariyanto, dan Syahrial ; 2015).

Kebanyakan pusat pembangkit di Indonesia menggunakan generator sinkron tiga fasa didalam pengoperasiannya. Terbatasnya kemampuan sebuah generator untuk memenuhi kebutuhan beban, perlu adanya beberapa generator bekerja bersama dalam suatu sistem jaringan listrik baik dalam sistem interkoneksi atau sistem bus. Perbedaan kemampuan tiap generator menyebabkan kita harus melaukan proses sinkronisasi (penyamaan sistem) mulai dari frekuensi, tegangan, sudut fasa, hingga urutan fasa antara generator dengan sistem. Sinkronisasi adalah suatu cara untuk menghubungkan dua atau lebih generator dalam sistem yang sama untuk mencatu beban yang sama dengan arus bolak-balik (AC). Sumber AC tersebut adalah generator, yang akan digabungkan atau diparalel dengan tujuan

untuk meningkatkan energi atau kapasitas daya sistem tenaga listrik. Sinkronisasi sendiri dibagi menjadi tiga, yaitu : sinkronisasi gelap, sinkronisasi terang, dan sinkronisasi gelap-terang. Masing-masing memiliki karakteristik yang berbeda hanya pada jenis induktornya (M.Khambali : 2013).

Eksitasi adalah bagian dari sistem dari generator yang berfungsi membentuk/menghasilkan fluksi yang berubah terhadap waktu, sehingga dihasilkan gaya gerak listrik (GGL) induksi. Pengaruh perubahan eksitasi terhadap daya reaktif generator pada unit pembangkitan berkaitan dengan operasi pemaralelan generator sinkron dengan sistem daya, perubahan beban, dan perubahan tegangan. Tegangan cenderung konstan agar sinkronisasi terjaga dengan sistem (Imron : 2013).

## 2.2 Mesin Diesel

Mesin diesel termasuk mesin dengan pembakaran dalam atau disebut dengan motor bakar ditinjau dari cara memperoleh energi termalnya. Untuk membangkitkan listrik sebuah generator menggunakan generator dengan sistem penggerak tenaga diesel.

## 2.3 Governor

Governor adalah komponen pada mesin diesel yang dirancang untuk mengontrol volume penyemprotan bahan bakar berdasarkan beban mesin supaya kecepatannya tetap stabil.

## 2.4 Generator Sinkron

Generator adalah suatu mesin yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Hampir semua energi listrik dibangkitkan dengan menggunakan mesin sinkron. Generator sinkron (sering disebut *alternator*) adalah mesin sinkron yang digunakan untuk mengubah daya mekanik menjadi daya listrik. Generator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, yang sering dikenal dengan hukum Faraday yaitu ; *“Apabila jumlah garis gaya yang melalui kumparan diubah, maka gaya gerak listrik (GGL) akan diinduksikan dalam kumparan itu. Gaya gerak listrik (GGL) yang*

*diinduksikan berbanding lurus dengan laju perubahan jumlah garis gaya (fluks) yang melalui kumparan/konduktor”.*

## 2.5 Pemilihan Putaran

Putaran adalah salah satu faktor yang sangat penting untuk mempengaruhi besar tegangan (Voltage) dan frekuensi yang timbul pada arus bolak-balik (*Alternating Current*). Frekuensi listrik yang dihasilkan generator sinkron adalah sinkron dengan kecepatan putar generator. Rotor generator sinkron terdiri atas rangkaian elektromagnet dengan suplai arus DC. Medan magnet rotor bergerak pada arah putaran rotor. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada mesin dengan frekuensi listrik pada stator adalah:

$$f = \frac{n.P}{120}$$

Dimana :

- f = Frekuensi Listrik (Hz)
- n = Kecepatan Putar Rotor /Kecepatan Medan Magnet (rpm)
- p = Jumlah Kutub Magnet

## 2.6 Eksitasi Generator Sinkron

Pada eksitasi generator atau sistem penguatan adalah suatu perangkat yang memberikan arus penguat (If) ke kumparan medan generator arus bolak-balik (*Alternating Current*) yang dijalankan dengan cara membangkitkan medan magnetnya dengan mengalirkan arus searah pada kumparan medannya.

## 2.7 Automatic Voltage Regulator (AVR)

*Automatic Voltage Regulator* (AVR) adalah sebuah sistem kelistrikan yang berfungsi untuk menjaga agar tegangan generator tetap konstan setelah generator paralel dengan generator lain, sehingga generator akan tetap mengeluarkan tegangan yang selalu stabil, tidak terpengaruh terhadap perubahan beban yang selalu berubah-ubah.

## 2.8 Pengaturan Tegangan Generator

Pengaturan tegangan adalah perubahan tegangan terminal alternator antara keadaan

beban nol dengan beban penuh. Keadaan ini memberikan gambaran batasan drop tegangan yang terjadi pada generator.

### 2.9 Kerja Paralel Generator

Jika beban pada stasiun pembangkit menjadi sedemikian besar sehingga nilai (*rating*) generator yang sedang bekerja dilampaui, maka perlu penambahan generator lain secara paralel untuk meaikkan penyediaan daya dari stasiun pembangkit tersebut. Kita bisa mengatur sendiri faktor daya yang akan dioperasikan, namun pada umumnya yang lebih sering digunakan pada faktor daya 0,9. Perubahan faktor daya di generator PLTD tidak begitu mempengaruhi banyak meskipun ada. Hal tersebut diatas dapat dilihat dengan menggunakan rumus daya aktif :

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \phi$$

$$P_{total} = P_{beban} = P_{G1} + P_{G2} + \dots + P_{Gn}$$

Dimana :

- P<sub>total</sub> = Daya total (Watt)
- P<sub>Gn</sub> = Daya yang dihasilkan generator (Watt)
- V = Tegangan (Volt)
- I = Arus beban (Ampere)
- cos φ = Faktor daya generator

Apabila jumlah daya beban yang dilayani berkurang dan hal tersebut dapat kita hitung pada perolehan data beban harian untuk pemakaian generator pada lampiran dengan menggunakan persamaan berikut :

$$P_{total} = P_{beban} = \left( \sum I_{beban} \right) \cdot (\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \phi)$$

$$\sum I_{beban} = \frac{P_{beban}}{(\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \phi)}$$

$$I_G = \frac{\sum I_{beban}}{N_G}$$

Dimana :

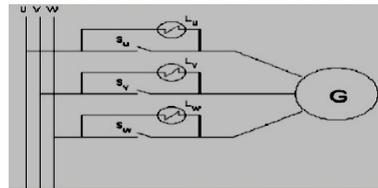
- P<sub>beban</sub> = Daya beban (Wt)
- I<sub>beban</sub> = Arus beban (A)
- V = Tegangan (V)
- cos φ = Faktor daya
- I<sub>G</sub> = Arus generator (A)
- N<sub>G</sub> = Jumlah generator yang beroperasi

### 2.10 Metode Pemparalelan Generator

Metode sederhana yang digunakan untuk memparalelkan dua generator atau lebih adalah dengan menggunakan sinkronoskop lampu. Yang harus diperhatikan dalam metode–metode ini adalah lampu–lampu indikator harus mampu menahan dua kali tegangan antar fasa.

#### Metode Hubungan Lampu Gelap

Jenis sinkronoskop lampu gelap pada prinsipnya menggunakan antara ketiga fasa yaitu, U dengan U, V dengan V, dan W dengan W.

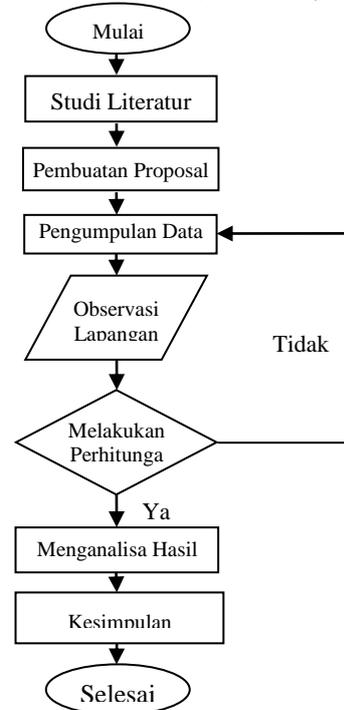


Gambar 2.1 Skema Sinkronoskop Lampu Gelap

### 2.11 Waktu Dan Tempat Penelitian

Adapun lokasi yang digunakan sebagai objek penelitian adalah pembangkit listrik tenaga diesel Titi Kuning. Jl. Brigjen Katamso km. 55 Medan–Johor dan dilaksanakan pada tanggal 25 Juni 2018 sampai dengan tanggal 06 Juli 2018.

### 2.12 Diagram Alir Penelitian (Flowchart)



Gambar 2.2 Diagram Alir Penelitian

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Perhitungan Pembagian Beban Pada Generator Setelah Paralel Dengan Sistem

Pada jam 19.00 WIB

$$P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} = (\sum I_{\text{beban}}) \cdot (\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi)$$

$$\sum I_{\text{beban}} = \frac{P_{\text{total}}}{(\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi)}$$

$$\begin{aligned} \sum I_{\text{beban}} &= \frac{P_{T1} + P_{T2}}{(\sqrt{3} \cdot V_G \cdot \cos \varphi)} \\ &= \frac{6000 + 6000}{(\sqrt{3} \times 6,9 \times 0,82)} \\ &= \frac{12.000 \text{ KW}}{9,56 \text{ KV}} \\ &= 1255 \text{ Ampere} \end{aligned}$$

Maka besar arus beban yang dipikul setiap generator adalah :

$$\begin{aligned} I_{\text{beban}} &= \frac{\sum I_{\text{beban}}}{N_G} \\ &= \frac{1255}{5} \\ &= 251 \text{ Ampere} \end{aligned}$$

Sehingga beban yang dipikul setiap generator adalah :

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3} \cdot V \cdot I_{\text{beban}} \cdot \cos \varphi \\ &= \sqrt{3} \times 9600 \times 251 \times 0,82 \\ &= 2,6 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 20.00 WIB

$$P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} = (\sum I_{\text{beban}}) \cdot (\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi)$$

$$\sum I_{\text{beban}} = \frac{P_{\text{total}}}{(\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi)}$$

$$\begin{aligned} \sum I_{\text{beban}} &= \frac{P_{T1} + P_{T2}}{(\sqrt{3} \cdot V_G \cdot \cos \varphi)} \\ &= \frac{7.100 + 7.200}{(\sqrt{3} \times 6,9 \times 0,81)} \\ &= \frac{14.300 \text{ KW}}{9,82 \text{ KV}} \\ &= 1.459 \text{ Ampere} \end{aligned}$$

Maka besar arus beban yang dipikul setiap generator adalah :

$$\begin{aligned} I_{\text{beban}} &= \frac{\sum I_{\text{beban}}}{N_G} \\ &= \frac{1.459}{5} \\ &= 291 \text{ Ampere} \end{aligned}$$

Sehingga beban yang dipikul setiap generator adalah :

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3} \cdot V \cdot I_{\text{beban}} \cdot \cos \varphi \\ &= \sqrt{3} \times 7000 \times 291 \times 0,81 \\ &= 2,8 \text{ MW} \end{aligned}$$

Pada jam 21.00 WIB

$$P_{\text{total}} = P_{\text{beban}} = (\sum I_{\text{beban}}) \cdot (\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi)$$

$$\sum I_{\text{beban}} = \frac{P_{\text{total}}}{(\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi)}$$

$$\begin{aligned} \sum I_{\text{beban}} &= \frac{P_{T1} + P_{T2}}{(\sqrt{3} \cdot V_G \cdot \cos \varphi)} \\ &= \frac{7.100 + 7.200}{(\sqrt{3} \times 7 \times 0,82)} \\ &= \frac{14.300 \text{ KW}}{9,6 \text{ KV}} \\ &= 1.490 \text{ Ampere} \end{aligned}$$

Maka besar arus beban yang dipikul setiap generator adalah :

$$\begin{aligned} I_{\text{beban}} &= \frac{\sum I_{\text{beban}}}{N_G} \\ &= \frac{1.490}{5} \\ &= 298 \text{ Ampere} \end{aligned}$$

Sehingga beban yang dipikul setiap generator adalah :

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3} \cdot V \cdot I_{\text{beban}} \cdot \cos \varphi \\ &= \sqrt{3} \times 7000 \times 291 \times 0,81 \\ &= 3,0 \text{ MW} \end{aligned}$$

**Table 3.1** Data Hasil Perhitungan Pembagian Beban Generator Setelah Paralel Dari Jam 19.00 S/D 21.00 WIB

WAKTU (WIB)	BEBAN (MW)
19.00	2,6
20.00	2,8
21.00	3,0

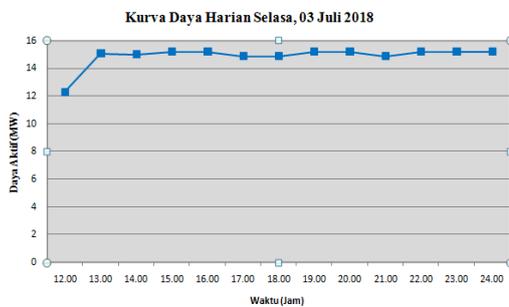
### 3.2 Perhitungan Daya Keluaran Generator Setelah Paralel Ke Sistem

**Tabel 3.2** Data Perhitungan Daya Harian Generator Jam 12.00 s/d 24.00 WIB

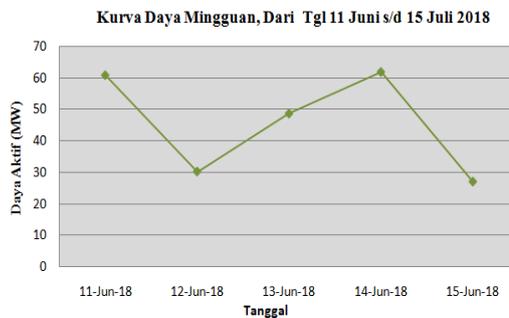
JAM (WIB)	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	24.00
Daya Aktif (MW)	12,3	15,1	15	15,2	15,2	14,9	14,9	15,2	15,2	14,9	15,2	15,2	15,2

**Tabel 3.2** Data Perhitungan Daya Generator tanggal 11 Juni s/d 06 Juli 2018.

No.	Daya Aktif (MW)							Total
	Senin	Selasa	Rabu	Kamis	Jum'at	Sabtu	Minggu	
1	61	30,4	48,8	62	27,2	-	-	266,6
2	58,2	49,6	18,2	46	37,6	-	-	209,6
3	49,2	34	18,4	24,4	-	62	-	188
4	-	194,8	45,6	24,4	-	-	-	264,8

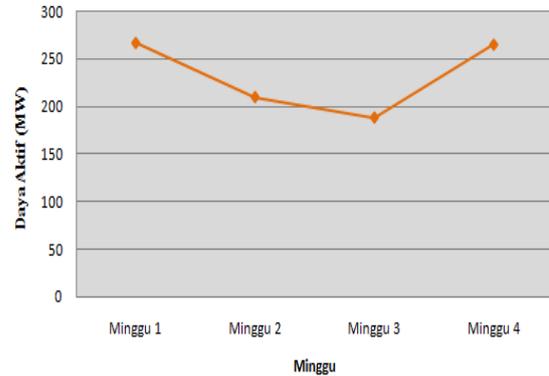


**Gambar 3.1** Kurva Daya Harian PLTD Titi Kuning



**Gambar 3.2** Kurva Daya Mingguan PLTD Titi Kuning

Kurva Daya Bulanan, Dari Tgl 11 Juni s/d 06 Juli 2018



**Gambar 3.3** Kurva Daya Bulanan PLTD Titi Kuning

## IV. KESIMPULAN

### Kesimpulan

1. Penyinkronan generator ke sistem (jaringan) dilakukan oleh operator secara manual dengan mengatur langsung parameter-parameternya keluaran generator berupa tegangan, frekuensi, dan sudut fasa. Mengatur tegangan running pada 6500 Volt dengan memutar Percentage Control Voltage secara perlahan sampai pada posisi 30% dan mengatur governor untuk menyamakan frekuensi generator dengan sistem, dan selanjutnya memasukkan DS secara manual.
2. Dari data hasil analisa yang dilakukan selama 3 jam operasi, pembagian beban setiap generator yang bekerja paralel mengalami peningkatan yakni pada jam 19.00 sebesar 2,6 MW setiap generator, pada jam 20.00 sebesar 2,8 MW, dan jam 21.00 sebesar 3,0 MW, disebabkan karena beban terjadi peningkatan yang diakibatkan konsumen yang menyalakan peralatan listrik yang bertambah yakni AC pada saat mau istirahat.
3. Dari analisa yang dilakukan, hasil daya perhitungan keluaran generator selama operasi menyuplai beban terlihat kurva beban selama sebulan, pertumbuhan beban (kadaan beban) pembangkit tidak konstan atau berubah – ubah setiap minggunya disebabkan kebutuhan energi pada konsumen yang berubah – ubah, beban puncak terjadi pada minggu pertama yaitu sebesar 266,6 MW. Karena pada saat minggu pertama terjadi gangguan pada pembangkit utama di belawan

sehingga terjadi kekurangan daya pada jaringan yang mengakibatkan PLTD Titi Kuning beroperasi menyuplai daya maksimum.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Kadir. (1996). *Pembangkit Tenaga Listrik*. Jakarta: Universitas Indonesia-Press.
- Alam, Syahril, dan Taryana. (2015). *Pemodelan Dan Simulasi Automatic Voltage Regulator Untuk Generator Sinkron 3kV Berbasis Proportional Integral*. Vol.3, No.2. Juli 2015. Bandung. Institut Teknologi Nasional.
- Antono dan Khambali. (2013). *Penerapan Sinkronisasi Jaringan Listrik Tiga Fasa PLN Dengan Generator Sinkron Menggunakan Trainer Power System Simulation*. Vol.2, No.3. Desember 2013. Semarang: Politeknik Negeri Semarang.
- Amien. (2014). *Studi Pengaruh Arus Eksitasi Pada Generator Sinkron Yang Bekerja Paralel Terhadap Perubahan Faktor Daya*. Vol. 7, No.1. April 2014. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Arismunandar. (1982). *Teknik Tenaga Listrik Jilid II Saluran Transmis*. Jakarta: A. PT. Pradnya Paramita.
- Arozaq, Wibowo, dan Penangsang. (2012). *Analisis Pembebanan Ekonomis Pada Jaringan 500 Kv Jawa Bali Menggunakan Software Power World*. Vol. 1, No.1. September 2012. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Aryadi dan Amien. 2015. *Analisis Penentuan Tegangan Terminal, Regulasi, Dan Efisiensi Generator Sinkron 3 Fasa Rotor Salient Pole Dengan Metode Blondel (Two Reaction Theory)*. Vol. 13, No.36. Nopember 2015. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Gunawan et al. (1993). *Mesin Dan Rangkaian Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- Instruksi manual dari PLTD Titi Kuning dan GI Titi Kuning.
- Khatimah et al. (2014). *Analisis Pengaturan Tegangan Generator Sinkron Tiga Fasa Hubungan Bintang Akibat Pembebanan Tidak Seimbang*. Sinergi No.2, Tahun.12 Oktober 2014. Jakarta: Seminar Nasional.
- Laksono dan Febrianda. (2015). *Analisa Performansi Tanggapan Tegangan Sistem Eksitasi Generator Terhadap Perubahan Parameter*. Vol.4, No.1. Maret 2015. Padang: Universitas Andalas.
- Mitani et al. (2014). *PID-MPC Based Automatic Voltage Regulator Design In Wide-Area Interconnect Power System*. Vol.4, No.8. Agustus 2014. Jepang: Kyushu Institute Of Technology.
- Ridzki. (2013). *Analisis Perubahan Eksitasi Terhadap Daya Reaktif Generator*. Vol.11, No.2. Oktober 2013. Malang: Politeknik Negeri Malang.
- Suheri dan Harahap. (2016). *Analisis Dan Simulasi Pengaturan Tegangan Generator Induksi Berpenguatan Sendiri Dengan Menggunakan Static Synchronous Compensator (STATCOM)*. Vol.14, No.40. Maret 2016. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Suyitno. (2011). *Pembangkit Energi Listrik*. Jakarta: PT. Rineka Cipta.
- Wijaya, Mochtar. (2001). *Dasar-Dasar Mesin Listrik*. Jakarta: Djambatan.
- Yulianto dan Laksono. (2013). *Evaluasi Pola Tingkah Laku Tegangan Sistem Eksitasi Generator Dengan Metoda Penempatan Kutub Menggunakan Algoritma Bass-Gura*. Vol.2, No.2. September 2013. Padang: Universitas Andalas.