

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Pembangkit listrik tenaga panas bumi adalah pembangkit listrik yang menggunakan panas bumi (*geothermal*) sebagai energi penggerakannya. Indonesia dikaruniai sumber panas bumi yang berlimpah karena banyaknya gunung berapi dari pulau-pulau besar yang ada, hanya pulau Kalimantan saja yang tidak mempunyai potensi panas bumi (Carin, 2011). Keuntungan teknologi ini antara lain, bersih, dapat beroperasi pada suhu yang lebih rendah daripada PLTN, serta aman dan efisien untuk mewujudkan ketahanan energi nasional dan menurunkan tingkat emisi karbondioksida (CO₂) hal ini sesuai dengan PERMEN ESDM Nomor 12 Tahun 2017 tentang pemanfaatan energi terbarukan. Pada umumnya pembangkit listrik panas bumi berdasarkan jenis fluida kerja panas bumi yang diperoleh dibagi menjadi 3, yaitu:

- a. *Vapor dominated system* (sistem dominasi uap)
- b. *Flushed steam system*
- c. *Binary cycle system* (sistem siklus biner)

Proses dalam pembangkit dimulai dari uap yang diambil dari panas bumi yang digunakan untuk memutar turbin. Jika uap tersebut bertemperatur diatas 370 °C, maka PLTP menggunakan *vapor dominated system* dimana uap dari panas bumi langsung digunakan untuk memutar turbin. Jika bertemperatur sekitar 170 °C sampai dengan 370 menggunakan *flushed steam system* dimana uap masih mengandung cairan dan harus dipisahkan dengan *flush separator* sebelum memutar turbin. Dalam *binary-cycle system* uap panas bumi digunakan untuk

memanaskan gas dalam *heat exchanger*, kemudian gas ini yang akan memutar turbin (Kevin, 2007).

2.2 Dasar Teori

2.3 Panas Bumi (*Geothermal*)

Geothermal berasal dari kata Yunani yang berarti Geo bumi dan thermal yang berarti panas. Jadi, energi panas bumi berarti energi atau kekuatan diekstrak dari bawah bumi. Energi di dalam bumi terbentuk oleh peluruhan mineral dan hutan beberapa tahun yang lalu. Energi panas bumi disebut sumber energi terbarukan karena panas terus diproduksi di dalam bumi. Indonesia dikaruniai sumber panas bumi yang berlimpah karena banyaknya gunung berapi dari pulau-pulau besar yang ada, hanya pulau Kalimantan saja yang tidak mempunyai potensi panas bumi. Keuntungan teknologi ini antara lain, bersih, dapat beroperasi pada suhu yang lebih rendah daripada PLTN, dan aman, bahkan *geothermal* adalah yang terbersih dibandingkan dengan nuklir, minyak bumi dan batu bara. Tabel di bawah mendaftarkan lima negara yang paling banyak menghasilkan listrik menggunakan energi geothermal:

1. Amerika Serikat	3,092 Mwe
2. Filipina	1,904 Mwe
3. Indonesia	1,197 Mwe
4. Meksiko	958 Mwe
5. Italia	843 Mwe

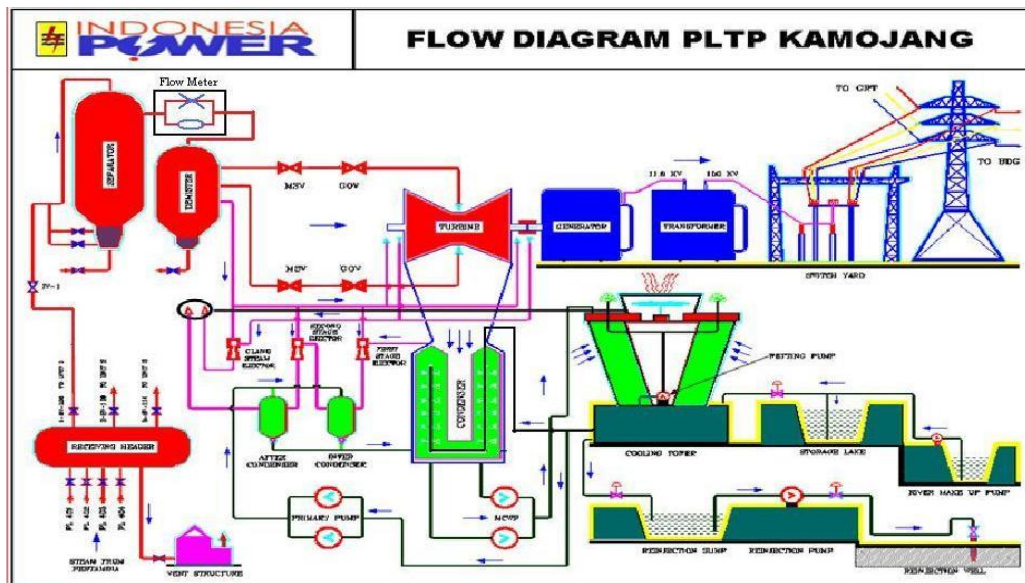
Keterangan:

Mwe: *Megawatt electrical*

Sumber: *International Geothermal Association*

Sekitar 40% cadangan energi geothermal dunia terletak di bawah tanah Indonesia, maka negara ini diperkirakan memiliki cadangan-cadangan energi geothermal terbesar di dunia dan karena itu memiliki potensi tinggi untuk sumber energi terbarukan. Namun, sebagian besar dari potensi ini belum digunakan. Saat ini, Indonesia hanya menggunakan 4-5% dari kapasitas geothermalnya.

2.4 Sistem Pembangkitan Listrik Tenaga Panas Bumi UPJP Kamojang



Gambar 2.1 Flow Diagram PLTP Kamojang

Sumber: <https://ngsuyasa.files.wordpress.com/2014/02/skema-pltp-kamojang.png>

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-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 levelnya dari 11.8 KV menjadi 150 KV dengan transformator *step up* untuk ditransmisikan dan didistribusikan 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 X 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 kelebihannya 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 di reinjeksi 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 efisien ramah lingkungan karena minim pencemaran lingkungan, dan limbah udara yang dihasilkan tidak bersifat berbahaya bagi kesehatan manusia (*toxic*).

2.5 Sistem Pasokan Uap (Sumur Uap)

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

Katup-katup dapat berada di kepala sumur seperti: *master valve, vertical discharge valve, orifice, bleed valve, cellar, dan reapture 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 korosi dan mencegah matinya sumur uap.
- d) *Reapture 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.

Unit 1 : 30 MW = 244,19 ton/jam.

Unit 2 & 3 : 2x 55 MW = 2 x 390 = 780 ton/jam.

2.6 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*

Sumber: Area PLTP UPJP Kamojang, 2016

2.7 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. 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*.



Gambar 2.3 *Vent Structure*

Sumber: <http://yoshimori-shumimura.blogspot.co.id/2008/09/sistem-pembangkitan-pltp-kamojang.html>

2.8 Separator



Gambar 2.4 Separator Unit 2 dan Unit 3

Sumber: <http://yoshimori-shumimura.blogspot.co.id/2008/09/sistem-pembangkitan-pltp-kamojang.html>

Separator berfungsi untuk membersihkan / 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*).

2.9 Demister



Gambar 2.5 Demister

Sumber: Area PLTP UPJP Kamojang, 2016

Demister adalah sebuah peralatan berupa tabung berukuran 14,5 m³. Di dalam demister terdapat kisi-kisi dari baja yang berfungsi untuk mengeliminasi butir-bitir 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.

2.10 Katup Pengatur (*Governor Valve*)

Dua katup pengatur dipasang pada masing-masing pipa uap masuk kiri dan kanan dari turbin. Katup bekerja dengan sistem hidraulik 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.

2.11 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:

1. Mengisolasi uap dengan katup pengatur.
2. Mengatur putaran turbin pada saat mulai dijalankan.
3. Sebagai pengaman dalam keadaan darurat

2.12 Turbin



Gambar 2.6 Turbin

Sumber: <http://yoshimori-shumimura.blogspot.co.id/2008/09/sistem-pembangkitan-pltp-kamojang.html>

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.

2.13 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*

Sumber: <http://yoshimori-shumimura.blogspot.co.id/2008/09/sistem-pembangkitan-pltp-kamojang.html>

2.14 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, kemudian dialirkan pada sistem penghampa gas dan sistem dari penghisap uap perapat udara.

2.15 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

Sumber: Area PLTP UPJP Kamojang, 2016



Gambar 2.9 *Ejector First Stage*

Sumber: Area PLTP UPJP Kamojang, 2016

2.16 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 .



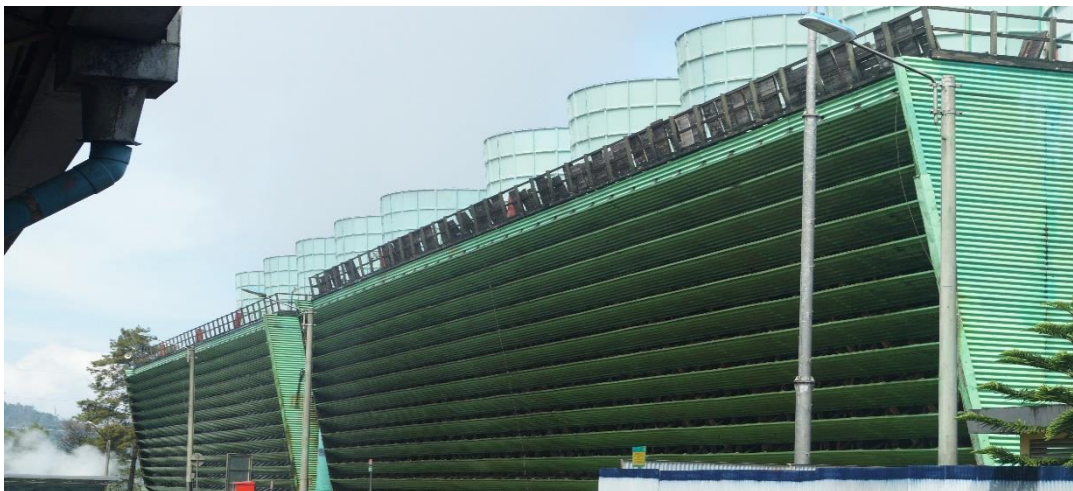
Gambar 2.10 *Main Cooling Water Pump*

Sumber: Area PLTP UPJP Kamojang, 2016

2.17 Cooling Tower

Cooling tower (menara pendingin) adalah tempat untuk mendinginkan air hasil kondensasi untuk digunakan lagi sebagai penyempot 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.

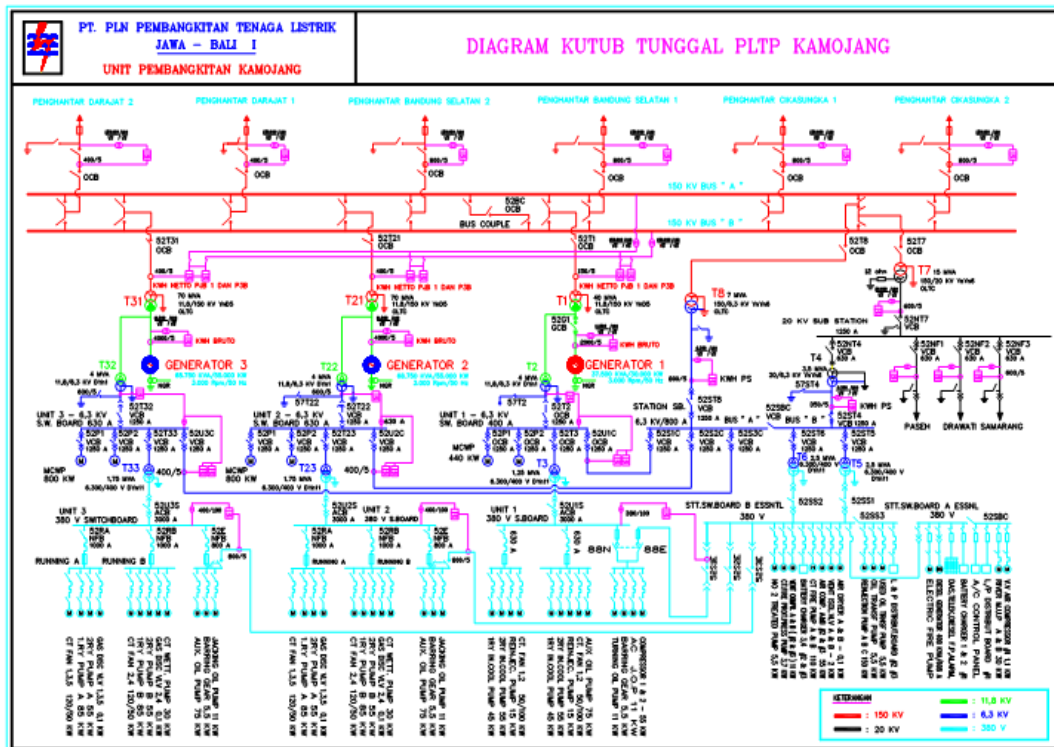
Konstruksinya terbuat dari kayu merah yang telah diawetkan dengan CDA (*cooper dichidromate arsenic*) sedangkan untuk *vent stock* terbuat dari PVC (*polyvinyl chloride*). *Cooling tower* dilengkapi dengan kipas isap paksa yang berfungsi untuk membantu proses pendinginan air kondensat. Temperatur air 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

Sumber: Area PLTP UPJP Kamojang, 2016

2.18 Single Line Diagram Sistem Tenaga Listrik PLTP Kamojang



Gambar 2.12 Single Line Diagram Sistem Tenaga Listrik PLTP kamojang

Sumber: UPJP Kamojang, 2016

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 bewarna hitam menunjukkan sistem 20 KV. Garis yang bewarna hijau menunjukkan sistem 11.8 KV. Garis yang bewarna biru menunjukkan sistem 6.3 KV. Garis yang bewarna biru menunjukkan sistem 380 KV. Garis bewarna 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 KV. Sistem 380 V berguna untuk menyuplai motor-motor lain seperti *oil pump, barping gear, auxiliary oil pump, fan, valve*, dan lain-lain. 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 150 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 akan di *step-down* oleh trafo T8 dari 150 KV menjadi 6.3 KV dan masuk ke rel 6.3 KV dari setiap unit.

2.19 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 komplek pembangkit ataupun pembangkitan.



Gambar 2.13 Main Transformator 11.8 KV /150 KV

Sumber: <http://yoshimori-shumimura.blogspot.co.id/2008/09/sistem-pembangkitan-pltp-kamojang.html>

2.20 Generator

Alat ini berfungsi untuk mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Generator sinkron yang digunakan memiliki spesifikasi 68.750 KVA, 55000 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

Sumber: <http://reader13.docslide.net/store13/html5/282015/5571f91449795991698ebf53/bg18.png>

2.21 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.

2.22 Karakteristik Beban Listrik

Rangkaian listrik AC merupakan jaringan distribusi yang luas yang menghubungkan antara pembangkit tenaga listrik dengan beban-beban listrik seperti rumah-rumah, perindustrian, perkotaan, rumah sakit dan lain sebagainya. Jaringan pada listrik AC memiliki tiga jenis beban listrik yang harus ditopang oleh pembangkit listrik. Ketiga beban tersebut yaitu beban resistif, beban induktif dan beban kapasitif. Ketiganya memiliki karakteristik yang berbeda satu sama lainnya.

a. Beban Resistif

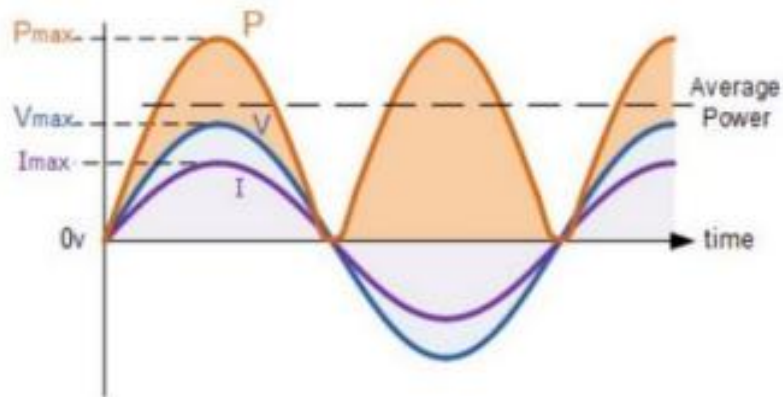
Beban resistif dihasilkan oleh alat-alat listrik yang bersifat murni tahanan (resistor) seperti pada elemen panas dan lampu pijar. Beban resistif ini memiliki sifat yang “pasif”, dimana ia tidak mampu memproduksi maupun

mengonsumsi energi listrik. Resistor hanya bersifat menghalangi aliran elektron yang melewatinya (dengan jalan menurunkan tegangan listrik yang mengalir), sehingga mengakibatkan terkonversinya energi listrik menjadi panas. Dengan sifat demikian, resistor akan selalu bersamaan membentuk bukit dan lembah. Dengan kata lain beban resistif tidak akan menggeser posisi gelombang arus maupun tegangan. beban resistif hanya menyerap daya aktif dan tidak menyerap daya reaktif sama sekali. Tegangan dan arus se-fase secara matematis dinyatakan :

$$R = V \cdot I$$



Gambar 2.15 Arus dan Tegangan Beban Resistif

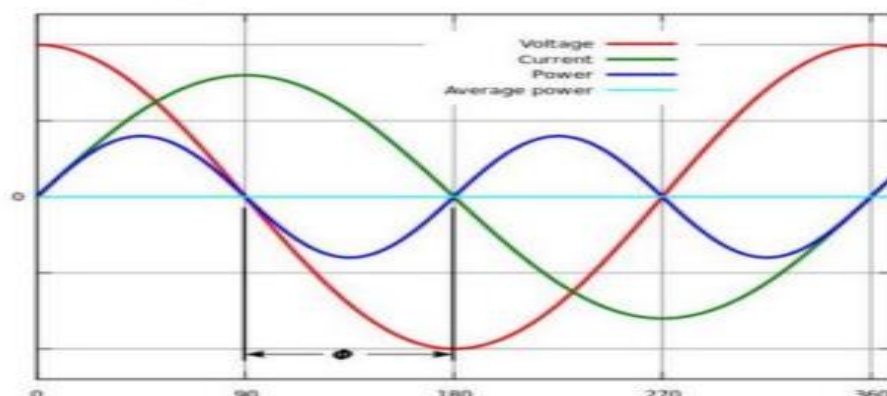


Gambar 2.16 Gelombang Sinusoidal Beban Resistif

Pada gambar 2.16, karena gelombang tegangan dan arus listrik berada pada fase yang sama maka nilai dari daya listrik akan selalu positif. Ini mengapa beban resistif murni akan ditompang murni oleh daya nyata.

b. Beban Induktif

Beban induktif dihasilkan oleh lilitan kawat (kumparan) yang terdapat diberbagai alat-alat listrik seperti motor, trafo, dan relay. Kumparan dibutuhkan oleh alat-alat listrik tersebut untuk menciptakan medan magnet sebagai komponen kerjanya. Pembangkitan medan magnet pada kumparan inilah yang menjadi beban induktif pada rangkaian arus listrik AC. Kumparan memiliki sifat unuk menghalangi terjadinya perubahan nilai arus listrik. Seperti yang diketahui bahwa listrik AC memiliki nilai arus listrik yang naik turun membentuk gelombang sinusoidal. Perubahan arus listrik yang naik turun inilah yang dihalangi oleh komponen kumparan di dalam sebuah rangkaian listrik AC. Terhalangnya perubahan arus listrik ini mengakibatkan arus listrik menjadi tertinggal beberapa oleh tegangan listrik pada grafik sinusoidal arus dan tegangan AC.

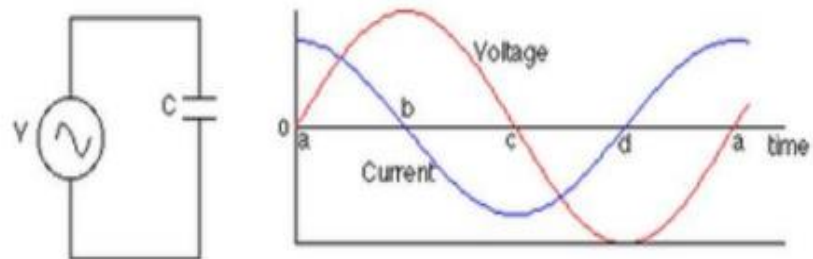


Gambar 2.17 Gelombang Sinusoidal Beban Induktif

Pada Gambar 2.17 Pada gelombang sinusoidal listrik AC diatas, bahwa sebuah sumber listrik AC diberi beban induktif murni, maka gelombang arus listrik akan tertinggal sejauh 90° oleh gelombang tegangan. Atas dasar inilah beban induktif dikenal dengan istilah *lagging* (arus tertinggal tegangan). Terlihat pula bahwa dikarenakan gelombang arus listrik diatas, maka nilai daya listrik menjadi bergelombang sinusoidal.

c. Beban Kapasitif

Beban kapasitif bersifat menghalangi terjadinya perubahan nilai tegangan listrik. Sifat ini menunjukkan bahwa kapasitif bersifat seakan-akan menyimpan tegangan listrik sesaat. Beban ini menyerap daya reaktif (kW) dan mengeluarkan daya raktif (kVAR).



Gambar 2.18 Gelombang Listrik AC beban kapasitif murni

Gambar 2.18 di atas merupakan ilustrasi rangkaian listrik AC dengan beban kapasitor murni. Mendapatkan *supply* tegangan AC naik dan Turun, maka kapasitor akan menyimpan dan melepas tegangan sesuai dengan perubahan tegangan masuknya. Fenomena inilah yang mengakibatkan gelombang arus AC akan mendahului (*leading*) tegangan sejauh 90°