

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Untuk membantu pembuatan Proyek Akhir ini, dibutuhkan adanya beberapa referensi yang dapat menjadi acuan dalam melakukan penelitian.

- 1. Supriyanto (2010)** Dalam tugas akhirnya yang berjudul **INSTALASI KELISTRIKAN PEMAKAIAN SENDIRI DI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP TANJUNG JATI B** membahas tentang sistem pemakaian sendiri berdasarkan tegangan yang dipakai. Keseluruhan sistem tersebut saling terkait untuk mendukung pengoperasian PLTU Tanjung Jati baik kondisi normal operasi maupun saat emergensi atau gangguan. Sistem kelistrikan pemakaian sendiri merupakan system yang sangat vital dalam menjaga pasokan listrik internal PLTU Tanjung Jati B agar tetap handal dan kontinu dengan berbagai sumber suplai beban.
- 2. Peneliti Fidauz Pratama (2016)** dengan judul **"Sistem Kelistrikan Pemakaian Sendiri PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS UAP Sengkang"** dimana dalam jurnal ini membahas tentang sistem kelistrikan pemakaian sendiri, komponen dari kelistrikan pemakaian sendiri pada pembangkit. Sistem pemakaian sendiri bisa di ambil langsung dari keluaran generator melalui panel tersendiri, kemudian dapat juga digunakan apabila terjadi gangguan besar dan semua unit trip, maka tidak tersedia tegangan untuk menjalankan alat-alat bantu dalam rangka start kembali. Dalam keadaan demikian diperlukan pengiriman atau supply tegangan dari luar pusat listrik

2.2. Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit listrik

Pembangkit listrik adalah suatu alat yang dapat membangkitkan dan memproduksi tegangan listrik dengan cara mengubah suatu energi tertentu menjadi energi listrik, selain itu pembangkit listrik bisa disebut juga

dengan semua mesin yang mengubah tenaga gerak, cahaya dan minyak bumi atau benda kimia lainnya menjadi tenaga listrik.

Beberapa contoh jenis pembangkit tenaga listrik yaitu PLTA, PLTU, PLTG, PLTN, PLTS, dan lainnya. Bagian utama dari pembangkit listrik ini adalah generator, yakni mesin berputar yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip medan magnet dan penghantar listrik. Mesin generator ini diaktifkan dengan menggunakan berbagai sumber energi sangat bermanfaat dalam suatu pembangkit listrik.

PLTP merupakan pembangkit listrik yang menggunakan tenaga dari panas bumi berupa uap sebagai sumber energinya (energi primer). Berbeda dengan pembangkit listrik termal lainnya, dimana energi panas yang digunakan memutar turbin adalah hasil dari proses pemanasan air oleh pembakaran bahan bakar fosil, pada PLTP uap yang digunakan untuk memutar turbin berasal dari perut bumi melalui sumur hasil pengeboran.

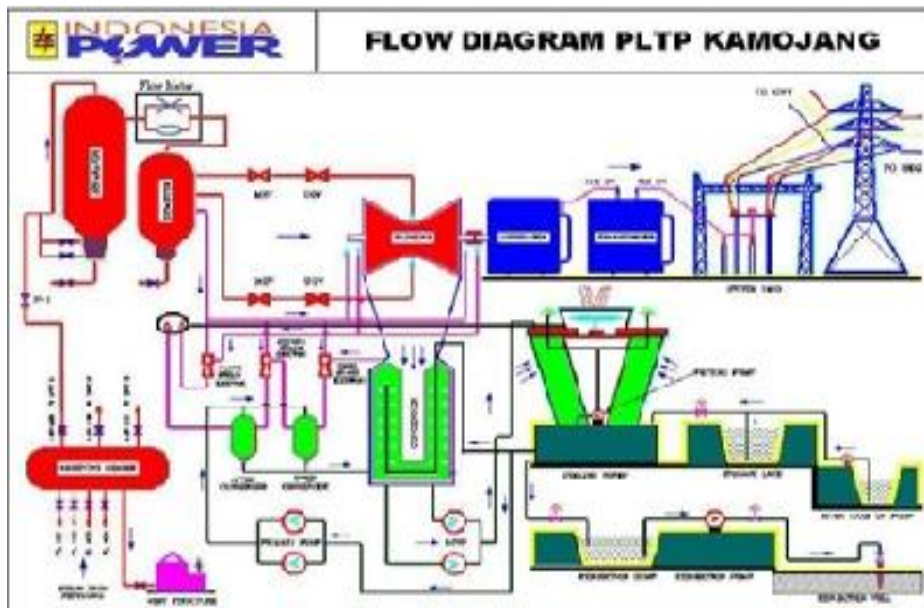
Uap panas bumi mempunyai spesifikasi tertentu dan berbeda-beda antara satu lokasi (daerah) dengan lokasi lainnya, tetapi pada umumnya tekanannya rendah (dibawah 30 bar) dan temperaturnya sedikit *superheat* atau bahkan jenuh. Oleh karena itu masalah utama dalam membangun PLTP adalah bagaimana mengubah energi panas bumi yang kandungan kalornya rendah menjadi energi listrik secara efisien.

Berdasarkan karakteristiknya, uap panas bumi untuk PLTP dibedakan menjadi dua yaitu :

1. PLTP dengan Instalasi *Vapor dominated* (uap lebih dominan)
2. PLTP dengan Instalasi *Hot water dominated* (air panas lebih dominan)

Perbedaan dalam menerapkan kedua jenis uap panas bumi sebagai sumber energi pada PLTP adalah pemasangan separator dan demister sebelum uap digunakan untuk memutar turbin. Karena tekanan uap panas bumi relatif rendah, maka turbin uap yang digunakan pada PLTP adalah turbin tekanan rendah satu silinder.

2.3 Sistem Pembangkitan Listrik Tenaga Panas Bumi UPJP Kamojang



Gambar 2.1 Flow Diagram PLTP Kamojang

Sistem Pembangkitan listrik tenaga panas bumi (PLTP) UPJP Kamojang memanfaatkan energi panas bumi sebagai energi utama untuk penggerak prime mover di pembangkitan. Energi panas bumi dipasok oleh Pertamina Geothermal Energi (PGE) Kamojang. Panas bumi tersebut dialirkan dari sumur produksi uap panas bumi melalui pipa atau *pipe line* antara lain PL 401, 402, 403 dan 404.

Energi panas bumi yang dimiliki oleh uap air pada dasarnya berasal dari magma dalam perut bumi yang bertemperatur lebih dari 1200 derajat celcius. Panas bumi dialirkan secara konduksi melalui lapisan batuan *impermeable* (tidak dapat mengalirkan air) yang disebut dengan *bedrock*. Diatas *bedrock* terdapat batuan *permeable* yang berfungsi sebagai *aquifer* yang berasal dari air hujan. Air panas itu cenderung bergerak naik ke permukaan bumi akibat perbedaan berat jenis. Pada saat itu air panas bergerak ke atas, tekanan hidrostatiknya turun dan terjadilah penguapan. Karena diatas *aquifer* terdapat batuan *impermeable* yang disebut *caprock*, maka terbentuklah sistem *vapor dominated reservoir*.

Energi panas bumi yang dihasilkan di Kamojang memiliki karakteristik uap yang dihasilkannya membawa sedikit fase liquid (air) sehingga mempermudah dalam proses pemisahan fase uap dan fase liquidnya untuk

kemudian memutar turbin yang dikopel dengan generator dalam proses pembangkitan energi listrik. Proses pembangkitan listrik bertenaga panas bumi yang ada pada PLTP UPJP Kamojang dimulai dari uap kering yang dialirkan oleh Pertamina Geothermal Energi (PGE) ke PLTP melalui *pipe line*. Uap dari keempat *pipe line* tersebut ditampung pada *receiving header* yaitu sejenis konservator dengan *vent structure* yang berfungsi untuk mengatur dan menyamakan tekanan uap sebelum dialirkan ke pembangkit. Hal tersebut dikarekankan pasokan dari sumur produksi uap kering berbeda-beda atau dapat juga disebabkan terjadinya perubahan pembebanan dari pembangkit.

Dari *receiving header* selanjutnya uap yang tekanannya telah seragam dialirkan melalui flow meter ke separator yang akan memisahkan partikel padat dalam uap yang terbawa dari sumur produksi dan kemudian dialirkan menuju demister yang memisahkan uap dari butir-butiran air. Uap air bertekanan tinggi dari demister dialirkan melalui katup-katup (*valves*) antara lain *main valve*, *electrical control* dan *governor* untuk memutar turbin yang dikopel dengan generator. Putaran pada turbin tersebut menyebabkan terjadinya tegangan yang diinduksi pada generator yang disebut induksi elektromagnetik dimana tegangan keluaran yang dihasilkan merupakan tegangan tiga fasa frekuensi 50 Hz sebesar 11,8 kV. Tegangan (*induced voltage*) yang dihasilkan pada generator akan dinaikan *level*nya dari 11,8 kV menjadi 150 kV dengan transformator *step up* untuk ditransmisikan dan di distribusikan ke beban dalam interkoneksi kelistrikan Jawa-Bali. Selain itu ada daya yang digunakan untuk pelistrikan pada kompleks PLTP dengan melalui *step down transformer* dari 11,8 kV menjadi 6,3 kV.

Exhaust steam dari turbin kemudian dialirkan ke kondensor, fungsinya yaitu untuk menjaga efisiensi turbin. Uap yang keluar dari turbin ke kondensor harus dalam keadaan vakum dengan tekanan sekitar 0,1 bar. Di dalam kondensor, *exhaust steam* akan mengalami kondensasi akibat dari proses termodinamika yaitu penyerapan panas uap oleh air pendingin yang diinjeksikan lewat *spray-nozzle*. Tidak semua uap *exhaust steam* yang dapat dikondensasi menjadi air. Untuk menjaga kevakuman kondensor maka gas-gas yang tidak dapat dikondensasikan akan dialirkan menuju *after-*

condensor oleh *steam ejector* dimana gas-gas tersebut akan mengalami kondensasi ulang atau *gas extraction* sebanyak dua kali yaitu *first-stage* dan *second-stage ejector*. Agar gas yang tidak terkondensasi dapat mengalir dari kondensor ke *after condenser*, maka tekanan *after-condensor* diatur lebih rendah dibanding dengan tekanan dalam kondensor. Gas yang dapat dikondensasikan menjadi cairan akan dialirkan kembali ke kondensor sementara gas-gas yang tidak dapat terkondensasi pada kedua *after-condensor*, misalnya H₂S, CO, dan CO₂ akan dibuang ke udara melalui *Hot Basin* pada bagian atas *Cooling Tower*. *Level* kondensat selalu dijaga dalam kondisi normal oleh dua buah *Main. Cooling Water Pump* (MCWP) lalu didinginkan dengan *cooling water* sebelum disirkulasikan kembali. Air pendingin yang dipompakan oleh MCWP dijatuhkan dari bagian atas menara pendingin (*Cooling Tower*). Menara pendingin berfungsi sebagai penukar kalor yang akan menyerap kalor dari uap panas (*exhaust steam*).

Pada menara pendingin, air yang dijatuhkan akan mengalami penurunan *temperature* dan tekanan ketika sampai dibawah, yang disebut sebagai *cold basin*. Air dalam *cold basin* akan dialirkan ke kondensor untuk menyerap panas *exhaust steam* dari turbin dan kelebihan diinjeksikan kembali ke dalam sumur yang tidak produktif diharapkan dapat berfungsi sebagai air pengisi atau penambah dalam *reservoir*, sedangkan sebagian lagi dipompakan oleh *primary pump* ke *intercondensor* dan *aftercondensor* untuk menyerap uap panas uap yang tidak terkondensasi.

Sistem pendingin di PLTP Kamojang merupakan sistem pendingin sirkulasi tertutup dari air hasil kondensasi uap, dimana kelebihan kondensat yang terjadi direinjeksi kedalam sumur *reinjeksi*. Prinsip penyerapan energi panas dari air yang disirkulasikan adalah dengan mengalirkan udara pendingin secara paksa dengan arah aliran tegak lurus menggunakan 5 *fan cooling tower*. Sistem sirkulasi ini menyebabkan pembangkitan listrik tenaga panas bumi menjadi lebih *effisien* ramah lingkungan karena minim pencemaran lingkungan, dan limbah udara yang dihasilkan tidak bersifat berbahaya bagi kesehatan manusia (*toxic*).

1. Sistem Pasokan Uap (Sumur Uap)

Produksi sumur uap yang dikelola oleh PT. Pertamina disalurkan ke unit pembangkit melalui *pipeline* dan peralatan tambangan seperti katup-katup (*valves*).

Katup-katup dapat berada dikepala sumur seperti *master valve*, *vertical discharge valve*, *orifice*, *bleed valve*, *cellar*, dan *repture valve*.

- a. *Master Valve* dan *service valve* dioperasikan pada posisi penuh (dibuka) bila unit beroperasi dan ditutup bila unit tidak beroperasi.
- b. *Orifice* berfungsi untuk membatasi tekanan dan jumlah uap, sesuai dengan kebutuhan.
- c. *Bleed Valve* berfungsi untuk pemanasan pipa sehingga tidak menimbulkan korosidan mencegah matinya sumur uap.
- d. *Repture Dice* berfungsi sebagai pengaman akhir dari kepala sumur bila terjadi kelebihan tekanan dalam pipa transmisi, karena sistem pelepasan uap tidak bekerja.
- e. *Vertical Discharge Valve*, berfungsi untuk membersihkan uap dari partikel-partikel dan kotoran-kotoran dari dalam sumur uap masuk unit pembangkit, hal ini dilakukan apabila sumur uap lama tidak beroperasi.
- f. *Cellar*, berfungsi untuk menahan berat peralatan dan sebagai tempat dimana katup kepala sumur dipasang setelah pengeboran selesai.
- g. Pipa transmisi, berfungsi untuk menyalurkan uap dari kepala sumur ke pembangkit. Untuk menghasilkan daya listrik sebesar 140 MW, maka secara keseluruhan diperlukan uap sebanyak 1024,19 ton/jam. Untuk mendapatkan uap sebanyak itu telah tersedia 25 buah sumur uap dengan total produksi uap 1453 ton/jam.
 - 1) Unit 1 : 30 MW = 244,19 ton/jam.
 - 2) Unit 2 dan 3 : $2 \times 55 \text{ MW} = 2 \times 390 = 780 \text{ ton/jam}$.

2. *Steam Receiving Header*

Alat ini berfungsi untuk menampung uap yang disalurkan dari sumur produksi. Tujuan uap ditampung terlebih dahulu agar pasokan uap tidak mengalami gangguan meskipun terjadi perubahan pasokan dari sumur produksi maupun terjadi perubahan pembebanan dari pembangkit.



Gambar 2.2 *Steam Receiving Header*

3. *Vent Structure*

Alat ini berfungsi untuk membuang kelebihan uap saat terjadi tekanan lebih di dalam *steam receiving header*. Kelebihan uap dibuang ke udara. Agar tidak mencemari lingkungan, dibagian bawahnya disekat dan bagian atasnya diberi tumpukan batu.



Gambar 2.3 *Vent Structure*

Alat ini juga dilengkapi dengan *nozzle diffuser* yang berguna untuk meredam getaran dan kebisingan yang ditimbulkan. Alat ini memiliki katup-katup yang bekerja dengan sistem *pneumatic*. Pengoperasian katup-katup ini dilakukan secara manual dari jarak jauh di ruang kontrol. Fungsi daripada *Vent Structure* yaitu untuk mengatur agar tekanan uap yang masuk ke turbin selalu konstan dan untuk mencegah terjadinya *sudden trip* apabila terjadi kelebihan tekanan, dimana uap berlebih akan dibuang melalui katup pengaman *Vent Structure*.

4. Separator

Separator berfungsi untuk membersihkan untuk menyaring uap dari partikel-partikel berat. Uap yang memutar turbin harus terbebas dari partikel lain selain uap itu sendiri. Separator yang digunakan adalah jenis “*cyclon*”, artinya aliran uap yang masuk ke separator akan berputar kemudian dengan pengaruh gaya sentrifugal partikel-partikel berat akan terlempar jatuh ke bawah, sementara uap yang sudah bersih akan mengalir ke demister (*mist eliminator*).



Gambar 2.4 Separator Unit 2 dan Unit 3

5. Demister



Gambar 2.5 Demister

Demister adalah sebuah peralatan berupa tabung berukuran 14,5 m³. Di dalam demister terdapat kisi-kisi dari baja yang berfungsi untuk mengeliminasi butir-butir air yang terbawa oleh uap dari sumur-sumur panas bumi. Demister berfungsi sebagai penyaring untuk mencegah terjadinya masalah dalam turbin, penyaringan ini sangat efektif dan efisien untuk mengurangi terjadinya *carry over* CL, SiO₂, Fe, Fe₂O₃, masuk kedalam turbin.

Beberapa alasan untuk mengurangi defisit dalam turbin penyaringan (*corrugated plate*) ini adalah sebagai berikut :

- a. Pada separator yang menggunakan sistem *cyclone centrifugal type*, pemisah antara uap dan air panas didasarkan pada perbedaan yang terjadi antara uap dan air panas didasarkan pada perbedaan yang terjadi dari gaya sentrifugal dan berat jenis antara air dan uap jenuh, akan tetapi pemisahan tersebut tidak dapat secara sempurna memisahkan moisture (uap lembab) dari uap jenuh tersebut.
- b. Dengan mempergunakan *corrugated plate* (penyaring) *moisture* dapat dipisahkan dengan uap jenuh sedemikian rupa sehingga kebasahan uap dapat diperkecil. Dengan cara ini pemisahan didasarkan dari perbedaan inersia antara air dan uap, dan juga didasarkan dari daya lekat permukaan basah dari *corrugated plate* tersebut. Di dalam demister ini kecepatan uap menurun sehingga di dapat efek pemisahan yang bertambah baik.

6. Katup Pengatur (*Governor Valve*)

Dua katup pengatur dipasang pada masing-masing pipa uap masuk kiri dan kanan dari turbin. Katup bekerja dengan sistem hidrolik yang diatur oleh pengatur governor turbin sebagai respon dari putaran turbin atau adanya perubahan beban. Sedangkan dalam keadaan darurat, katup-katup tersebut dapat segera menutup secara otomatis. Pada peralatan katup pengatur ini dilengkapi dengan suatu sistem untuk melakukan "*steam free test*", yakni suatu kegiatan menutup atau membuka katup yang dilakukan secara periodik, pada saat operasi dengan maksud agar tidak terjadi kemacetan pada katup. Pada saat unit trip dalam keadaan darurat, governor valve tertutup secara otomatis, katup ini juga dapat di buka dan di tutup secara manual pada katup sesuai keinginan kita. Steam free test ini dapat dioperasikan secara otomatis, pada saat steam free test dioperasikan dari pengatur saklar, *swing check valve* dan main stop valve akan tertutup secara berurutan setelah *governor valve* menutup, sehingga semua katup-katup tersebut atau berarti semua ECV dan MSV telah selesai di tes.

7. Katup Utama (MSV dan ECV)

Suplai uap yang menuju ke kedua *governor valve* terlebih dahulu melalui 2 buah *stop valve* (MSV dan ECV) yang terpasang berderetan, seperti telah dijelaskan di atas, katup-katup tersebut dioperasikan secara hidraulik, katup katup ini dapat di buka dan di tutup secara manual dengan saklar-saklar pada *Turbine Control Panel* (TCP) atau pada katup itu sendiri dengan cara memasukan handle dan memutar sesuai dengan keinginan kita. Katup tersebut akan bekerja secara otomatis yang akan menutup pada saat unit trip secara darurat.

Beberapa fungsi dari katup utama adalah:

- a. Mengisolasi uap dengan katup pengatur.
- b. Mengatur putaran turbin pada saat mulai dijalankan.
- c. Sebagai pengaman dalam keadaan darurat

8. Turbin

Alat ini berfungsi untuk mengubah energi panas yang terkandung dalam uap menjadi energi kinetik. Turbin yang pada PLTP Kamojang adalah jenis silinder tunggal dua aliran (*single cylinder double flow*) yang merupakan kombinasi dari turbin aksi (impuls) dan turbin reaksi. Kapasitas nominalnya adalah 55 kW dengan kecepatan putar 3000 rpm. Tekanan uap yang masuk sekitar 6,5 bar sedangkan tekanan uap yang keluar dari turbin adalah 0,1 bar dengan suhu uap masuk 161,80 °C.



Gambar 2.6 Turbin

9. Switch Yard

Switch yard adalah sekumpulan komponen yang tergabung menjadi suatu sistem yang berfungsi untuk menyambung ataupun memutus aliran listrik menuju saluran transmisi dan juga pada PLTP itu sendiri.



Gambar 2.7 *Switch Yard*

10. Sistem uap Bantu

Yang dimaksud dengan sistem uap disini adalah penyediaan uap untuk mengoperasikan alat penghampa gas (*Jet Gas Ejector*) dan sistem uap perapat (*Gland Steam System*). Alat penghampa gas berfungsi mengeluarkan gas-gas yang tidak terkondensasi yang berasal dari sumur-sumur panas bumi dan terakumulasi dalam kondensor pada mode operasi normal. Sedangkan sistem uap perapat adalah suatu sistem uap perapat pada ujung-ujung poros turbin, dimana disini terapat suatu alat untuk menghisap uap perapat dari udara. Uap bantu tersebut berasal dari salah satu pipa utama, dialirkan ke sistem penghampa gas dan sistem dari penghisap uap perapat udara.

11. Kondensor

Alat ini berfungsi untuk mengondensasikan uap dari turbin dengan kondisi hampa tekanan. Uap dari turbin akan masuk ke bagian atas kondensor, lalu uap tersebut di semprot dengan air pendingin sehingga terjadi kondensasi. Uap yang tidak terkondensasi akan dikeluarkan dari kondensor oleh ejector. Uap harus segera dikeluarkan untuk mempertahankan kondisi hampa tekanan di dalam kondensor menuju sistem ekstraksi gas.



Gambar 2.8 Kondensor



Gambar 2.9 Ejector First Stage

12. Main Cooling Water Pump

Alat ini berfungsi untuk memompa air hasil kondensasi menuju *cooling water*. Masing-masing unit memiliki dua buah pompa utama. MCWP disuplai oleh sistem 6,3 kV.



Gambar 2.10 Main Cooling Water Pump

13. *Cooling Tower*

Cooling tower (menara pendingin) adalah tempat untuk mendinginkan air hasil kondensasi untuk digunakan lagi sebagai penyempnot di kondensor. Air dari kondensor akan disalurkan ke dalam *hot water basin* yang terdapat di bagian atas. Bak tersebut dilengkapi dengan *nozzle* yang berfungsi memencarkan air menjadi butiran halus dan didinginkan dengan cara kontak langsung dengan udara pendingin. Setelah dingin, air turun karena gravitasi menuju *cool water basin* yang terdapat di bagian bawah.

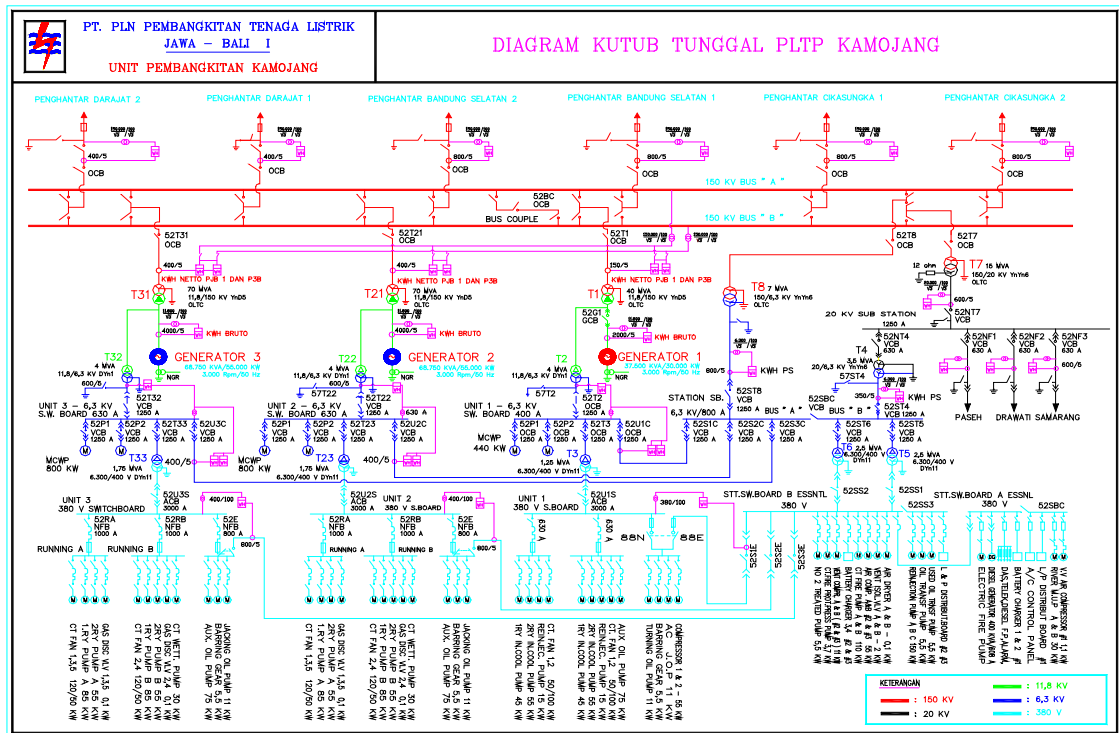
Kemudian, air di saring dari kotoran-kotoran lalu dialirkan ke kondensor untuk proses kondensasi. Konstruksinya terbuat dari kayu merah yang telah diawetkan dengan CDA (*cooper dichidromate arsenic*) sedangkan untuk *vent stock* terbuat dari PVC (*polyvinyl chloride*).

Cooling tower dilengkapi dengan kipas isap paksa yang berfungsi untuk membantu proses pendinginan air kondensat. Temperatur air yang masuk adalah 490°C kemudian diturunkan menjadi 270°C . Air hasil pendinginan dipakai untuk pendinginan uap bekas.



Gambar 2.11 *Cooling Tower* PLTP Kamojang

2.4 Single Line Diagram Sistem Tenaga Listrik PLTP Kamojang



Gambar 2.12 Single Line Diagram Sistem Tenaga Listrik PLTP kamojang

PLTP Kamojang terdiri dari 3 unit, yaitu unit 1 (30 MW), unit 2 (55 MW), dan unit 3 (55 MW). *Single line diagram* diatas mencakup ketiga unit di PLTP Kamojang, serta sistem 150 kV milik Area Pelayanan Jaringan (APJ) dan Unit Pelayanan Transmisi (UPT). Garis yang berwarna merah menunjukkan sistem 150 kV. Garis berwarna hitam menunjukkan sistem 20 kV. Garis yang berwarna hijau menunjukkan sistem 11,8 kV. Garis yang berwarna biru menunjukkan sistem 6,3 kV. Garis yang berwarna ungu menunjukkan sistem 380 V. Garis berwarna ungu merupakan kWH meter yang berguna untuk pencatatan niaga.

Sistem 150 kV merupakan sistem interkoneksi JAMALI (Jawa, Madura, Bali) dimana daya yang dihasilkan oleh pembangkit akan masuk ke sistem ini. Tidak dapat ditentukan beban atau konsumen mana yang akan merasakan suplai dari PLTP Kamojang karena nantinya suplai ke beban akan diatur oleh Pengatur Pusat Beban. Sistem 20 kV adalah sistem tegangan menengah yang akan disalurkan ke daerah di sekitar PLTP Kamojang seperti Paseh, Drawati, dan Samarang, sehingga dari sistem 150 kV langsung di

step-down ke tegangan 20 kV. Sistem 11,8 kV adalah tegangan yang dihasilkan dari generator. Level tegangan ini akan di *step up* menjadi 150 kV untuk kepentingan interkoneksi dan akan di *step down* menjadi 6,3 kV untuk pemakaian sendiri.

Sistem 6,3 kV merupakan sistem tegangan yang menjadi penyulang bagi motor-motor *Main cooling water pump* dan juga memberi suplai bagi sistem 380 V. Sistem 380 V berguna untuk menyuplai motor-motor lain seperti *oil pump, barping gear, auxiliary oil pump, fan, valve*. Pada generator di masing-masing unit terdapat kWH Bruto yang mengukur besar daya aktif yang dihasilkan generator sebelum dikurangi dengan daya aktif untuk dikonsumsi oleh kebutuhan internal pembangkit. Sedangkan kWH Netto mengukur besar daya aktif yang dihasilkan generator setelah dikurangi dengan daya aktif untuk dikonsumsi oleh kebutuhan internal pembangkit. Nilai kWH Netto diukur dari sisi sesudah tegangan di *step-up* oleh transformator.

Transformator yang digunakan terdiri dari tiga jenis perbandingan. Trafo yang pertama adalah transformator utama T1, T21, dan T31 yang berfungsi sebagai *step up* dari tegangan 11,8 kV ke 150 kV. Kemudian transformator tambahan T2, T22, dan T32 berfungsi sebagai trafo *step down* dari tegangan 11,8 kV ke 6,3 kV. Trafo terakhir transformator tambahan T3, T23, dan T33 yang berfungsi sebagai trafo *step down* dari 6,3 kV menjadi 400 V. Trafo ini berfungsi memberi suplai kepada kebutuhan-kebutuhan lain pembangkit. Ketika salah satu unit baru akan diaktifkan dari posisi berhenti, maka seluruh kebutuhan daya aktif *internal* pembangkit tidak diberikan dari generator unit tersebut. Daya aktif untuk *starting* mesin-mesin dari unit tersebut diambil dari unit lainnya. Ketika unit sudah beroperasi, maka kebutuhan daya akan dibebankan lagi ke generator di unit tersebut. Jika ketiga unit baru akan diaktifkan dari posisi berhenti, maka daya untuk *starting* mesin-mesin setiap unit akan diambil langsung dari jaringan seperti yang terlihat dari sisi kanan dari *single line diagram*. Jaringan di *step-down* oleh trafo T8 dari 150 kV menjadi 6,3 kV dan masuk ke rel 6,3 kV dari setiap unit.

2.4.1 Transformator

Mesin listrik statis yaitu trafo pada PLTP Kamojang berfungsi untuk merubah level tegangan dari tegangan yang diinduksikan oleh generator sebesar 11,8 kV menjadi 150 kV (*Transformer Step Up*) untuk ditransmisikan ke jaringan Jawa-Bali. Trafo ini memiliki *on load tap changer* untuk mengubah perbandingan lilitan saat terjadi penambahan beban. Kapasitas trafo utama adalah 70.000 kVA. Pada PLTP Kamojang juga terdapat transformator *step down* 6,3 kV yang digunakan untuk keperluan kompleks pembangkit ataupun pembangkitan.



Gambar 2.13 Main Transformator 11,8 kV /150 kV

2.4.2 Generator

Alat ini berfungsi untuk mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Generator sinkron yang digunakan memiliki spesifikasi 68.750 kVA, 55.000 kW, 3000 rpm, 50 Hz dengan 2 kutub 3 fasa. Tegangan keluaran yang dihasilkan 11,8 kV. Generator ini disuplai arus DC ke rotornya dengan *brushless exciter*. Generator terdiri dari dua kumparan utama, yaitu rotor dan stator. Kumparan rotor berfungsi untuk membangkitkan medan magnet setelah diberi arus penguat dari *main exciter*. Kumparan stator akan terinduksi tegangan dari kumparan rotor yang berputar. Sistem pendinginan pada generator digunakan udara yang disirkulasi oleh fan ke kumparan stator dan rotor. Udara yang dipakai untuk sistem pendingin mempunyai temperatur kurang lebih 430. Setelah udara tersebut didinginkan generator kemudian dialirkan ke radiator untuk didinginkan kembali, sebagai media pendinginnya adalah air.



Gambar 2.14 Generator

2.4.3 Stabilitas Tegangan Sistem tenaga Listrik

Stabilitas tegangan ialah kemampuan sistem tenaga untuk menjaga nilai tegangan pada batas operasi yang ditentukan di semua bus pada sistem tenaga, saat sistem mengalami kondisi tidak stabil ketika terjadi gangguan, perubahan beban dan perubahan kondisi pada sistem. Stabilitas tegangan terbagi menjadi dua, yaitu stabilitas tegangan akibat gangguan akibat gangguan yang kecil dan akibat gangguan yang luas. Stabilitas tegangan akibat gangguan kecil ini terjadi akibat gangguan yang kecil atau bersifat lokal, seperti perubahan kenaikan beban pada sistem. Sedangkan stabilitas akibat gangguan besar adalah kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan pada batas operasi yang ditentukan akibat terjadi gangguan yang bersifat luas seperti kesalahan sistem pelepasan generator atau kontingensi jaringan. Keadaan tersebut membuat sistem harus mendapatkan kembali kestabilannya.

Berdasarkan waktu kestabilan tegangan sistem akan kembali dalam waktu cepat atau lama tergantung dari jenis gangguannya. Klasifikasi stabilitas tegangan berdasarkan periode kestabilan dapat dibagi menjadi tiga macam, yaitu stabilitas tegangan jangka pendek adalah 0 sampai 10 detik, jangka menengah adalah antara 10 detik sampai 10 menit, sedangkan jangka panjang lebih dari 10 menit.

Kriteria yang menyatakan sistem tenaga memiliki kestabilan tegangan adalah pada kondisi operasi tertentu dalam sistem, tegangan di bus tertentu

akan mengalami kenaikan tegangan ketika disuntikan daya reaktif pada bus yang sama. Sedangkan, tegangan sistem tidak stabil yang paling tidak salah satu bus di sistem tenaga mengalami penurunan tegangan saat disuntikan daya reaktif pada bus yang sama. Dengan demikian maka sistem listrik memiliki hubungan yang sebanding antara daya reaktif (Q) dan tegangan (V) bus saat sistem memiliki kestabilan tegangan.

2.4.4 Motor Listrik

Motor listrik adalah alat untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Alat yang berfungsi sebaliknya, mengubah energi mekanik menjadi energi listrik disebut generator atau dinamo. Motor listrik dapat ditemukan pada peralatan rumah tangga seperti kipas angin, mesin cuci, pompa air dan penyedot debu. Pada motor listrik tenaga listrik diubah menjadi tenaga mekanik. Perubahan ini dilakukan dengan mengubah tenaga listrik menjadi magnet yang disebut sebagai elektro magnet. Sebagaimana kita ketahui bahwa kutub-kutub dari magnet yang senama akan tolak-menolak dan kutub-kutub tidak senama, tarik-menarik. Maka kita dapat memperoleh gerakan jika kita menempatkan sebuah magnet pada sebuah poros yang dapat berputar, dan magnet yang lain pada suatu kedudukan yang tetap. Motor listrik merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik.

Energi mekanik ini digunakan untuk, misalnya, memutar impeller pompa, fan atau blower, menggerakkan kompresor, mengangkat bahan. Prinsip kerja motor listrik Jika kawat yang membawa arus dibengkokkan menjadi sebuah lingkaran atau loop, maka kedua sisi loop, yaitu pada sudut kanan medan magnet, akan mendapatkan gaya pada arah yang berlawanan. Pasangan gaya menghasilkan tenaga putar atau torque untuk memutar kumparan. Motor-motor memiliki beberapa loop pada dinamonya untuk memberikan tenaga putaran yang lebih seragam dan medan magnetnya dihasilkan oleh susunan elektromagnetik yang disebut kumparan medan. Dalam memahami sebuah motor, penting untuk mengerti apa yang dimaksud dengan beban

motor. Beban mengacu kepada keluaran tenaga putar atau torque sesuai dengan kecepatan yang diperlukan.

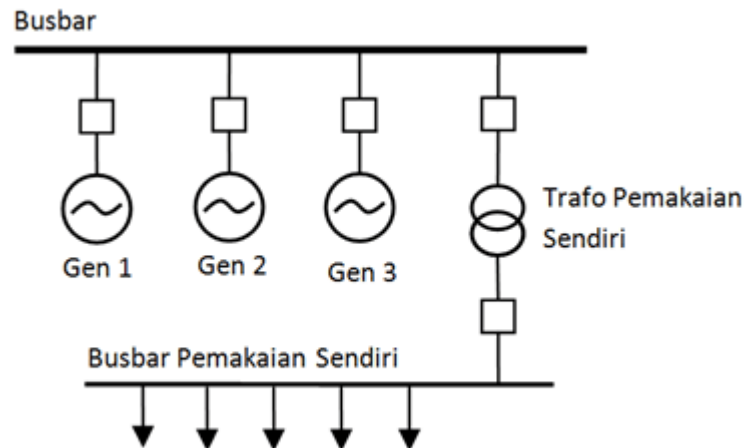
2.5 Sistem Kelistrikan Pemakaian Sendiri di Pusat Listrik Secara Umum

Pusat-pusat listrik selalu dilengkapi dengan sistem kelistrikan untuk pemakaian sendiri. Tenaga listrik yang dihasilkan tersebut digunakan untuk keperluan menjalankan peralatan antara lain :

1. Penerangan, peralatan *Air Conditioner* (AC), peralatan kantor, dan lain-lainnya baik yang ada di perkantoran maupun di pusat listrik.
2. Peralatan bantu unit pembangkit yang berupa motor-motor listrik untuk pompa-pompa, *valve*, kipas pendingin (*fan*).
3. Sistem kontrol, peralatan pengukuran (*instrument*), dan sistem telekomunikasi.
4. Pengisian suplai daya sumber arus searah (DC) yang berupa Baterai Aki dan *Uninterruptible Power Supply* (UPS).

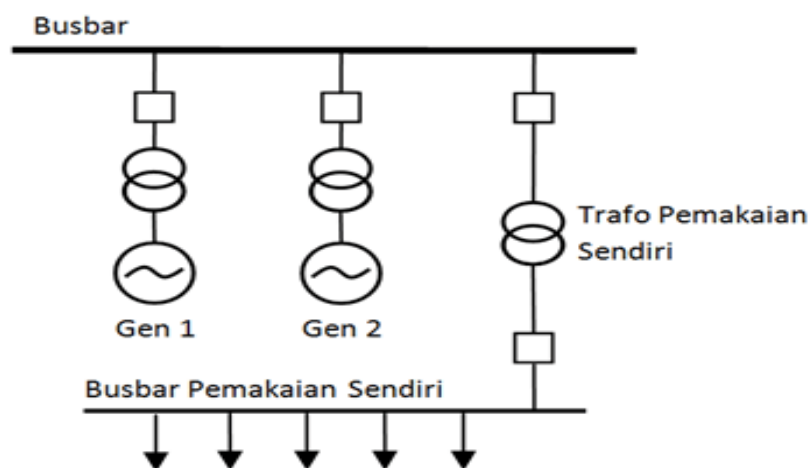
Tenaga listrik yang diperlukan pada pusat listrik adalah listrik AC dan listrik DC. Pada pusat listrik dengan kapasitas yang besar, listrik AC yang diperlukan adalah listrik AC tegangan rendah dan tegangan menengah, dengan besar tegangan yang disesuaikan dengan peralatan-peralatannya, sedang listrik DC yang digunakan biasanya adalah tegangan 110 volt DC dan 220 volt DC.

Listrik AC dapat disuplai dari transformator tenaga untuk pemakaian sendiri, sedangkan listrik DC-nya dari sistem baterai yang dilengkapi dengan *inverter* yang berfungsi untuk menyearahkan listrik AC ke listrik DC untuk pengisian baterai. Ada beberapa macam sistem kelistrikan pemakaian sendiri pada pusat listrik, bergantung dari kapasitasnya dan sistem tenaga listriknya.



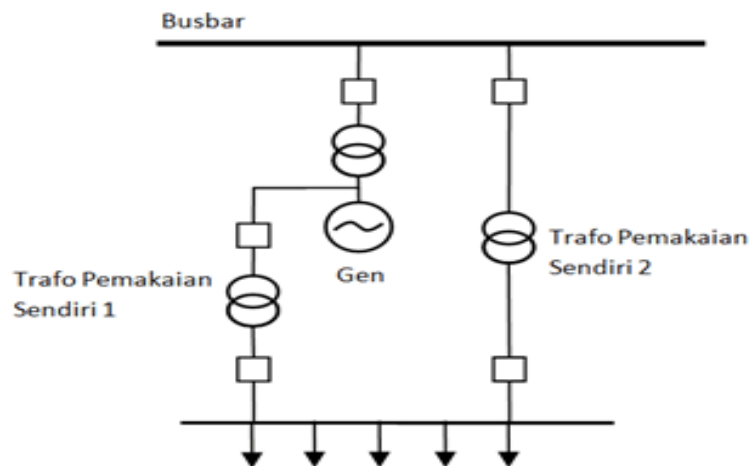
Gambar 2.15 Single line diagram untuk pusat listrik skala kecil

Gambar diatas menunjukkan *single line diagram* sistem kelistrikan pemakaian sendiri untuk pusat listrik skala kecil dimana daya listriknya disuplai oleh transformator pemakaian sendiri yang dihasilkan dari generator. Transformator pemakaian sendiri untuk skala kecil umumnya menyuplai daya listrik untuk pemakaian sendiri beberapa unit pembangkit listrik dalam sebuah pusat listrik.



Gambar 2.16 *single line diagram* Pusat Listrik Skala Menengah

Gambar diatas menunjukkan *single line diagram* sistem kelistrikan pemakaian sendiri untuk pusat listrik skala menengah. Sama halnya dengan pusat listrik skala kecil, pada umumnya transformator pemakaian sendiri digunakan untuk menyuplai daya listrik untuk pemakaian sendiri beberapa unit pembangkit listrik dalam sebuah pusat listrik.



Gambar 2.17 *single line diagram* Pusat Listrik Skala Besar

Gambar diatas adalah *single line diagram* sistem kelistrikan pemakaian sendiri untuk pusat listrik skala besar. Pada pusat listrik skala besar umumnya setiap unit memiliki transformator pemakaian sendiri yang daya listriknya dihasilkan dari generator.

Namun pada saat unit pembangkit mati atau terjadi gangguan dan ingin melakukan start awal (*black start*) maka diperlukan suplai daya untuk menjalankan peralatan bantu pertama kali. Maka suplai daya listrik pertama kali dapat diambil dari transformator pemakaian sendiri yang suplai dayanya diambil dari jaringan interkoneksi seperti yang terlihat pada gambar diatas.

Pada pusat listrik juga selalu dilengkapi dengan *Emergency Diesel Generator (EDG)* yang berfungsi untuk menghasilkan tenaga listrik jika pembangkit dalam keadaan darurat (*emergency*) atau mati(*off*), selain itu berfungsi untuk menyuplai tenaga listrik untuk keperluan kantor dan penerangan pada pusat listrik juga berfungsi dalam start awal (*black start*).

Besarnya energi listrik yang diperlukan untuk sistem pemakaian sendiri sangat bervariasi, bergantung dari keperluan jenis pusat listrik itu sendiri. Pada umumnya yang besar adalah Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU) dikarenakan PLTU membutuhkan peralatan yang banyak terutama untuk pengangkutan bahan bakar, pengolahan bahan bakar, sistem pendingin dan lainnya. Dan yang paling kecil adalah Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA) dikarenakan PLTA hanya membutuhkan energi listrik berupa lampu

penerangan, sistem kontrol dan motor-motor listrik yang tidak sebanyak bila dibandingkan dengan PLTU.

2.6 Transformator Tenaga Pada Pusat Listrik

Transformator termasuk salah satu komponen yang penting dalam sistem tenaga listrik, dan terdapat baik pada Sistem Pembangkitan (Pusat Listrik atau Power Plant), Sistem Transmisi (Penyaluran) maupun pada Sistem Distribusi. Transformator berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik. Pada Pusat Listrik terdapat beberapa jenis transformator tenaga dan dapat dibedakan berdasarkan fungsinya.

1. Generator Transformer (GT)



Gambar 2.18 Generator Transformer/Transformator

Generator adalah transformator tenaga yang dihubungkan langsung dengan panel keluaran generator. GT adalah transformator *Step-up* yang berfungsi untuk menaikkan tegangan keluaran dari generator menjadi tegangan yang lebih tinggi, bergantung dari sistem tegangan dari pusat listrik itu sendiri.

Merupakan transformator *step-up* karena hal ini bertujuan untuk mengurangi jumlah rugi-rugi daya listrik (*losses*) pada jaringan transmisi. Sisi primer GT dihubungkan dengan panel keluaran generator, sedangkan sisi sekunder GT dihubungkan dengan jaringan interkoneksi/gardu induk. Pada Pusat Listrik berskala besar, umumnya GT dilengkapi dengan pendingin minyak dan kipas.

2. *Unit Service Transformer (UST)*



Gambar 2.19 *Unit Station Transformer*

Unit Station Transformer adalah transformator pemakaian sendiri yang merupakan transformator *step down* yang berfungsi untuk melayani beban-beban dari sistem kelistrikan pemakaian sendiri dalam satu kesatuan unit yang telah dikelompokkan berdasarkan area kerjanya.

Merupakan transformator *step-down* dikarenakan pada umumnya pusat listrik menggunakan peralatan-peralatan dengan tegangan yang lebih rendah untuk menjalankan peralatannya.

Pada umumnya daya listrik dari *Unit Service Transformer (UST)* dapat diambil langsung dari keluaran generator dan diturunkan tegangannya agar dapat digunakan untuk melayani sistem kelistrikan pemakaian sendiri pada pusat listrik.

Pada umumnya beban-beban yang dilayani dapat berupa motor-motor listrik, lampu penerangan, sistem kontrol, sistem proteksi, sistem instrumentasi dan peralatan lain yang membutuhkan tegangan yang lebih rendah dalam pengoperasiannya.

3. *Station Service Transformer (SST)*

Station Service Transformer adalah transformator Step Down yang juga berfungsi untuk melayani beban-beban dari sistem kelistrikan pemakaian sendiri dalam satu kesatuan unit yang telah dikelompokkan berdasarkan area kerjanya.



Gambar 2.20 Station Service Transformer

Pada dasarnya SST sama dengan UST, hal yang membedakan SST adalah *transformator step down* yang suplai daya listriknya dapat diambil dari jaringan interkoneksi sedangkan UST suplai daya listriknya diambil langsung dari keluaran generator pada pusat listrik itu sendiri. Pada umumnya beban-beban yang dilayani merupakan peralatan untuk pemakaian sendiri pada pusat listrik sama seperti UST.

4. Unit Auxilliary Transformer (UAT)



Gambar 2.21 Unit Auxilliary Transformer (UAT)

Unit Auxilliary Transformer (UAT) adalah transformator pemakaian sendiri yang merupakan transformator *step down* yang digunakan untuk melayani beban-beban dari sistem kelistrikan pemakaian sendiri yang membutuhkan suplai listrik tegangan rendah. Pada sistem kelistrikan pusat listrik skala kecil dan menengah, suplai daya UAT dapat diambil langsung

dari keluaran generator. Sedangkan pada sistem kelistrikan pusat listrik skala besar, suplai listrik UAT diambil dari transformator SST ataupun UST

Untuk menghitung kapasitas dan beban trafo PS, menggunakan persamaan :

1. Menghitung daya trafo

$$S = \frac{P}{\cos\theta} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

P = Daya nyata (Watt)

S = Daya semu (VA)

$\cos\theta$ = Faktor daya

2.7 Bagian Utama Sistem Kelistrikan Pemakaian Sendiri

Sistem Kelistrikan Pemakaian Sendiri merupakan sistem yang berfungsi untuk menyuplai daya listrik untuk keperluan di sebuah pusat listrik. Pada suatu sistem kelistrikan pemakaian sendiri umumnya terdiri dari beberapa bagian utama, diantaranya : Transformator Tenaga, *Switchgear*, *Low Voltage Substation (LVS)*, *Motor Control Center (MCC)*, *Uninterrupted Power Supply (UPS)*, *Emergency Power Supply (EPS)* dan Sumber Listrik Arus Searah (*DC Power Supply*).

1. Transformator Tenaga

Transformator Tenaga adalah piranti listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Pada suatu sistem pemakaian sendiri pada umumnya dilengkapi dengan beberapa jenis transformator tenaga diantaranya :

- a. *Unit Service Transformer (UST)*
- b. *Station Service Transformer (SST)*
- c. *Unit Auxilliary Transformer (UAT).*

2. *Switchgear*

Pada sistem tenaga listrik secara luas pengertian *switchgear* adalah komponen-komponen hubung atau pemutus dan pendukung-pendukungnya dalam satu kesatuan unit, sehingga dapat difungsikan sebagai penghubung,

pemutus terhadap suatu sistem. *Switchgear* pada umumnya terdiri dari saklar-saklar atau kontak-kontak yang menghubungkan antara peralatan yang satu dengan peralatan yang lain dan dioperasikan oleh operator baik secara manual maupun otomatis.

3. *Low Voltage Substation (LVS)*

Low Voltage Substation adalah substation tegangan rendah yang berfungsi sebagai distributor daya listrik tegangan rendah untuk peralatan-peralatan yang dikelompokkan menurut area kerjanya. Pada umumnya memiliki sumber daya listrik dari *Unit Service Transformer* ataupun *station service transformer* yang saling dihubungkan dengan *TIE Breaker*.

4. *Motor Control Center (MCC)*

Motor Control Center merupakan pusat pengaturan oprerasi motor listrik. *Motor Control center* terdiri dari kumpulan *breaker* yang digunakan pada motor-motor atau beban lain dengan tegangan 200 V - 400 V. *Motor control center* berfungsi untuk mengontrol beberapa atau bahkan semua motor listrik dari pusat lokasi suatu plant. Merupakan *downstream* dari LVS yang berhubungan langsung dengan beban. Pada umumnya dikelompokkan sesuai dengan area kerjanya, seperti contohnya *Boiler MCC*, *turbine MCC*, *station MCC*, *precipitator MCC*, *coal handling MCC*, *essential MCC*, *water treatment plant MCC*, *circulating water MCC*, *fire protection MCC*, dan lain-lain.

5. *Uninterrupted Power Supply (UPS)*

Uninterrupted Power Supply (UPS) adalah komponen listrik yang fungsi utamanya sebagai penyedia cadangan atau tambahan listrik untuk peralatan listrik yang vital dalam waktu tertentu. *Uninterrupted power suplly* harus tersedia dalam kondisi apapun (termasuk kondisi *blackout*). Sumber tegangan pada umumnya berasal dari baterai. Digunakan untuk memikul beban-beban vital yang tidak boleh mati dalam kondisi apapun.

6. *Emergency Power Supply (EPS)*

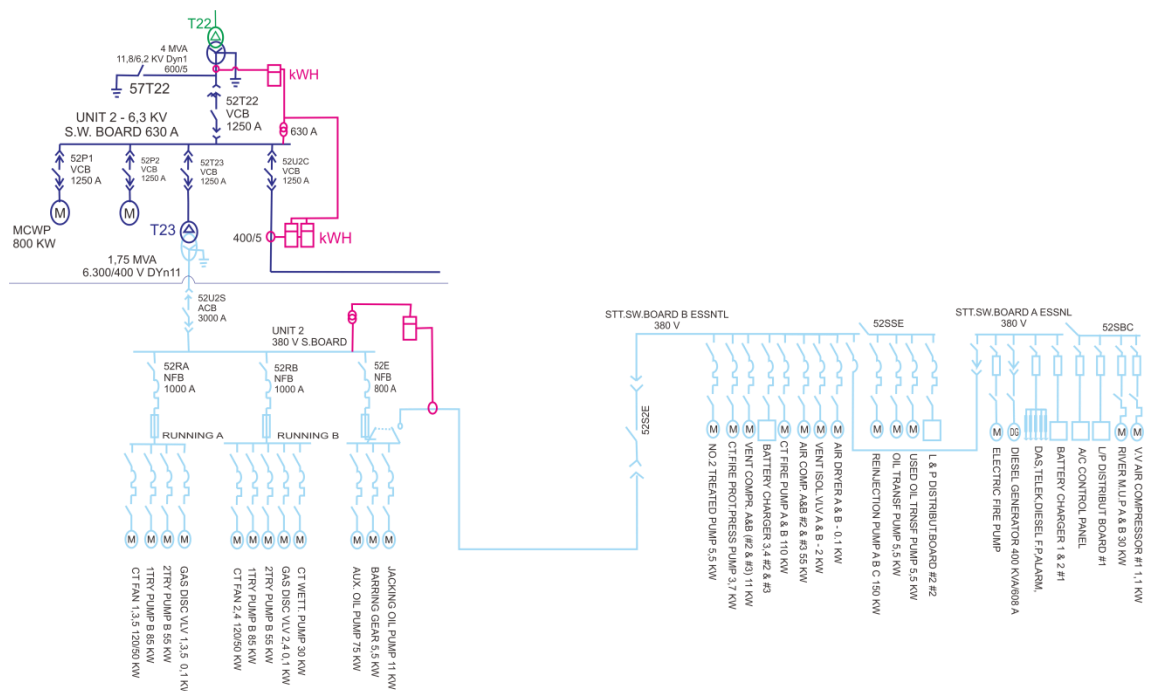
Emergency Power Supply (EPS) harus selalu tersedia dalam kondisi apapun (termasuk *blackout*) untuk menyuplai peralatan-peralatan atau beban vital yang tidak boleh *shutdown* dalam kondisi apapun. Daya

listrik *emergency power supply* pada umumnya berasal dari diesel *generator* yang hubungkan ke peralatan *essential* (peralatan yang penting) pada pusat listrik. *Emergency diesel generator* adalah peralatan pembangkitan berskala kecil yang berfungsi sebagai suplai daya listrik yang digunakan dikala kondisi darurat (*emergency*), dimana peralatan ini terdiri dari penggerak utama (*prime mover*) yang menggunakan mesin diesel dengan bahan bakar solar.

7. Sumber Listrik Arus Searah (DC Power Supply)

Pusat listrik selalu memerlukan suplai tegangan arus searah, terutama untuk menjalankan motor pengisi (penenang) pegas PMT, melayani alat-alat telekomunikasi dan memasok instalasi penerangan darurat. Digunakan untuk panel control (*control board*), relai proteksi, regulasi, rangkaian sinyal dan lain sebagainya. Dalam pengoperasiannya suplai tegangan arus searah tidak boleh kehilangan daya sehingga dibuat dua suplai dan sistem transfer yang menjamin panel peralatan vital (*essential board*) tetap beroperasi

2.8 Single Line Diagram PLTP Kamojang Unit 2



2.22 Gambar Single Line Diagram unit 2 PLTP Kamojang

PLTP Kamojang terdiri dari 3 unit, yaitu unit 1 (30 MW), unit 2 (55 MW), dan unit 3 (55 MW). *Single line diagram* diatas adalah unit 2 di PLTP Kamojang.

Garis yang berwarna biru menunjukkan sistem 6,3 kV. Garis yang berwarna biru menunjukkan sistem 380 V. Garis berwarna ungu merupakan kWh meter yang berguna untuk pencatatan niaga.

Peralatan pada unit 2 terdiri dari :

1. Transformator T22 11,8/6,3 kV
2. *Main Cooling Water Pump* 800 kW
3. Transformator T23 6,3 kV/400 V
4. Beban-beban motor kecil

Transformator yang digunakan di unit 2 terdiri dari dua jenis perbandingan. T22, dan T32 yang berfungsi sebagai trafo step down dari tegangan 11,8 kV ke 6,3 yang berfungsi sebagai trafo step down dari 6,3 kV menjadi 400 V. Trafo ini berfungsi memberi suplai kepada kebutuhan-kebutuhan lain pembangkit. Sistem 6,3 kV merupakan sistem tegangan yang menjadi penyulang bagi motor-motor *Main cooling water pump* dan juga memberi suplai bagi sistem 380 kV. Sistem 380 V berguna untuk menyuplai motor-motor lain yaitu :

1. *Oil pump*
2. *Barping gear*
3. *Auxiliary oil pump*
4. *Fan*
5. *Valve*